

Penetration abgeschiedener löslicher Partikeln durch Filtermedien in der Gasreinigung

Zur Erlangung des akademischen Grades einer

DOKTORIN DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (DR.-ING)

von der KIT-Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

DISSERTATION

von

Almuth Dorothea Schwarz
aus Marl

Tag der mündlichen Prüfung: 01.September2023

Erstgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittler

Zweitgutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt



This document is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>

Danksagung

Die vorliegende Arbeit basiert auf meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (MVM) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), in den Jahren 2017 bis 2022. Während der Umsetzung dieses Projektes habe ich wertvolle Anregungen und Unterstützung von einer Reihe von Leuten erhalten, denen ich an dieser Stelle herzlich danken möchte. Es ist unmöglich alle namentlich zu erwähnen, die mich in den prägenden Jahren der Entstehung dieser Arbeit begleitet haben, weshalb im Folgenden nur einige benannt sind.

An erster Stelle gilt mein Dank meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittler, für das mir entgegengebrachte Vertrauen, als er mich 2017 am MVM zur selbstständigen und zielführenden Bearbeitung dieses Forschungsprojektes einstellte. Ferner bedanke ich mich für die Möglichkeit und die damit verbundene Unterstützung zur Veröffentlichung meiner Ergebnisse und deren Vorstellung auf zahlreichen nationalen und internationalen Konferenzen. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Schmidt danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats und sein Interesse an meiner Arbeit. Des Weiteren danke ich ihm und seinen MitarbeiterInnen des Instituts für Partikeltechnologie der Bergischen Universität Wuppertal für ihre Gastfreundschaft während meines Besuches in Wuppertal, die produktive Zusammenarbeit und die sehr interessanten Beiträge auf Fachkonferenzen und anschließenden Gespräche, die mir immer viel Spaß bereitet haben.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Dr. Jörg Meyer für viele fachliche Diskussionen, seine scharfsinnigen Beobachtungen und wertvollen Ratschläge, die einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Während meiner Zeit am MVM durfte ich mit vielen engagierten Studierenden zusammenarbeiten. Insbesondere möchte ich mich bei Sandra Kochendörfer, Yasmin Kafara-Kassi und Florian Stolz für ihre Unterstützung, sowohl im Labor als auch beim Anfertigen von Abbildungen, während meines Endsprints am MVM bedanken. Außerdem danke ich denjenigen, die ihre Abschlussarbeit bei mir geschrieben haben, für das mir entgegengebrachte Vertrauen, viele interessierte Fragen und neue Blickwinkel. Danke, dass ich von euch lernen durfte.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am MVM möchte ich ebenso danken. Den MitarbeiterInnen der Werkstätten, der Partikelmesstechnik sowie der Verwaltung danke ich für ihre tatkräftige Unterstützung und freundliche Art, die mich in herausfordernden Situationen motiviert hat, am Ball zu bleiben. Mein besonderer Dank gilt Frau Kerstin Bertsch, die umfangreiche Kameraaufnahmen für mein Projekt ermöglicht und das Projekt mit viel positiver Energie und Geduld begleitet hat.

Zusätzlich möchte ich den wissenschaftlichen MitarbeiterInnen am MVM danken. Der gesamten Arbeitsgruppe Gas-Partikel-Systeme, so sehr sie sich auch über die Jahre verändert hat, danke ich für viele kritische Probevorträge und wertvolle gemeinsame Pausen mit Kaffee und Tischkicker. Insbesondere Herrn Johannes Naue und Frau Dr. Laila Pasin möchte ich für den guten Start am Institut danken. Auch möchte ich Herrn Dr. Benjamin Radel und Herrn Christian Straube für ihre wertvolle Unterstützung und die damit verbundene, investierte Zeit bei meiner Arbeit am μ -CT danken. Ein besonderer Dank gilt meinen BürokollegInnen, Herrn Dr. Eckhard Kolb, Herrn Julian Zoller und Frau Vanessa Löschner, deren Begeisterung an der Forschung und Zielstrebigkeit mich viele Male inspiriert haben. Mein herzlicher Dank gilt auch Frau Tabea Sinn, Frau Julia Thieringer, Frau Dr. Kirsten Ullmann, Herrn Peter Bächler, Herrn Dr. Thomas Penner, Frau Julia Szabadi, Frau Mira Simmler und Frau Carolin Hirsching für unzählige Gespräche bei Spaziergängen und sportlichen Aktivitäten, bei denen ich zur Ruhe kommen konnte, es viel Raum für gute Ideen gab und die nötige Energie zu deren Umsetzung getankt wurde. Danke, dass ihr mich in dieser Zeit begleitet habt und für all die schönen Momente.

Eine große Hürde in der Endphase dieses Projektes war das Zusammenfassen von fünf Jahren Arbeit auf nicht mehr als 120 Seiten. Ich danke Frau Drasti Patel, PhD., Frau Celine Bächler und Frau Dr. Sara Claramunt für die unzähligen Abende und Wochenenden, an denen sie mir gegenüber saßen, während ich vor meinem Laptop geschrieben oder über Zetteln und Büchern gegrübelt habe. Auch möchte ich meinen Bronnis und meinen Freundinnen danken, die mich aus der Ferne unterstützt haben.

Ich möchte mich an dieser Stelle auch bei meiner Familie bedanken. Insbesondere danke ich meinen Eltern dafür, mir beigebracht zu haben, dass alles möglich ist und meinen Geschwistern dafür, mich in den richtigen Momenten stets daran zu erinnern.

Und ich danke dir, James, dafür, dass du mich nach Karlsruhe begleitet hast, dass, in Momenten, in denen ich keine Geduld und kein Vertrauen ins Gelingen aufbringen konnte, du genug für uns beide hattest und für dein Talent mich auch in den anstrengendsten Phasen zum Lachen zu bringen.

Zusammenfassung

Für ein umfassendes Verständnis des Filterbetriebes unter Realbedingungen in der Gasreinigung behandelt die vorliegende Arbeit, wie sich Filter, die zumindest teilweise mit wasserlöslichen Partikeln beladen sind, bei Beaufschlagung mit Wasser verhalten. Wasser tritt dabei im Luftstrom im gasförmigen Zustand, aber insbesondere auch im flüssigen Zustand, als Wassertropfen, auf. Für eine grundlegende Wissensbasis werden die Vorgänge, die für Oberflächen- und Tiefenfilter gleichermaßen bedeutsam sind, im Rahmen von drei wesentlichen Fragen behandelt.

1. Welchen Einfluss hat eine Beaufschlagung mit Wassertropfen von Filtern zur Gasreinigung, auf denen lösliche und unlösliche Partikeln abgeschieden sind, auf deren charakteristisches Betriebsverhalten?
2. Welchen Einfluss hat eine Beaufschlagung mit Wassertropfen von Filtern zur Gasreinigung, auf denen lösliche und unlösliche Partikeln abgeschieden sind, auf die mögliche Umlagerung und Penetration des abgeschiedenen Materials?
3. Sind die Einflüsse einer Beaufschlagung mit Wassertropfen von Filtern zur Gasreinigung, auf denen lösliche und unlösliche Partikeln abgeschieden sind, auf deren Betriebsverhalten und Penetration des abgeschiedenen Materials von der Benetzbarkeit und dem grundlegenden strukturellen Aufbau des Filtermediums abhängig?

Eine Kurzzeitbeaufschlagung von Filterkuchen aus Kaliumsulfat mit unterschiedlichen Wassermengen im gasförmigen und flüssigen Aggregatzustand im Luftstrom mit anschließender Durchströmungstrocknung gibt Aufschluss über den Einfluss der Wassermenge auf die dadurch auftretende Umlagerung des Salzes. In dieser Arbeit wird zwischen Beaufschlagung beladener Filter mit gasförmigem Wasser, im Folgenden bezeichnet als Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit, und Wasser in der flüssigen Phase in Form von Wassertropfen in feuchter Luft, im Folgenden bezeichnet als Beaufschlagung mit Wassertropfen, unterschieden. Aufgrund einer hohen Deliqueszenzfeuchte, dem salzspezifischen Grenzwert der rel. Luftfeuchtigkeit, bei dem sich das Salz durch Aufnahme von Wasser aus der Umgebungsluft löst und ein flüssiger Lösungstropfen entsteht, ist Kaliumsulfat geeignet, Unterschiede zwischen der Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit und Wassertropfen aufzuzeigen. In den Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Wasserbeaufschlagung eines Filters mit löslichem Filterkuchen zur anströmseitigen Umlagerung des Partikelmaterials führt und daraus ein deutlicher, nahezu spontaner Differenzdruckabfall resultiert. Unabhängig von der Wassermenge (egal ob gasförmig oder flüssig) tritt ein Differenzdruckabfall auf, der qualitativ immer gleich verläuft. Allerdings hängt dessen Ausprägung von der Wassermenge ab. Dabei führt mehr

Wasser zu mehr gelöstem Salz, einer stärkeren Umstrukturierung der Dendriten und Umlagerung des Salzes und einem schnelleren Abfall des Differenzdrucks. Mit anhaltender Beaufschlagung mit Wassertropfen nach initialem Differenzdruckabfall steigt der Differenzdruck an und sinkt erst, sobald die Durchströmungstrocknung einsetzt, was zu einem lokalen Maximum im Differenzdruckverlauf führt. Aus der Ölnebel filtration ist bekannt, dass die Abscheidung von flüssigen Tropfen durch Ansammlung von Flüssigkeit am Filter zu einem vergleichbaren Anstieg des Differenzdrucks führt. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass eine Kurzzeitbeaufschlagung bereits zu einer Umstrukturierung des Filterkuchens und anströmseitigen Umlagerung des zuvor abgeschiedenen Salzes führt, allerdings nicht zur Penetration dessen durch das Filtermedium. Der Einfluss der Salzart auf den Differenzdruckverlauf und das Ausmaß der Umlagerung des Salzes wurde durch einen Vergleich von Kaliumsulfat mit Kaliumchlorid und Natriumchlorid untersucht. Die drei Salze unterscheiden sich insbesondere in ihrer Löslichkeit und ihrer Deliqueszenzfeuchte. Die Untersuchung mit nahezu identischen Filterkuchen bezüglich Partikelgrößenverteilung und Masse zeigt, dass der charakteristische Differenzdruckabfall bei einer Kurzzeitbeaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit oder Wassertropfen bei allen drei Salzen auftritt. Mit anhaltender Beaufschlagung nach initialem Differenzdruckabfall tritt insbesondere bei Beaufschlagung mit Wassertropfen ein Anstieg des Differenzdrucks auf. Mit steigender Deliqueszenzfeuchte fällt der Anstieg des Differenzdrucks während der Wasserbeaufschlagung geringer aus. Insbesondere bei der Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit fällt die Änderung des Differenzdrucks (Abfall und Anstieg) mit steigender Deliqueszenzfeuchte des Salzes geringer aus. Die Untersuchungen zur Kurzzeitbeaufschlagung fanden mit hydrophoben Filtermedien statt.

Untersuchungen der Langzeitbeaufschlagung von hydrophilen Oberflächenfiltern, auf denen lösliche Kaliumsulfatpartikeln und / oder unlösliche Glaskugeln abgeschieden sind, mit Wassertropfen zeigen einen charakteristischen Differenzdruckverlauf. Anfänglich entspricht dieser dem Verlauf bei einer Kurzzeitbeaufschlagung mit instantanem Abfall des Differenzdrucks durch eine Strukturänderung des Filterkuchens. Sobald die Salzlösung die Abströmseite erreicht, bildet sich dort ein Film, der zu einem steilen Differenzdruckanstieg führt, woraufhin eine abströmseitige Drainage einsetzt. Bei anhaltender Beaufschlagung bleibt der Differenzdruck anschließend auf einem nahezu konstanten Wert. Ein Vergleich hydrophiler Oberflächenfilter mit oleophilen Ölnebel filtern zeigt, dass der Differenzdruckverlauf mit dem für Ölnebel filter entwickelten Kanal-Film-Modell beschrieben werden kann. Bei der Langzeitbeaufschlagung konnte die Penetration löslicher Filterkuchenbestandteile durch das Filtermedium durch Nachweisen von Salz in der abströmseitigen Drainage festgestellt werden. Mit anhaltender Beaufschlagung steigt die akkumulierte Salzmenge in der abströmseitigen Drainage und die Sättigung der drainierten Lösung sinkt. Unlösliches Partikelmaterial penetriert beim vorliegenden Materialsystem nicht.

Die Untersuchung der Langzeitbeaufschlagung führte außerdem zu folgenden Ergebnissen. Der Fraktionsabscheidegrad, gemessen mit Kaliumsulfatpartikeln, eines trockenen, beladenen Filters ist höher als bei einem trockenen, unbeladenen Filter. Versuche mit salzbeladenen, glasbeladenen und salz- / glasbeladenen Oberflächenfiltern zeigen, dass, im Vergleich zu einem beladenen

Oberflächenfilter ohne Kontakt zu gasförmigem oder flüssigem Wasser, der Fraktionsabscheidegrad des gleichen Filters mit gleicher Beladung, bedingt durch die Langzeitbeaufschlagung mit Wassertropfen und die daraus resultierende Strukturänderung des Filterkuchens bzw. Umlagerung des abgeschiedenen Materials, abnimmt. Dies wurde in Versuchen mit unterschiedlichen Glasbeladungen untersucht. Je größer die absolute Beladung der glasbeladenen und salz- / glasbeladenen Filtermedien mit unlöslichem Partikelmaterial ist, desto mehr verschiebt sich die MPPS (engl. most penetrating particle size) durch Beaufschlagung mit Wassertropfen zu einer kleineren Partikelgröße. Die MPPS ist die charakteristische Partikelgröße, bei welcher der kleinste Anteil eines Partikelkollektivs abgeschieden wird. Ungleichmäßig verteiltes Partikelmaterial auf der Anströmseite des Filtermediums führt zu einer inhomogenen Durchströmung. Durch die Reduktion der bevorzugt durchströmten Anströmfläche erhöht sich dort lokal die Anströmgeschwindigkeit und damit auch die Trägheitsabscheidung, wohingegen die Diffusionsabscheidung abnimmt, was wiederum zur Verschiebung der MPPS zu einer kleineren Partikelgröße führt.

REM- und μ -CT-Aufnahmen zeigen, dass, nach der Langzeitbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung der Filter mit trockenem Luftstrom, nicht penetriertes Salz und Glas an der Trocknungsfront des Filters verbleiben. Für eine genauere Analyse des Verbleibs des Partikelmaterials im Inneren von Filtern können mehrlagige Filter verwendet werden, deren Filterlagen einzeln gravimetrisch untersucht werden. In dieser Arbeit wird anhand von Differenzdruckverläufen gezeigt, dass mit mehrlagigen Oberflächenfiltern erlangte Erkenntnisse auf einlagige Oberflächenfilter übertragbar sind. Mit mehrlagigen Filtern konnte bestätigt werden, dass eine kontinuierliche Langzeitbeaufschlagung salzbeladener hydrophiler Oberflächenfilter mit Wassertropfen zur Penetration von Lösung und damit von Salz durch die gesamte Tiefe des Filtermediums bis auf die Reingasseite führt. Salz, das nach der Durchströmungstrocknung im Filter verbleibt, kristallisiert dabei überwiegend auf der Anströmseite und nicht im Filterinneren. Im Gegensatz dazu zeigen Versuche mit einer kontinuierlichen mittelfristigen Beaufschlagung der Filter mit Wassertropfen mit Durchströmungstrocknung vor Einsetzen einer abströmseitigen Drainage, dass es dabei zur Penetration von Lösung ins Filtermedium kommt und das Salz abschließend überwiegend im Innern des Filtermediums auskristallisiert. Bei intermittierender Beaufschlagung, also einer mittelfristigen Beaufschlagung ohne Drainage, auf die nach Durchströmungstrocknung eine Langzeitbeaufschlagung mit Drainage folgt, verbleibt Salz nach abschließender Durchströmungstrocknung anströmseitig im Filtermedium. Wider Erwarten wird nach intermittierender Beaufschlagung und Durchströmungstrocknung quantitativ mehr Salz an der Anströmseite nachgewiesen als nach mittelfristiger Beaufschlagung und Durchströmungstrocknung. Aus Forschungsarbeiten zur Trocknung von gesättigten, porösen Strukturen ist bekannt, dass Salzlösung bei der Trocknung in den Kapillaren des Filters (Flüssigkeitskanäle) an die Trocknungsfront transportiert wird und Salz dort kristallisiert. Dieser Effekt tritt in den Versuchen mit unterschiedlichen Betriebsweisen während der Wasserbeaufschlagung, somit auch entgegen der Strömungsrichtung bei der Durchströmungstrocknung, auf. Zur Bestätigung wurden Versuche mit salzbeladenen Oberflächenfiltern, Langzeitbeaufschlagung mit Wassertropfen

und umgekehrter Strömungsrichtung während der Durchströmungstrocknung durchgeführt. Die abschließende Salzverteilung erlaubt keine Rückschlüsse auf die Betriebsweise, intermittierend oder kontinuierlich, während der Beaufschlagung mit Wassertropfen und hängt bei diesen Versuchen von der Trocknungsrichtung ab.

Die Benetzbarkeit von Filtermedien ist insbesondere bei Koaleszenzfiltern eine wesentliche Einflussgröße für deren Betriebsverhalten. Ein Vergleich zweier mit Kaliumsulfat beladener Oberflächenfiltermedien mit gleicher Struktur, aber in hydrophiler und hydrophober Ausführung, zeigt, dass die Benetzbarkeit des Filtermediums einen wesentlichen Einfluss auf den Differenzdruckverlauf des Filters während der Beaufschlagung mit Wassertropfen hat. Im Gegensatz zum salzbeladenen hydrophoben Filtermedium, weist ein salzbeladenes hydrophiles Filtermedium bei kontinuierlicher Langzeitbeaufschlagung einen ausgeprägten Anstieg in Form eines Sprungs im Differenzdruckverlauf auf, der mit dem Kanal-Film-Modell beschreibbar ist. Anschließend tritt eine Drainage ausschließlich abströmseitig auf und der Großteil der Salzbeladung verbleibt nach abschließender Durchströmungstrocknung im Filtermedium. Beim salzbeladenen hydrophoben Filtermedium zeigt sich bei Langzeitbeaufschlagung nach einem initialen Abfall ein Anstieg im Differenzdruckverlauf, der nicht mit dem Kanal-Film-Modell zu beschreiben ist. Nach Anstieg des Differenzdrucks setzt eine abströmseitige Drainage beim hydrophoben Filter ein, woraufhin der Differenzdruck absinkt und einen Wert weit über dem Anfangsdifferenzdruck des ursprünglich unbeladenen Filters erreicht. Anströmseitige und abströmseitige optische Beobachtung des Filters im Betrieb zeigen beim hydrophoben Filtermedium eine anströmseitige Drainage und abströmseitig, anstatt wie beim hydrophilen Filtermedium eine flächendeckende Durchnässung, einzelne austretende Tropfen, welche die Enden von Flüssigkeitskanälen im Filtermedium markieren. Das hydrophobe Filtermedium enthält nach Wasserbeaufschlagung kein Salz mehr, weil der Großteil des Salzes mit der anströmseitigen Drainageflüssigkeit abfließt. Die Salzmenge, die beim hydrophoben und hydrophilen Filter auf die Reingasseite penetriert, ist bei gleicher Beaufschlagung (Dauer, Wassermenge) ab Eintritt einer abströmseitigen Drainage massenmäßig vergleichbar. Eine Penetration von Flüssigkeit auf die Reingasseite des Filters tritt beim untersuchten hydrophoben Filtermedium nur auf, wenn das Filtermedium zumindest teilweise mit löslichen Partikeln beladen ist. Beobachtungen einzelner Tropfen auf unbeladenen und beladenen Filtermedien bestätigen, dass das Salz die wasserabweisende Eigenschaft des hydrophoben Filtermediums reduziert. Es ist bekannt, dass Kondensation zum Eindringen von Wasser in die Zwischenräume einer Oberflächenstruktur und damit zur Benetzbarkeit einer ursprünglich wasserabweisenden Oberfläche führen kann. Daraus ist zu übertragen, dass auch ursprünglich anströmseitig im Porenraum des Filtermediums abgeschiedenes Salz, durch Wasseraufnahme und Bildung von Lösung, Flüssigkeit befähigt in das Filtermedium einzudringen.

Dreilagige hydrophile Tiefenfilter wurden analog zu den Oberflächenfiltern untersucht. Die Beladung mit Kaliumsulfat, Langzeitbeaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung bei medientypischer Anströmgeschwindigkeit hat ergeben, dass es auch bei Tiefenfiltern durch Kontakt mit Wassertropfen zur Penetration von Lösung kommt und Salz in der abströmseitig auftretenden Drainage nachgewiesen werden kann. Aufgrund von Lösung und Umlagerung des Salzes

im Filter, kommt es bei Beaufschlagung mit Wassertropfen zu einem Abfall des Differenzdrucks und anschließend langsamen Anstieg bei anhaltender Wasserbeaufschlagung, wie es auch bei kurzzeitiger Beaufschlagung von Oberflächenfiltern beobachtet wurde. Fotos der Abströmseite belegen, dass während der Beaufschlagung mit Wassertropfen schon vor Beginn der abströmseitigen Drainage eine interne Drainage zu einem Wasserstand im unteren Bereich der grobporigen Filter führt. Es kommt weder anströmseitig noch abströmseitig zu einer Filmbildung am Filtermedium. Mit einer geringeren Kapillarwirkung bei größeren Filterporen ist zu begründen, dass der Einfluss der Durchströmungstrocknung auf den Verbleib des Salzes im Filter gegenüber einem hydrophilen Oberflächenfilter stark reduziert ist und das Salz nach der Trocknung nicht überwiegend an der Anströmseite auskristallisiert, sondern über die Tiefe des Mediums verteilt ist.

In dieser Arbeit konnte im Rahmen von drei Fragestellungen erstmals gezeigt werden, welchen Einfluss Wassertropfen im Luftstrom auf den Betrieb von Filtern zur Gasreinigung, auf denen wasserlösliche und unlösliche Partikeln abgeschieden sind, haben können. Bei Beaufschlagung mit Wassertropfen im Gasstrom kommt es zur Umlagerung und Lösung des Partikelmaterials, was zu einem charakteristischen Differenzdruckabfall führt. Bei anhaltender Beaufschlagung mit Wassertropfen kann es zur Penetration des löslichen Materials in Lösung in das Filtermedium bzw. durch das Filtermedium hindurch sowie zu abströmseitiger Drainage kommen. Am Beispiel von hydrophilen Oberflächenfiltern konnte gezeigt werden, dass der Fraktionsabscheidegrad von Filtern, die mit löslichen und/oder unlöslichen Partikeln beladen sind, durch Beaufschlagung mit Wassertropfen und anschließende Durchströmungstrocknung sinkt. Des Weiteren ist der Einfluss der Beaufschlagung beladener Filter mit Wassertropfen auf das Betriebsverhalten und die Penetration des abgeschiedenen löslichen Materials von der Benetzbarkeit und dem grundlegenden strukturellen Aufbau des Filtermediums abhängig. Eine Drainage tritt bei hydrophoben Oberflächenfiltern auch anströmseitig und bei grobporigen Tiefenfiltern intern auf.

Damit leistet die vorliegende Arbeit einen grundlegenden Beitrag zum Verständnis der Filtration von Partikeln in salzhaltiger Umgebung unter Wassereinfluss. Diese Erkenntnisse erweitern das Verständnis des Betriebsverhaltens von Filtern unter Realbedingungen und sollen zukünftig als zentraler Ausgangspunkt für Bemühungen dienen, Filteranwendungen in salzhaltiger Witterung mit erhöhtem Wassergehalt zu optimieren.

Summary

This work aims to contribute to a comprehensive understanding of the operating behavior of filters for gas-cleaning applications in real field operating conditions, by examining filters with at least partial loading with soluble particles during exposure to water. In a gas stream, water can occur both in the gaseous state and as water droplets in the liquid state. Processes that are equally important for surface and depth filters are dealt with in the context of three essential questions.

1. How does exposure of gas-cleaning filters, loaded with soluble and insoluble particles, to water droplets influence the filters' characteristic operating behavior?
2. How does exposure of gas-cleaning filters, loaded with soluble and insoluble particles, to water droplets influence possible rearrangement and penetration of the initially deposited material?
3. Does the influence of exposure to water droplets on the operating behavior of gas-cleaning filters and the penetration of the deposited material depend on the wettability or basic structural composition of the filter medium?

The influence of short-term exposure of filters with soluble filter cakes to water on the filters' operating behavior and particle rearrangement, as well as penetration, were investigated. Filter cakes made of potassium sulfate were exposed to different amounts of water, in both gaseous and liquid states and subsequently dried by a particle-free air stream. This work distinguishes between exposing filters to gaseous water, *exposure to relative humidity*, and liquid water in the form of water droplets in a humid air stream, *exposure to water droplets*. The results showed that exposure of a filter with soluble filter cake to water leads to a restructuring of the particle material, resulting in a spontaneous steep decrease in the differential pressure, the occurrence of which is independent of the amount of water (regardless of whether it is gaseous or liquid). However, the extent of the decrease in differential pressure depends on the amount of water, that the filter is exposed to. A larger amount of water dissolves more salt and leads to more rearrangement of the salt and a faster decrease in the differential pressure. With continued exposure after the initial decrease, the differential pressure increases and decreases as soon as drying begins. It is known from oil mist filtration that the separation of liquid droplets leads to a comparable increase in the differential pressure due to the accumulation of liquid on the filter. Overall, it was shown that short-term exposure already leads to a restructuring of the filter cake, but not to the penetration of salt through the filter medium. The influence of the type of salt on the differential pressure, and the extent of rearrangement of the salt, is examined by comparing potassium sulfate with potassium chloride

and sodium chloride. The three salts differ in particular in their solubility and their deliquescence relative humidity, the salt-specific relative humidity at which a salt dissolves by absorbing water from the ambient air. The investigation with almost identical filter cakes in terms of particle size distribution and mass shows that the characteristic decrease in differential pressure with short-term exposure to relative humidity or water droplets occurs with all three salts. With continued exposure after the initial decrease in differential pressure, there is an increase in the differential pressure. This is particularly the case when the filter is exposed to water droplets. The lower the deliquescence relative humidity of the salt on the filter is, the larger the increase in the differential pressure during water exposure. The investigation of short-term exposure took place with hydrophobic filter media.

Investigations of long-term exposure of hydrophilic surface filters, on which soluble potassium sulfate and / or insoluble glass spheres are deposited, to water droplets show a characteristic differential pressure profile. The profile initially corresponds to the profile observed during short-term exposure. It shows an instantaneous decrease in the differential pressure due to a structural change in the filter cake, followed by a slow increase. As soon as the solution reaches the downstream side, a film forms. This leads to a steep increase in differential pressure. A downstream drainage sets in and the differential pressure remains at an almost constant value. A comparison of hydrophilic surface filters with oleophilic oil mist filters shows that the differential pressure plot of hydrophilic surface filters can be described with the jump-and-channel model developed for oil mist filters. During long-term exposure, it was found that soluble filter cake components penetrate through the filter medium and are detectable in the downstream drainage. With continued exposure, the accumulated amount of salt in the downstream drainage increases while the saturation of the drained solution decreases. With the material system at hand, insoluble particles did not penetrate the filter medium.

The investigation of long-term exposure led to the following additional results. It is known that the fractional separation efficiency of a loaded surface filter is always higher than that of an unloaded one. The fractional separation efficiency of salt-loaded, glass-loaded and salt / glass-loaded surface filters was measured with potassium sulfate particles. The results show that, compared to the same filter with the same load without contact with gaseous or liquid water, the fractional separation efficiency of a loaded surface filter decreases due to long-term exposure to water droplets and the resulting structural change in the filter cake. This was investigated in tests with different glass loads. The greater the absolute loading of the glass-loaded and salt / glass-loaded filter with insoluble particle material is, the more the most penetrating particle size (MPPS) due to exposure to water droplets to a smaller particle size. The MPPS marks the characteristic particle size, which is least likely to be separated from the gas stream by the filter medium. This is caused by an unevenly distributed particle material on the upstream side of the filter medium, which leads to an inhomogeneous flow. Due to the reduced preferential active area, the flow velocity increases locally and thus also the inertial separation. In contrast, diffusion separation decreases, which in turn leads to a shift in the MPPS to a smaller particle size.

SEM and μ -CT images show that after long-term exposure and drying of the surface filter with a stream of dry air, unpenetrated salt, and glass remain on the drying front of the filter. For a more precise analysis of the whereabouts of the particle material inside filters, multi-layer filters can be used. Their filter layers can be examined individually via gravimetric analysis. Based on differential pressure curves, this work shows that knowledge gained with multi-layer surface filters can be transferred to single-layer surface filters. With multi-layer filters, it was confirmed that continuous long-term exposure of salt-loaded surface filters to water droplets leads to the penetration of solution, and thus of salt, through the entire depth of the filter medium to the clean gas side. However, following the drying after drainage, salt remains in the filter medium mainly on the upstream side and not inside the filter medium. In contrast, during further experiments with salt-loaded multi-layer filters and shorter exposure to water droplets where drying is initiated before the setting in of drainage, substantial amounts of salt, which was previously forming the filter cake, remain inside the filter medium. In the case of intermittent exposure, i.e., medium-term exposure without drainage, followed by long-term exposure with drainage after drying, salt remains in the filter medium on the upstream side after final drying. Contrary to expectations, more salt is detected quantitatively on the upstream side after intermittent exposure and drying than after medium-term exposure and drying. It is known from previous research on the drying of saturated, porous structures that during drying, a salt solution is transported in the capillaries of the structure (here: filter medium) to the drying front, where the salt crystallizes. This effect also occurs in tests with different modes of operation during water exposure against the direction of flow during drying. For confirmation, tests were carried out with salt-loaded surface filters, long-term exposure and reversed flow direction during drying. The final salt distribution, therefore, does not allow any conclusions to be drawn about the mode of operation, intermittent or continuous, during the exposure to water droplets.

The wettability of filter media is a key factor influencing the operating behavior of coalescence filters in particular. A hydrophilic and a hydrophobic surface filter medium with the same structure were loaded with potassium sulfate and long-term exposed to water droplets. A comparison shows that the wettability of the filter medium has a significant influence on the operating behavior of the filter when it is exposed to water droplets. In contrast to the salt-loaded hydrophobic filter medium, a salt-loaded hydrophilic filter medium shows a pronounced increase in the form of a jump in the differential pressure, which can be described with the jump-and-channel model. Furthermore, drainage occurs on the downstream side exclusively and, after final drying, a majority of the salt load remains in the filter medium. The differential pressure of the salt-loaded hydrophobic filter medium shows an increase in the differential pressure that cannot be described using the jump-and-channel model. After the differential pressure has increased, drainage on the downstream side of the hydrophobic filter sets in, whereupon the differential pressure drops and reaches a value far above the initial differential pressure of the originally unloaded filter. The upstream and downstream sides of the filters were observed during the experiments. During exposure of the hydrophobic filter to water droplets, drainage on the upstream side sets in. Additionally, in contrast to the hydrophilic

filter medium, there is no visible even soaking of the downstream side, but rather individual droplets that mark the ends of liquid channels in the filter medium. The hydrophobic filter no longer contains any salt after it has been exposed to water. The majority of the initially deposited salt remains in the drainage on the upstream side. The amount of salt that penetrates the filter medium to the clean gas side in the case of hydrophobic and hydrophilic filters is comparable in terms of mass for the same exposure time from the start of downstream drainage. Penetration of liquid through the hydrophobic filter medium only occurs if the filter is at least partially loaded with soluble particles. Observations of individual drops on unloaded and loaded hydrophobic filter media confirm that the salt reduces the water-repellent property of the hydrophobic filter media. Previous research on water-repellent properties states, that condensation on water-repellent surfaces leads to the penetration of water into the interstices of the surface structure and thus to the wettability of the surface. Transferring this knowledge to the described observations, it is concluded that the salt, which is deposited in the interstices on the upstream side of the hydrophobic filter medium, enables liquid to penetrate the filter medium due to the formation of a solution upon exposure to water droplets.

Experiments with three-layer hydrophilic depth filters were carried out analogously to the investigations of surface filters. They were loaded with potassium sulfate, exposed to water droplets, and dried with an air stream at a medium-typical flow velocity. The investigation shows that also for depth filters, long-term exposure to water droplets leads to the penetration of solution and the presence of salt in the downstream drainage. Due to structural changes in the particle deposits in the filter when exposed to water droplets, there is a decrease in differential pressure and a following slow increase in the differential pressure with continued water exposure, as was described for short-term exposure of surface filters. Photos of the downstream side show that during the exposure to water droplets, even before a downstream drainage sets in, internal drainage leads to the accumulation of water at the bottom of the coarse-pored filter medium. There is no film formation on the filter medium, neither on the upstream side nor on the downstream side. Furthermore, the influence of the direction of flow during drying on the whereabouts of the salt in the filter is greatly reduced for the depth filter compared to a hydrophilic surface filter and the salt does not predominantly crystallize out on the upstream side after drying, but is distributed throughout the depth of the medium.

In this work, within the framework of three questions, it was possible to show for the first time the influence water droplets in the gas stream have on the operating behavior of gas-cleaning filters on which water-soluble and insoluble particles are deposited. When filters carrying particle load are exposed to water droplets, the particle material is rearranged and, if soluble, dissolved. This leads to the characteristic decrease in differential pressure. If the exposure to water droplets is continued after the initial decrease, the differential pressure increases as the solution penetrates within the solution into the filter medium or through the filter medium. Using the example of hydrophilic surface filters, it was shown that the fractional separation efficiency of filters that are loaded with soluble and / or insoluble particles decreases due to exposure to water droplets and subsequent drying. Furthermore, the influence of the exposure of loaded filters to water droplets

on the operational behavior and the penetration of the deposited soluble material depends on the wettability and the basic structural composition of the filter medium. In the case of hydrophobic surface filters, drainage also occurs on the upstream side, and internal drainage was observed during the exposure of coarse-pored depth filters.

This work contributes to the fundamental understanding of the filtration of particles in a salty environment with exposure to water. These findings add to the understanding of the operating behavior of filters under field operating conditions and can with further investigation serve to optimize filter applications in salty weather with high water content.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Zusammenfassung	iii
Summary	ix
Inhaltsverzeichnis	xvii
Abkürzungen und Symbole	xix
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand des Wissens	3
2.1 Abscheidung fester Partikeln aus Gasen mittels Filtern	4
2.1.1 Abscheidemechanismen, Fraktionsabscheidegrad, Differenzdruck	4
2.1.2 Lösliche Partikeln und Feuchte	7
2.2 Abscheidung von Tropfen aus Gasen mittels Filtern	10
2.2.1 Differenzdruck beschrieben durch das Kanal-Film-Modell	10
2.2.2 Tropfen und feste Partikeln	13
2.3 Lösung von Salzen	14
2.4 Kristallisation löslicher Komponenten in porösen Systemen	14
3 Zielsetzung, Konzeption und Aufbau der Arbeit	17
4 Materialien und Methoden	23
4.1 Materialien	23
4.1.1 Partikelmaterial	23
4.1.2 Filtermedien	25
4.2 Anlage zur Kurzzeitbeaufschlagung	27
4.2.1 Salzaerosolerzeugung	27
4.2.2 Wassereintrag	29
4.2.3 Verdunsten von Wassertropfen	30
4.2.4 Filterkammer	31
4.3 Anlage zur Langzeitbeaufschlagung	31
4.3.1 Salz- und Glasaerosolerzeugung	32
4.3.2 Wassereintrag	33
4.3.3 Filterkammer und Filterhalterungen	34
4.3.4 Optische Beobachtung der Filteranström- und -abströmseite im Betrieb	36

4.4	Versuchsdurchführung	37
4.4.1	Vorbereitung	38
4.4.2	Partikelbeladung	38
4.4.3	Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit oder Wassertropfen	39
4.4.4	Trocknung	40
4.4.5	Nachbereitung	40
4.5	Charakterisierung von Filtern und Filtermedien	41
4.5.1	REM, EDX und μ -CT	41
4.5.2	Fraktionsabscheidegradmessungen	42
5	Kurzzeitbeaufschlagung von Filterkuchen aus Salz mit Wasser im gasförmigen und flüssigen Zustand - Umlagerung	45
5.1	Einfluss der Wassermenge auf Differenzdruckverlauf und Salzverbleib	46
5.2	Einfluss der Salzart auf Differenzdruckverlauf und Salzverbleib	53
5.3	Zusammenfassung	59
6	Langzeitbeaufschlagung von Filterkuchen aus Salz mit Wassertropfen in gesättigter Luft - Penetration	61
6.1	Penetration von Salz auf die Reingasseite	61
6.2	Einfluss von unlöslichem Partikelmaterial im Filterkuchen auf die Penetration von Salz	69
6.2.1	Differenzdruckverläufe, Partikelmaterialverbleib und Fraktionsabscheidegrade	69
6.2.2	Theoretische Betrachtungen zum Zeitpunkt der Filmbildung	76
6.3	Kristallisation von Salz im Filtermedium	80
6.3.1	Prüfung der Anwendbarkeit eines mehrlagigen Filteraufbaus	81
6.3.2	Differenzdruckverläufe und Salzverbleib in Abhängigkeit der Betriebsweise während der Beaufschlagung mit Wassertropfen	83
6.3.3	Einfluss des Trocknungsprozesses auf die Salzverteilung im Filter	87
6.4	Zusammenfassung	90
7	Einfluss der Benetzbarkeit des Filtermediums auf die Penetration	93
7.1	Langzeitbeaufschlagung: Vergleich eines hydrophoben mit einem hydrophilen, salzbeladenen Oberflächenfiltermedium	95
7.2	Einfluss der Löslichkeit der Filterkuchenbestandteile auf die Benetzbarkeit eines hydrophoben Oberflächenfiltermediums	103
7.3	Zusammenfassung	108
8	Prüfung der Übertragbarkeit bisheriger Erkenntnisse auf grobporige Medienstrukturen	111
8.1	Theoretischer Vergleich von Tiefenfiltern mit Oberflächenfiltern: Abgeleitete Hypothesen	112
8.2	Langzeitbeaufschlagung von salzbeladenen Tiefenfiltern mit Wassertropfen	113
8.2.1	Differenzdruckverläufe	113
8.2.2	Gravimetrische und optische Analysen	115
8.3	Zusammenfassung	119

9 Schlussfolgerungen und Ausblick	121
9.1 Schlussfolgerungen	121
9.2 Ausblick	124
Abbildungsverzeichnis	125
Tabellenverzeichnis	131
Literaturverzeichnis	133

Abkürzungen und Symbole

Chemische Stoffe

CF₄	Tetrafluormethan
C₃F₆	Hexafluorpropen
H₂O	Wasser
KCl	Kaliumchlorid
K₂SO₄	Kaliumsulfat
MgSO₄	Magnesiumsulfat
NaCl	Natriumchlorid
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PES	Polyester
PET	Polyethylenterephthalat
SiO₂	Siliciumoxid

Lateinische Buchstaben

A	Fläche
C	Konzentration
D	Diffusionskoeffizient
d	Porendurchmesser
DRH	Deliqueszenzfeuchte, engl. deliquescence relative humidity
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie, engl. energy dispersive X-ray spectroscopy
ERH	Effloreszenzfeuchte, engl. efflorescence relative humidity
f	Wasserbeladung der Luft

L	Länge
LSM	Laser-Scanning-Mikroskop
m	Masse
MI	Feuchteanzeige, engl. moisture indicator
MPPS	Partikelgröße, bei der eine Partikel die kleinste Abscheidewahrscheinlichkeit hat und der kleinste Anteil eines Partikelkollektivs abgeschieden wird, engl. most penetrating particle size
n	Anzahl
OPC	Optical Particle Counter
PDC	Differenzdruckregler, engl. pressure-diff.-controller
PDI	Differenzdruckanzeige, engl. pressure-diff.-indicator
PGV	Partikelgrößenverteilung
Q	kumulative Verteilung
REM	Rasterelektronenmikroskop
RH	relative Luftfeuchtigkeit, engl. relative humidity
RHI	Feuchteanzeige, engl. relative humidity indicator
S	Sättigung
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
t	Zeit
TI	Temperaturanzeige, engl. temp. indicator
u	Anströmgeschwindigkeit
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
x	Partikeldurchmesser bzw. Äquivalentdurchmesser der Partikelgröße

Indizes

0	Zum Zeitpunkt $t = 0$, Anfangs-
4	Abhängigkeit von d^4
i	integer

Ende	Ende des Prozessschrittes z.B. der Beaufschlagung mit Wassertropfen
Fest	Feststoff
Fl.	Flüssigkeit
G	gesamt
H	Hohlraum
k	kritisch
L	Luft
max	maximal
Rohgas	Rohgas
Reingas	Reingas
Start	Start des Prozessschrittes z.B. der Beaufschlagung mit Wassertropfen
W	Wasser
WT	Wassertropfen bzw. für Tropfenbildung zur Verfügung stehendes Wasser

Griechische Buchstaben

Δp	Differenzdruck
Δt	Zeitraum, Dauer
ϵ	Porosität
μ	Viskosität
μ-CT	3D-Analyse mittels Röntgen-Mikrotomographie, engl. micro-computed tomography
ρ	Dichte

1 Einleitung und Motivation

Für eine optimale Auslegung und den Betrieb von Filtern zur Abscheidung von Partikeln aus Gasströmen ist ein fundiertes Verständnis des Betriebsverhaltens der Filter unter Realbedingungen im Anwendungsprozess Voraussetzung. Die Evaluierung von Filtermedien und -elementen erfolgt aktuell typischerweise anhand von Labortests zur Nachstellung von Beladungsprozessen im realen Betrieb, wie beispielsweise in Normen beschrieben [1, 2, 3], mit synthetischem, nicht-hygrokopischem Prüfstaub bei konstanter, geringer Wassermenge im System, angegeben in Form von relativer Luftfeuchtigkeit, engl. relative humidity, RH (rel. Luftfeuchtigkeit). Diese Bedingungen spiegeln allerdings oft nicht den Realbetrieb wider, da sie einige der wichtigsten realen Einflussfaktoren auf das Betriebsverhalten von Filtern, wie beispielsweise Schwankungen in der rel. Luftfeuchtigkeit, die Löslichkeit von Partikeln und den Wassergehalt, beispielsweise durch Anwesenheit von Wassertropfen unberücksichtigt lassen. Lösliche Partikeln, wie Salze, kommen als natürlicher Bestandteil der Atmosphäre in Filtrationsprozessen vor, vornehmlich bei der Reinigung von Zuluft mechanischer Anlagen. Ein entscheidender Faktor für das Betriebsverhalten von Filtern, die mit salzhaltigen Partikeln beladen sind, ist die Anwesenheit von Wasser in der Umgebungsluft, insbesondere dann, wenn es beispielsweise durch Sprühregen oder Kondensation zu spontanen Änderungen der Betriebsbedingungen kommt. Die löslichen Partikeln können sich durch Aufnahme von Wasser aus ihrer Umgebungsluft bei hohem gasförmigem Wasseranteil in ihrer Umgebung sowie direkten Kontakt mit flüssigem Wasser lösen und auf diese Weise mobilisiert werden. Bisher ist nicht bekannt, ob es dadurch zu Penetration tiefer in Filter oder durch Filter hindurch von Lösung und damit von löslichen Komponenten kommen kann. So könnten Wassertropfen, die vorübergehend aufgrund von Nebel, Sprühregen, Kondensation oder weiteren Witterungsbedingungen (typische Beispiele für unregelmäßige Ereignisse) in Filtersystemen vorhanden sind, maßgebliche Auswirkungen auf das Betriebsverhalten der Filter haben. Sowohl erhöhte rel. Luftfeuchtigkeit als auch Wassertropfen in Gegenwart von salzhaltigen Aerosolen wurden in der Vergangenheit beispielsweise bei der Reinigung der Ansaugluft von Turbinen mit ineffizienter Filtration und Systemausfällen in Verbindung gebracht (z.B. [4, 5]).

Ziel dieser Arbeit ist es, aufzuklären, wie sich eine Beaufschlagung mit Wasser insbesondere in Form von Wassertropfen auf bereits mittels Filter abgeschiedenes, lösliches Partikelmaterial auswirkt und ob, bzw. unter welchen Bedingungen es in diesem Rahmen zum Transport des abgeschiedenen Partikelmaterials in Form von Umlagerungen oder Penetration durch den Filter kommt. Ferner ist zu untersuchen, wie sich die Wasserbeaufschlagung auf das Betriebsverhalten eines mit

löslichen Partikeln beladenen Filters auswirkt. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf Untersuchungen zum Einfluss der Wasserbeaufschlagung und dem damit verbundenen Materialtransport in Form von Umlagerungen und Penetration auf den Differenzdruckverlauf sowie auf den Fraktionsabscheidegrad. Für eine umfangreiche Betrachtung ist dieser Einfluss in Abhängigkeit von der Benetzbarkeit und dem strukturellen Aufbau der Filtermedien gesondert untersucht worden. Bei filternden Abscheidern in der Gasreinigung wird zwischen Oberflächen- und Tiefenfiltern unterschieden. In dieser Arbeit werden die grundlegenden Vorgänge der Partikelbeladung und Penetration von zuvor abgeschiedenem Material, die für Oberflächen- und Tiefenfilter gleichermaßen bedeutsam sind, behandelt. Die Identifikation eines charakteristischen Differenzdruckverlaufs ist für die Anwendung von filternden Abscheidern relevant, um ggf. instationäre Betriebsbedingungen auf den Einfluss von Wassertropfen zurückzuführen, im Betrieb zu erkennen und richtig zu deuten. Ziel ist es, einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis des Verhaltens filternder Abscheider unter Realbedingungen zu leisten und damit zur Optimierung einer anwendungsbezogenen, wirtschaftlichen und effizienten Auslegung von Filtern und deren Betrieb beizutragen.

2 Stand des Wissens

Die Untersuchungen zum Einfluss von Wasserbeaufschlagung auf Filter mit abgeschiedenen löslichen Partikeln (Salzen) setzen Kenntnisse über eine Reihe von Prozessen voraus:

- Abscheidung von Partikeln (fest und flüssig)
- Lösung von löslichen Partikeln
- Transport von Flüssigkeit im Filtermedium
- Kristallisation

Diese Effekte wurden in der Vergangenheit in der Regel isoliert in separaten Forschungsgebieten behandelt:

- als trockene Staubfiltration und Staubfiltration mit löslichen Partikeln und erhöhtem Wassergehalt in Form von Feuchte (siehe Kapitel 2.1)
- als Abscheidung von flüssiger, disperser Phase (siehe Kapitel 2.2)
- als Löslichkeit von Salzen unter reaktionstechnischen Gesichtspunkten in der Chemie unabhängig von eventuellen Filtrationseffekten (siehe Kapitel 2.3)
- als Kristallisation in porösen Systemen unabhängig von eventuellen Filtrationseffekten (siehe Kapitel 2.4)

Eine Einordnung der hier präsentierten Arbeit in den relevanten Literaturkontext der Filtration findet sich in Abbildung 2.1. Dabei ist bei der Art des verwendeten Staubes - falls vorhanden - zwischen unlöslichen und löslichen Partikeln und bei der Beaufschlagung des Filters mit Aerosol mit flüssiger disperser Phase zwischen diskontinuierlicher Zugabe und kontinuierlicher Zugabe unterschieden worden. Eine zusätzliche Einordnung zur Art der untersuchten Filtertypen findet an dieser Stelle nicht statt, da grundlegende Vorgänge beschrieben sind, die für Oberflächen- und Tiefenfilter sowie auch Querstrom- und Koaleszenzfilter gleichermaßen gelten. Nur in Einzelfällen, die speziell hervorgehoben sind, wird auf die Regeneration von Oberflächenfiltern eingegangen.

Die relevanten Forschungsbereiche und -beiträge sind im Folgenden erläutert.

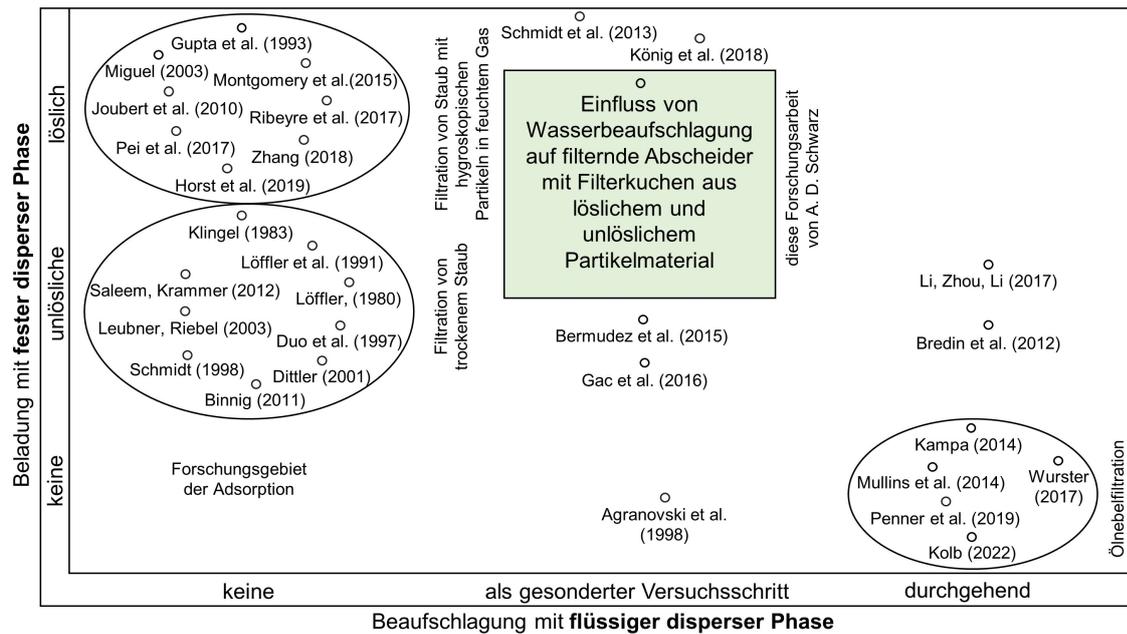


Abbildung 2.1: Übersicht bisheriger Arbeiten mit ausgewählten Publikationen und Einordnung dieser Arbeit.

2.1 Abscheidung fester Partikeln aus Gasen mittels Filtern

Filternde Abscheider von Feststoffpartikeln aus Gasströmen sind poröse Strukturen mit Kollektoren (hier Fasern), die von einem Aerosol durchströmt werden. Nachdem die ersten Partikeln an einzelnen Fasern abgeschieden sind, können nachfolgende Partikeln an den bereits am Filtermaterial haftenden Partikeln abgeschieden werden, wodurch sich kettenförmige, verzweigte Partikelstrukturen, sogenannte Dentriten, oder kompakte Partikelstrukturen bilden. Mit zunehmender Staubbelastung füllen sich die Zwischenräume zwischen den Fasern, Brückenbildung tritt auf und es bildet sich eine geschlossene Partikelschicht auf der Anströmseite des Filters. Diese Clogging-Phase endet mit einem vollständig ausgebildeten Filterkuchen, welcher anschließend hauptsächlich zur Partikelabscheidung beiträgt. Unterschiedliche Filtertypen nutzen unterschiedliche Beladungsstadien bei der Abscheidung, so beispielsweise Tiefenfilter die Abscheidung im Inneren des Filtermediums und Oberflächenfilter die Kuchenfiltration.

2.1.1 Abscheidemechanismen, Fraktionsabscheidegrad, Differenzdruck

Die Abscheidemechanismen in einem unbeladenen Filtermedium können zunächst durch Betrachtung einer einzelnen Faser beschrieben werden. Beim Einsatz von filternden Abscheidern zur Abscheidung von Feststoffpartikeln aus Gasströmen lagern sich die Partikeln durch folgende Abscheidemechanismen ab [6, 7]:

- Diffusion
- Impaktion / Trägheitsabscheidung

- Sperreffekt
- Elektrostatik

Ohne elektrische Ladungen dominiert bei geringer Strömungsgeschwindigkeit und kleinen Partikelgrößen die Abscheidung durch Diffusion. Dabei bewegt sich die Partikel durch Zusammenstöße mit Gasmolekülen auf einer zufälligen Bahn im Raum und kann so auf die Faser treffen. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit und Partikelmasse dominiert die Trägheitsabscheidung oder Impaktion. Die Partikel folgt der Stromlinie nicht um die Faser herum, sondern bleibt aufgrund von Trägheit auf ihrer ursprünglichen Bahn und trifft so auf die Faser. Eine Partikel kann auch aufgrund ihrer geometrischen Ausdehnung bzw. durch ein großes Verhältnis zwischen Partikelgröße und Faserdurchmesser mit der Faser kollidieren, auch wenn sie einer Stromlinie um die Faser, bis zur Kollision, optimal folgt. Dies wird als Sperreffekt bezeichnet. Sind Faser und / oder Partikeln elektrisch geladen, können anziehende elektrostatische Kräfte auftreten, die zur Abscheidung führen können. Feldkräfte in magnetischen Feldern zur Abscheidung magnetischer Partikeln sind für diese Arbeit nicht relevant.

In der Regel tritt eine Überlagerung der Abscheidemechanismen auf. Mit hoher kinetischer Energie der Partikel kann es zum Abprallen von der Faser kommen.

Für die Bewertung der Abscheidung eines Filters und des Gesamtwiderstands muss über alle Fasern des Mediums integriert werden, um eine Bewertung des gesamten Filtermediums zu erlauben.

Der Fraktionsabscheidegrad ist das Verhältnis der Partikelkonzentration C des abzutrennenden Stoffes, die mittels Filter abgeschieden wurde, zu der Partikelkonzentration im Rohgas, welcher der Filter ausgesetzt wurde, für eine bestimmte Partikelgröße x :

$$\text{Fraktionsabscheidegrad} = \frac{C_{\text{Rohgas}}(x) - C_{\text{Reingas}}(x)}{C_{\text{Rohgas}}(x)} \quad (2.1)$$

Die Partikelgrößenabhängigkeit der Abscheidemechanismen spiegelt sich deutlich im Verlauf des Fraktionsabscheidegrads wider (siehe Abbildung 2.2).

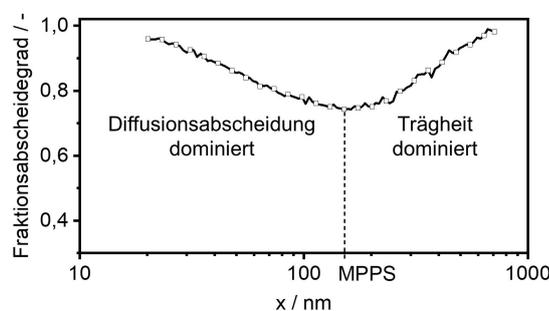


Abbildung 2.2: Exemplarischer Fraktionsabscheidegrad eines filternden Abscheiders mit diffusionsdominierter Abscheidung unterhalb der MPPS und impaktionsdominierter Abscheidung oberhalb der MPPS (Oberflächenfiltermedium mit Kaliumsulfat bei 3,5 cm/s in der Tiefenfiltrationsphase vermessen).

Der linke Ast der Kurve ist von der Diffusion dominiert und führt mit kleiner werdender Partikelgröße zu höherer Abscheidung. Der rechte Ast der Fraktionsabscheidegradkurve zeigt den durch Trägheit und Impaktion dominierten Teil, der mit größer werdenden Partikeln zunimmt. Dies führt zu einem Minimum zwischen den Ästen, welches die Partikelgröße, bei der eine Partikel die kleinste Abscheidewahrscheinlichkeit hat und der kleinste Anteil eines Partikelkollektivs abgeschieden wird, engl. most penetrating particle size (MPPS) markiert.

Der Unterschied zwischen Abscheidung im Inneren des Filters (Tiefenfiltration) und im Filterkuchen bzw. auf der Oberfläche des Filters (Oberflächenfiltration) spiegelt sich auch im Differenzdruckverlauf wider (siehe Abbildung 2.3).

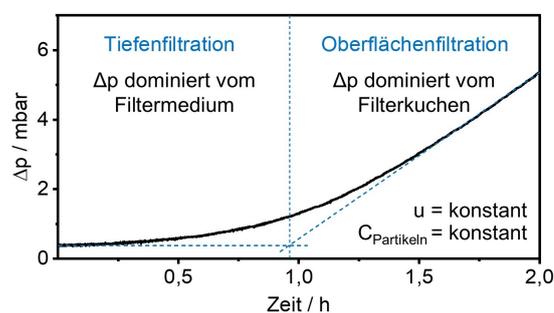


Abbildung 2.3: Exemplarischer Differenzdruckverlauf eines Oberflächenfilters während der Beladung bei konstanter Anströmgeschwindigkeit und konstanter Konzentration mit schnellem Erreichen des linearen Differenzdruckanstieges, der die Kuchenfiltration markiert.

Wie in Abbildung 2.3 gezeigt, lässt sich der Differenzdruckverlauf in zwei Bereiche unterteilen. Anfänglich werden die Partikeln im Inneren der Filterporen abgeschieden, wodurch der Differenzdruck vom Filtermedium selbst dominiert wird (Filtermediumwiderstand). Der darauffolgende lineare Anstieg des Differenzdrucks markiert die Kuchenfiltration und damit die Abscheidung in wesentlich feineren Poren im Filterkuchen, durch die der Differenzdruck schneller steigt (Filterkuchenwiderstand). Dazwischen liegt die Clogging-Phase, in welcher der Filterkuchen noch nicht vollständig ausgebildet ist. Im Gegensatz zur Partikelabscheidung im Inneren der porösen Filterstruktur bei Tiefenfiltern findet die Partikelabscheidung in der Oberflächenfiltration vorwiegend an der Oberfläche des Filtermediums durch den Filterkuchen statt. Mit zunehmender Filterkuchenhöhe erhöht sich der Abscheidegrad, allerdings steigt als unerwünschter Nebeneffekt auch der Differenzdruck über dem Filter an. Bei Oberflächenfiltern erfolgt daher bei einem vorbestimmten maximalen Differenzdruck die Regeneration des Filters durch Entfernen des Filterkuchens und ein neuer Filtrationszyklus beginnt [8].

Wie aus Abbildung 2.1 hervorgeht, stand bislang überwiegend die Trennung fester, unlöslicher Partikeln aus trockenen Gasströmen im Fokus veröffentlichter Untersuchungen. Die Grundlagen der Staubabscheidung (z.B. [8, 9, 10, 11, 12]) sowie das Regenerierungsverhalten von Oberflächenfiltern (z.B. [13, 14]), die Auswirkung unvollständiger Regenerierung ("patchy-cleaning") [15, 16, 17] und das Emmissionsverhalten (z.B. [18]) wurden für diesen Fall umfassend untersucht.

Darüber hinaus wird das Betriebsverhalten der Filter unter anderem stark von der Zusammensetzung des vorliegenden Aerosols selbst, einschließlich der Konzentration, Größe und chemischen Verbindungen vorliegender Partikeln und der rel. Luftfeuchtigkeit (gasförmiger Wassergehalt) sowie Anwesenheit von Wassertropfen (flüssiger Wassergehalt) beeinflusst. Im Folgenden sind Publikationen erörtert, die den Einfluss von rel. Luftfeuchtigkeit auf das Betriebsverhalten von Filtern überwiegend während der Partikelbeladung behandeln. Insbesondere zur Untersuchung des Einflusses von flüssigem Wasser in Form von Tropfen auf das Betriebsverhalten beladener Filter gibt es bislang keine Publikationen.

2.1.2 Lösliche Partikeln und Feuchte

Feuchte bezeichnet in dieser Arbeit ausschließlich den gasförmigen Wasseranteil in der Luft. Wasser im gasförmigen Zustand ist als Gewichtsanteil der Luft mit der absoluten Luftfeuchtigkeit zu beschreiben und als Gewichtsverhältnis des gasförmigen Wassergehalts zum maximalen gasförmigen Wassergehalt bei gegebener Temperatur und gegebenem Druck mit der relativen Luftfeuchtigkeit zu beschreiben. Flüssiges Wasser beispielsweise in Form von Tropfen in der Luft wird in dieser Arbeit explizit als solches beschrieben. Es wird zwischen einer Wasserbeaufschlagung mit erhöhtem gasförmigem Wassergehalt „Wasserbeaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit“, die immer einen Prozess ohne flüssiges Wasser kennzeichnet, und einer „Beaufschlagung mit Wassertropfen“, die einen Prozess mit flüssigen Wassertropfen, wobei auch gasförmiges Wasser vorhanden ist, unterschieden. Eine Beaufschlagung mit Wassertropfen ohne zusätzliches gasförmiges Wasser ist nicht möglich. Insbesondere Forschungsarbeiten zur Filtration mit löslichen Partikeln (siehe Gruppierung Abbildung 2.1) zeigen, dass die Anwesenheit von Wasser, gasförmig angegeben als rel. Luftfeuchtigkeit, die Haftkräfte zwischen Partikeln innerhalb des Filterkuchens und zwischen Filterkuchen und Filteroberfläche verändert und somit direkten Einfluss auf das Betriebsverhalten der Filter hat, insbesondere hinsichtlich der Abscheideleistung, der Entwicklung des Differenzdrucks und der Regenerierung (z.B. [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26]). Neben unlöslichen Partikeln sind auch lösliche Partikeln in vielen Aerosolen vertreten. Salzpartikeln kommen beispielsweise in der natürlichen Atmosphäre vor. In trockenen Gasströmen verhalten sie sich ebenso wie unlösliche Feststoffpartikeln. Ihre Eigenschaften, wie beispielsweise ihre Morphologie und Dichte, sind jedoch stark vom Wassergehalt in ihrer Umgebung abhängig, der gasförmig angegeben als rel. Luftfeuchtigkeit oder flüssig in Form feinsten Tropfen vorliegen und auf diese Weise das Betriebsverhalten eines Filters wesentlich verändern kann.

Für den Lösungsvorgang von Salz sind grundsätzlich zwei Mechanismen denkbar. Zum einen kann die Lösung durch direkten Kontakt mit flüssigem Wasser, wie beispielsweise bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (näheres dazu siehe Kapitel 2.3) entstehen, zum anderen kann die Wasseraufnahme von Salz aus feuchter Umgebungsluft zur Lösung führen. Dabei beschreibt der Begriff Deliquescenz den spontanen Phasenübergang von einer festen Partikel zu einem Tropfen wässriger Lösung bei einer spezifischen rel. Luftfeuchtigkeit, der sog. Deliquescenzfeuchte, engl. deliquescence relative

humidity (Deliqueszenzfeuchte), während Hygroskopie die grundsätzliche Eigenschaft eines Stoffes bezeichnet, Feuchtigkeit aus seiner Umgebung zu binden. Durch anschließende Trocknung der Luft kristallisiert das Salz spontan aus, sobald die rel. Luftfeuchtigkeit unter die Effloreszenzfeuchte, engl. efflorescence relative humidity (Effloreszenzfeuchte) sinkt. Die Effloreszenzfeuchte liegt in der Regel deutlich unterhalb der Deliqueszenzfeuchte. Tang et al. (z.B. [27, 28]) führten umfassende Untersuchungen zur Phasenumwandlung und Größenänderung hygroskopischer Partikeln in Aerosolen durch. Sie zeigten, dass die Partikelmasse bei Erhöhung der rel. Luftfeuchtigkeit zunächst konstant bleibt, bevor sie bei Erreichen der Deliqueszenzfeuchte durch Bildung eines gesättigten Lösungstropfens sprunghaft ansteigt. Der Tropfen vergrößert sich bei steigender rel. Luftfeuchtigkeit kontinuierlich. Bei anschließender Senkung der rel. Luftfeuchtigkeit nimmt die Tropfenmasse durch Verdunstung ab, jedoch findet bei Unterschreiten der Deliqueszenzfeuchte zunächst kein Phasenübergang statt, sondern die Partikel verbleibt als übersättigter metastabiler Lösungstropfen existent. Erst bei weiterer Senkung der rel. Luftfeuchtigkeit und Erreichen der Effloreszenzfeuchte kristallisiert der Feststoff spontan. Die Partikeln zeigen bei der Wasseraufnahme und -abgabe also ein Hystereseverhalten.

Untersuchungen des Einflusses von rel. Luftfeuchtigkeit auf das Betriebsverhalten von Filtern während der Beladung mit Salzpartikeln ergaben insgesamt, dass eine höhere rel. Luftfeuchtigkeit unterhalb der Deliqueszenzfeuchte während der Beladung zu einem langsameren Differenzdruckanstieg während der Beladung und höherer Staubspeicherkapazität führt [19, 20, 21, 23, 24, 29, 30]. Dabei wurden die Versuche mit verschiedenen Salzen und Filtern durchgeführt. Die Filterstruktur ist im Hinblick auf dieses Verhalten kein wesentlicher Einflussfaktor. Für den geringeren Differenzdruckanstieg bei hoher rel. Luftfeuchtigkeit während der Beladung sind in der Literatur verschiedene Erklärungsansätze zu finden. Es wurde vermutet, dass bei höherer rel. Luftfeuchtigkeit größere interpartikuläre Haftkräfte zum Haften an abgeschiedenen Partikeln als am Filtermedium führen und damit ein offener Filterkuchen entsteht [19, 20], oder dass die Absorption von Wasser aus der Umgebungsluft zum Umformen der Partikeln führt [23, 29]. Pei et al. [24, 30] erläutern, dass bei erhöhter rel. Luftfeuchtigkeit die Bildung von Dendriten durch Kapillarkondensation behindert wird. Da Wasser in Kapillaren von Poren schon bei Temperaturen weit unter dem Taupunkt der Umgebungsluft kondensiert [31], und das Wasser die Partikel- und Dendritenstruktur beeinflusst, was den Widerstand der Partikelstruktur reduzieren kann, erscheint dieser Erklärungsansatz am sinnvollsten. Dies spiegelt sich auch in Beobachtungen der Umstrukturierungen und des Morphologiewandels von Salzdendriten auf Filtern wider [19, 21, 23, 29]. Auch diese Beobachtungen konnte mit einer Reihe von verschiedenen Filtermedieneigenschaften bestätigt werden, sodass diese nicht die zentralen Einflussfaktoren dieser Studien sind. Für rel. Luftfeuchtigkeit oberhalb der Deliqueszenzfeuchte bei der Beladung wurde ein nicht-linearer Anstieg des Differenzdrucks beobachtet [19, 20, 23], was sich mit Beobachtungen aus der Filtration von Aerosolen mit flüssiger disperser Phase deckt (siehe Kapitel 2.2). Pei et al. [25] untersuchten auch den Einfluss der Temperatur während der Beladung mit Salzpartikeln und fanden heraus, dass die Temperatur im Gegensatz zur rel. Luftfeuchtigkeit keinen wesentlichen Einfluss auf das Beladungsverhalten von Filtern hat.

Im Gegensatz zu löslichen Partikeln tritt bei hoher rel. Luftfeuchtigkeit bei der Beladung mit nicht-hygroscopischen Partikeln, wie beispielsweise Aluminiumoxid, keine Änderung im Differenzdruckverlauf auf [19, 21, 29]. Bei Rußpartikeln ist allerdings das Kollabieren von Dendriten aufgrund von Kapillarkondensation beobachtet worden. Montgomery et al. [29] vermuten, dass dieser Unterschied auf die Partikelgröße zurückzuführen ist. Die Rußpartikeln waren mit 10 nm um das 10-fache kleiner als die Aluminiumoxidpartikel, was aufgrund der Kontaktwinkel Kapillarkondensation ermöglicht [31]. Ribeyre et al. [32] beobachteten auch eine Umstrukturierung von verschiedenen Dendriten aus nicht-hygroscopischen Nanopartikeln schon bei rel. Luftfeuchtigkeit unter 50 % und durch Kapillarkondensation bei rel. Luftfeuchtigkeit über 70 %.

Der Einfluss der rel. Luftfeuchtigkeit auf bereits beladene Filter ist weit weniger erforscht. Während erhöhte rel. Luftfeuchtigkeit auf Filter mit nicht-hygroscopischer Partikelbeladung keinen Einfluss zu haben scheint [22], zeigen salzbeladene Filter einen irreversiblen Abfall des Differenzdrucks [22, 33], [34]. Dabei führt ein größerer Feuchteunterschied zwischen Beladungsphase und anschließender Beaufschlagungsphase zu einer längeren Stabilisierungsdauer des Differenzdrucks nach Abfall [22]. Es benötigt somit mehr Zeit, bis der Differenzdruck nach Feuchteänderung konstant bleibt. König et al. [34] zeigen zudem, dass die Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit von trockenen salzbeladenen Tiefenfiltern zu einem reduzierten Fraktionsabscheidegrad in allen Größenklassen führt. Allerdings wurden keine Erklärungsansätze geliefert. Zudem ist nicht klar, ob es sich um ursprünglich entladene Filter handelt. Durch die verbesserte Leitfähigkeit der Luft bei erhöhter rel. Luftfeuchtigkeit werden Filter entladen, was nach anschließender Trocknung zu schlechterem Fraktionsabscheidegrad führt. Daher ist der Einfluss von rel. Luftfeuchtigkeit auf die Filtrationseffizienz nur mit vollständig entladenen Filtermedien oder definierter Ladungsmenge sinnvoll zu bewerten.

Zhang [35] nutzte diese bisherigen Erkenntnisse erstmals für eine gezielte Rohgaskonditionierung mit Salzpartikeln. In ersten Versuchen wurde gezeigt, dass die Regenerierung von Filtern mit einem Salzanteil im Filterkuchen nach feuchteinduzierter Deliqueszenz und Effloreszenz effizienter verläuft als bei vergleichbaren Filtern ohne Salzanteil im Filterkuchen. Horst et al. [36] führten diese Untersuchungen fort. Ein Vergleich von Filterkuchen aus Kalkstein mit und ohne Salzanteil, die mit rel. Luftfeuchtigkeit über der Deliqueszenzfeuchte beaufschlagt wurden, ergab, dass der Filterkuchen mit Salzanteil nach Deliqueszenz und Effloreszenz stärkere Partikelkohäsion im Filterkuchen und größere Kuchenfragmente aufwies, was vorteilhaft für eine optimierte Regenerierung des Filters war. Außerdem sank der Differenzdruckverlauf eines mit Kalkstein und Natriumchlorid (NaCl) beladenen Filters exponentiell während der Beaufschlagung mit 80 % rel. Luftfeuchtigkeit aufgrund von größer werdenden Poren im Filterkuchen, verursacht durch das Auftreten von Flüssigkeitsbrücken und damit einhergehenden lokalen Umlagerungen. Feuchtigkeitbeaufschlagung oberhalb der Deliqueszenzfeuchte von Filterkuchen, die überwiegend aus nicht hygroscopischen Kalksteinpartikeln mit zugesetzten Anteilen an submikronen NaCl-Partikeln bestehen, können so durch induzierte Deliqueszenz und anschließender Kristallisation der Salzpartikeln im Filterkuchen das

Betriebsverhalten und die Regeneration von Oberflächenfiltern erheblich beeinflussen und die Kuchenabscheidung verbessern [26].

2.2 Abscheidung von Tropfen aus Gasen mittels Filtern

Die Abscheidung von Tropfen an unbeladenen Fasern folgt zunächst denselben Mechanismen, wie aus der Staubfiltration bekannt. Es kann davon ausgegangen werden, dass alle am Filter auftreffenden Tropfen haften bleiben, da Abprallen hier vernachlässigbar ist [37, 38]. Nach der Abscheidung sind sie jedoch im Gegensatz zu festen Partikeln nicht stationär, sondern werden in Strömungsrichtung oder Schwerkraftrichtung entlang der Fasern bewegt. Dabei bilden sie keine porösen Ablagerungsstrukturen, sondern können mit anderen Tropfen koaleszieren, Flüssigkeitsbrücken formen, Filme zwischen den Fasern bilden oder sogar vollständig gesättigte Teilbereiche im Inneren des Mediums ausfüllen.

Agranovski et al. [39, 40] zeigten durch Beaufschlagung von hydrophilen und hydrophoben Filtern mit Wassertropfen, dass die Benetzbarkeit des Filtermediums die Verteilung von Gas und Wasser im Medium stark beeinflusst. Das an den Fasern abgeschiedene Wasser bildet einen Flüssigkeitsfilm auf hydrophilen Fasern und Tropfen auf hydrophoben Fasern.

Die Benetzbarkeit des Filtermediums bestimmt die Flüssigkeitsverteilung in Koaleszenzfiltern wesentlich und wird daher auch in dieser Arbeit als getrennte Einflussgröße betrachtet. Die Benetzbarkeit hängt dabei nicht nur vom Material des Filtermediums ab, sondern im Wesentlichen auch von dessen Struktur. Daher ist eine Betrachtung des Kontaktwinkels, der für strukturierte Filter prinzipiell analog zu ebenen Flächen bestimmt werden kann, für die Benetzbarkeit von textilen Medien nicht aussagekräftig genug [41, 42]. Während es für die Benetzbarkeit mit Öl alternative Verfahren (z.B. nach DIN EN ISO 14419 [43]) gibt, sind keine aussagekräftigeren Verfahren für die Quantifizierung der Benetzbarkeit mit Wasser bekannt.

Wie in Abbildung 2.1 herausgearbeitet, leisten Arbeiten der Ölnebelfiltration einen besonders großen Beitrag zum Wissen über das Verhalten von Filtern bei Beaufschlagung mit Aerosolen mit flüssiger disperser Phase in Filtern. Hier bestätigten auch Mullins et al. [44] die Wichtigkeit der Benetzbarkeit und Struktur der Filtermedien, die die Penetration des Öls durch das Filtermedium vorgeben. Eine besonders detaillierte Beschreibung und Erklärung für das Betriebsverhalten von Filtermedien bei der Beaufschlagung mit Tropfen liefert in diesem Zusammenhang das Kanal-Film-Modell.

2.2.1 Differenzdruck beschrieben durch das Kanal-Film-Modell

Das für Ölnebelfilter entwickelte semiquantitative, mechanistische Kanal-Film-Modell [45, 46, 47] stellt eine Verbindung zwischen ablaufenden Transportphänomenen während der Filtration und dem

Differenzdruckverlauf der Filter her. Es unterscheidet zwischen benetzbaren und unbenetzbaren Filtern (siehe Abbildung 2.4).

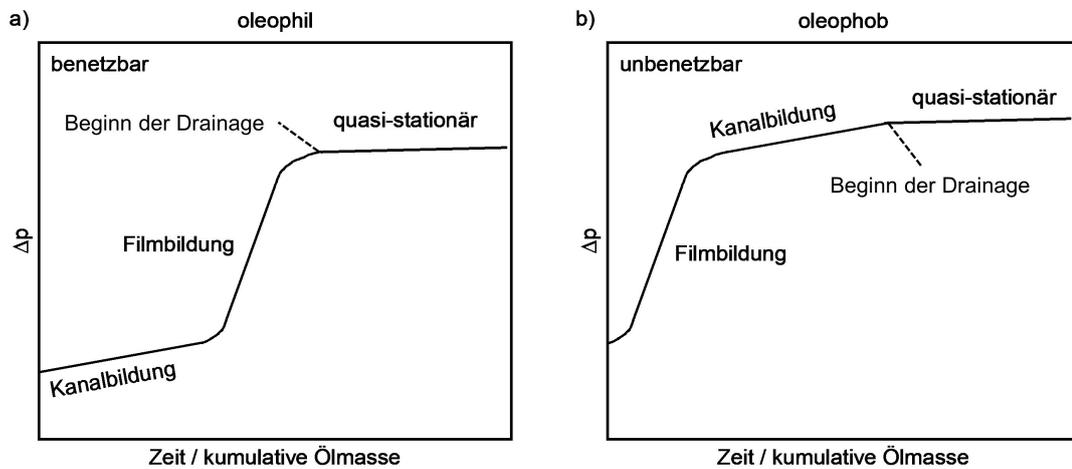


Abbildung 2.4: Schematischer Differenzdruckverlauf eines a) oleophilen und b) oleophoben Filters nach dem Kanal-Film-Modell mit eingezeichnetem Start einer abströmseitigen Drainage.

Das Kanal-Film-Modell besagt, dass Flüssigkeitstropfen hauptsächlich an der Filteranströmseite (bzw. in der vorderen Filterlage) von hocheffizienten oleophilen Filtern abgeschieden werden und zu größeren Flüssigkeitsansammlungen koaleszieren, die dann ins Innere des Filtermediums penetrieren. Bei hydrophilen Filtermedien bildet die Flüssigkeit zunächst Kanäle durch das Medium und der Differenzdruck nimmt linear mit der Kanallänge und damit der Beladungsmenge zu (siehe Abbildung 2.4 a) „Kanalbildung“). Wenn die Flüssigkeit die Reingasseite erreicht, bildet sie einen Flüssigkeitsfilm an der Grenzfläche, was zu einem steilen Anstieg des Differenzdrucks führt. Die schnelle Filmbildungskinetik inspirierte die englische Bezeichnung für das Modell „jump-and-channel model“, dabei steht „jump“ für den steilen „Sprung“ im Differenzdruckverlauf durch die Filmbildung (siehe Abbildung 2.4 a) „Filmbildung“). Die Höhe des Anstiegs entspricht dem kapillaren Austrittsdruck des benetzbaren Filters. Nach der Filmbildung fließt die auf der Abströmseite austretende Flüssigkeit (Drainage) ab und der Differenzdruck erreicht einen nahezu stationären Zustand (siehe Abbildung 2.4 a) „quasi-stationär“).

Im Fall von unbenetzbaren Filtermedien besagt das Modell, dass sich zuerst ein Film an der Anströmseite des Filters bildet. Das führt zu einem Anstieg des Differenzdrucks (siehe Abbildung 2.4 b) „Filmbildung“), der dem kapillaren Eintrittsdruck entspricht. Anschließend bilden sich Kanäle aus, in denen Flüssigkeit durch das Medium transportiert wird, was einen leicht linear steigenden Differenzdruck verursacht (siehe Abbildung 2.4 b) „Kanalbildung“). Die Flüssigkeit erreicht die Abströmseite des Filtermediums, wo Tropfen die Enden der Kanäle markieren, anwachsen und dann aufgrund der Schwerkraft an der Filterabströmseite drainieren, ehe erneut Tropfen an der selben Stelle entstehen. Durch wiederholtes Ablaufen von Flüssigkeit auf der Abströmseite des Filtermediums können sich Tropfenspuren bilden. Auch hier wird ein quasi-stationärer Zustand erreicht (siehe Abbildung 2.4 b) „quasi-stationär“).

In beiden Fällen, bei benetzbaren und unbenetzbaren Medien, wurde bestätigt, dass die Höhe des Differenzdrucks durch die Filmbildung mit dem sogenannten „Bubble Point“ übereinstimmt und unabhängig von Betriebsparametern ist [47, 48]. Der „Bubble Point“ entspricht dem kapillaren Austrittsdruck der größten Pore des Filtermediums und kann mittels Kapillarflussporometrie bestimmt werden.

Experimente mit unterschiedlicher Filterlagenanzahl, vergleichbar mit einem Medium in verschiedenen Dicken, haben gezeigt, dass die Dicke des Filters keinen Einfluss auf den Filmbereich des Differenzdrucks hat, sondern lediglich die Kanalbildung verlängert, was bei einem linearen Anstieg des Differenzdrucks und doppelter Filterdicke zu doppelter Kanallänge und -höhe des Differenzdrucks führt [49].

Der Differenzdruckverlauf von zunächst trockenen Filter und vorgesättigten Filter unterscheidet sich im quasi-stationären Zustand [48]. Bei ursprünglich trockenen Medien ist der kriechende Anstieg des Differenzdrucks, der auf sich allmählich ansammelnde Flüssigkeit im Inneren des Mediums zwischen den Kanälen zurückzuführen ist, im quasi-stationären Zustand ausgeprägter. Dabei steigt die Sättigung des Filters mit Flüssigkeit, während neue Kanäle gebildet werden. Bei vorgesättigten Medien ist der Differenzdruck im quasi-stationären Zustand schneller konstant.

Zusätzlich zur Drainage der Flüssigkeit in Schwerkraftrichtung, kann es auch zur Bildung von Sekundäraerosol auf der Abströmseite des Filters kommen. Dieses sogenannte Re-Entrainment ist in der (Ölnebel-)Filtration ein lang bekanntes Phänomen [50, 51, 52]. Zum einen können Tropfen durch gasströmungsinduzierte Wellenbildung und Mitriss entstehen [53]. Abhängig sowohl von der Relativgeschwindigkeit zwischen Flüssigkeit und Gas als auch der Oberflächenspannung und Viskosität der Flüssigkeit, können kleine Tropfen abgerissen werden [54]. Dies wurde für wenig effiziente Filter beobachtet [55, 56, 57]. Zum anderen kann Sekundäraerosol durch das Platzen von Blasen entstehen. Das ist überwiegend der Fall bei hocheffizienten Ölnebelnfiltern, da die Gasgeschwindigkeit meist weit unterhalb der benötigten Geschwindigkeit für Tropfenmitriss liegt [58, 59]. Die Blasen entstehen im abströmseitigen Film (oleophile Filter) oder in der Tropfenspur (oleophobe Filter). Die entstehenden Tropfen können als Film- oder Düsentropfen klassifiziert werden. Filmtropfen entstehen durch plötzliches Deformieren der Blase, die durch das Fließen der Blasenkapfenflüssigkeit in Richtung der Schwerkraft letztendlich platzt. Durch die Untersuchung atmosphärischer Prozesse ist dieser Aerosolbildungsprozess anhand von Salzwasser umfangreich erforscht (z.B. [60, 61]). Die Bruchstücke der Blasenkappe werden als Tropfen in Richtung der Gasströmung getragen, dabei ist die Anzahl der so entstehenden Tropfen proportional zum Quadrat des Blasendurchmessers [62] und der Durchmesser der Tropfen ist eine Funktion des Durchmessers der Blase [63]. Die in geringerer Anzahl vorliegenden Düsentropfen entstehen durch sich schließende Krater im Flüssigkeitsfilm nach dem Blasenplatzen, sodass im Zentrum der Aktivität ein Flüssigkeitsstrahl senkrecht zur Filmoberfläche austritt und sich durch dessen Zerfall Tropfen bilden [64].

Re-Entrainment in der Ölnebelfiltration wurde als konstante Kontaminierungsquelle der Reingasseite identifiziert [65]. Wurster [65] hat in experimentellen Untersuchungen, die durch das spontane Platzen von Blasen großen Unsicherheiten unterliegen, festgestellt, dass eine hohe Viskosität das Re-Entrainment verringert, aber der Effekt einer erhöhten Anströmgeschwindigkeit und Tropfenbeaufschlagungsrate, der Re-Entrainment begünstigt, bei weitem überwiegt.

2.2.2 Tropfen und feste Partikeln

Neben den Wechselwirkungen zwischen Filtermedium und Aerosol ist zusätzlich das Zusammenspiel und die gegenseitige Beeinflussung von flüssigem und festem Aerosol entscheidend für das Betriebsverhalten von Filtern. Dabei kann bei den vereinzelt publizierten Publikationen zwischen einer kontinuierlichen und diskontinuierlichen Zugabe von flüssigem Aerosol unterschieden werden (siehe Abbildung 2.1). Bredin et al. [66] beschäftigten sich mit der kontinuierlichen Abscheidung von rußhaltigen Öltröpfen und erkannten, dass die gegenseitige Beeinflussung der zwei Phasen das Betriebsverhalten des Filters maßgeblich veränderte. Die Viskosität des Öls stieg mit zunehmender Zugabe von Ruß an, was zu einem Anstieg des Differenzdruckes über dem Filter führte. In diesem Fall wurden Feststoff und Flüssigkeit allerdings bereits im Tropfen gemischt. Li et al. [67] führten Untersuchungen zum Einfluss einer kontinuierlichen Wassernebelzugabe bei der Filtration von Kohlenstaub mit Oberflächenfiltern durch. Mit einer vergleichsweise geringen Nebelzugabe konnten sie den Anstieg des Differenzdruckes verringern und so die Zykluszeiten verlängern. Bei einer vergleichsweise übermäßigen Nebelzugabe waren Differenzdruckanstieg und Zykluszeiten gegenüber der trockenen Filtration erhöht. Sie führten diese Beobachtungen auf die Ausbildung eines offenporigen Filterkuchens durch erhöhte interpartikuläre Kräfte für geringe Nebelzugabe und die Ausbildung von Flüssigkeitsbrücken und das Vorhandensein von Wasser innerhalb der Poren bei hohen Nebelzugaberaten zurück. Gac et al. [68] führten Experimente zur diskontinuierlichen Zugabe von flüssigem Aerosol durch und stellten heraus, dass zwischen den Mechanismen im Filterkuchen und der Effizienz des Filters ein direkter Zusammenhang besteht. Bei Beaufschlagung mit Flüssigkeit verloren ihre Filter an Effizienz, da die Dendriten aus unlöslichen Partikeln im Filter bei Kontakt mit Flüssigkeit kollabierten. Bermúdez et al. [69] untersuchten den Einfluss einer diskontinuierlichen Wasserbeaufschlagung eines beladenen Querstromfilters zur Abgasnachbehandlung eines Dieselmotors mit Tropfen. Dabei wurde die Gastemperatur von ursprünglich 300 °C auf bis zu 30 °C reduziert, sodass bei dem beschriebenen Aufbau flüssige Wassertropfen den Filter erreichten. Mit dieser Methode ließ sich der Anstieg des Differenzdruckes während des Betriebes kontrollieren, sodass der Beladungsprozess bis zur Einleitung der aktiven Regeneration verlängert und somit der Treibstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen verringert werden konnten. Die Senkung des Differenzdruckes direkt nach der Wassereinspritzung führten sie auf eine Umlagerung von Rußpartikeln auf der Filteroberfläche und im Filtermedium zurück und vermuteten zusätzlich, dass das Wasser zur Umlagerung der Asche im Filter und sogar zur Penetration dieser tiefer in das Filtermedium führen könnte.

Auswirkungen von Wassertropfen auf lösliche Filterkuchen wurden von König et al. [34] untersucht. Sie setzten NaCl-Filterkuchen, die sich auf Membranen und Glasfaser-Filtermedien gebildet hatten, unterschiedlicher Feuchtigkeit oder Wassertropfen aus. Die Ergebnisse zeigen, dass der Abscheidegrad durch den Kontakt mit Wassertropfen je nach Material des Filtermediums steigen oder sinken kann. In allen Fällen waren die Auswirkungen nach dem Kontakt mit Wassertropfen ausgeprägter als bei Beaufschlagung mit reiner hoher rel. Luftfeuchtigkeit ohne Tropfen. Leider sind keine Erklärungen, weitere Details über das Filtermaterial oder genauere Erklärungen zugrundeliegenden Mechanismen während der Untersuchungen angegeben. Eine systematische Analyse zu einer Verlagerung und zum Verbleib des Salzes sowie dem Einfluss verfahrenstechnischer Einflussgrößen auf den Differenzdruck und den Fraktionsabscheidegrad wurde nicht durchgeführt, sodass die Auswirkungen der unterschiedlichen Parameter auf das Betriebsverhalten von Filtern unerklärt bleiben.

2.3 Lösung von Salzen

Der folgende Abschnitt beschreibt ausschließlich die Effekte, die für die folgenden Betrachtungen relevant sind. Die Löslichkeit von Salzen hängt sowohl von dem ionischen Lösungsmittel als auch von den Eigenschaften des Salzes ab. Eine Beschreibung der Lösung von Salz durch Deliqueszenz, ist bereits in Kapitel 2.1.2 zu finden. Des Weiteren kann Salz durch direkten Kontakt mit Wasser gelöst werden. Treffen Wassertropfen auf eine Salzschrift, umhüllen die Dipolmoleküle des Wassers die Ionen des Salzes und führen sie der Brownschen Molekularbewegung folgend in die flüssige Phase. Beim Auftreffen von hydratisierten Ionen auf festes Salz können die Ionen wieder in das Ionengitter aufgenommen werden. Dieser Vorgang dauert an, bis sich ein Gleichgewicht einstellt und die Lösung mit Salz gesättigt ist. Weiterführende Informationen zum Lösungsprozess von Salzen über die Inhalte dieser Arbeit hinaus finden sich in externer Literatur [70, 71]. In dieser Arbeit sind ausschließlich Experimente mit Salzen durchgeführt, deren Lösungsvorgang endotherm ist, das heißt, die Hydratationsenergie ist kleiner als die Gitterenergie der Salze und die Lösung kühlt beim Lösungsvorgang ab. Bei diesen Salzen führt eine Erhöhung der Temperatur dazu, dass mehr Salz in der gleichen Wassermenge gelöst werden kann. Die Lösungsenthalpien der in dieser Arbeit verwendeten Salze sind in Kapitel 4, Tabelle 4.1 zu finden. Verdunstet ein Teil des Wassers einer gesättigten Lösung, so kristallisiert Salz aus. Näheres zu Kristallen, insbesondere zu Kristallisation in porösen Systemen, ist in Kapitel 2.4 beschrieben.

2.4 Kristallisation löslicher Komponenten in porösen Systemen

Da es sich bei den bislang untersuchten löslichen Bestandteilen bevorzugt um Salze handelt, die mit Wasser in Lösung übergehen können und bei anschließender Trocknung kristallisieren, ist der

Einfluss von Kristallisationsvorgängen auf den Filtrationsbetrieb nicht auszuschließen und muss bei einer Betrachtung der Beaufschlagung mit Wasser immer mit berücksichtigt werden. Kristalle sind Festkörper, die eine periodische, dreidimensionale Struktur aufweisen. Das hochorganisierte Kristallgitter unterscheidet sie von amorphen Festkörpern [72, 73]. Dieses wird durch stoffsystemspezifische einzelne Elementarbausteine, wie Atome, Ionen oder Moleküle stabilisiert. Häufige Kristallgitter sind Metallgitter, Atomgitter mit direkten Atombindungen, Molekülgitter (van-der-Waals-Kräfte, Dipol-Wechselwirkungen oder Wasserstoffbrückenbindungen) oder Ionengitter. Bei Salzen handelt es sich um Ionenbindungen, die ein Ionengitter formen. Die Anordnung der Kristallgitter variiert bezüglich Elementarlänge und Winkel der Ebenen zueinander [73]. Die Anordnung des Kristallgitters ist nicht äquivalent zur äußeren Erscheinungsform der Kristalle und wird in dieser Arbeit nicht betrachtet. Die Erscheinungsform von Kristallen wird vom Verhältnis der Ebenen mit hoher Belegungsichte, den Begrenzungsflächen, bestimmt. Dieser Kristallhabitus hängt unter anderem auch von der Wachstumsgeschwindigkeit und angrenzenden Fremdstoffen der Kristalle ab [73]. Im Beispiel von Salzlösungen in Filtern sind die Trocknungsbedingungen der Lösung und die Beschaffenheit der Fasern entscheidend. So kann ein und derselbe Stoff in verschiedenen Formen auftreten (siehe Abbildung 2.5). Beim Kristallwachstum bestimmt die am langsamsten wachsende Kristallfläche die Erscheinungsform [74, 75]. Kristallformen werden nach ihrem Aussehen beispielsweise in die Kategorien prismatisch, nadelig, dendritisch, tafelig und isometrisch unterteilt.

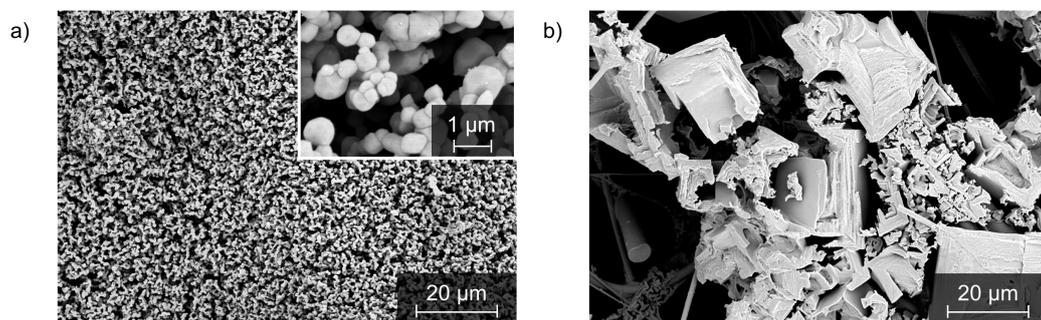


Abbildung 2.5: Auf einem Filter aufgefangene, in unterschiedlichen Erscheinungsformen auskristallisierte NaCl-Partikeln (a) durch Trocknung einer zerstäubten Salzlösung im Diffusionstrockner und (b) durch Trocknen einer Lösung auf einem hydrophoben Filter mit einem Gasstrom.

Die resultierende Struktur hygroskopischer Partikeln nach Effloreszenz hängt dementsprechend stark von der Substanz selbst, der Trocknungsrate und der Morphologie der Oberfläche ab, mit der die Partikeln in Kontakt sind. Horst et al. [36] beobachten den Deliqueszenz- und Effloreszenzprozess von NaCl-Partikeln auf Einzelfasern mit einem Rasterelektronenmikroskop. Nach der Effloreszenz auf hydrophoben Oberflächen zeigte das in der Studie verwendeten NaCl seine charakteristische kubische Kristallform, während auf hydrophilen Kupferfasern die Kristallisation zu einer Krustenbildung des Salzes auf den Fasern führte. Diese beobachteten Kristallformen von auskristallisiertem Salz sind auch auf die Interaktion der Lösung mit der Oberfläche zurückzuführen.

Hydrophile Fasern werden mit einem Film benetzt [76], was nach der Trocknung in einer feinporigen Salzkruste resultiert, während Tropfen auf unbenetzbaren Fasern kompakter auskristallisieren [39].

Beim Auskristallisieren von Salz durch Trocknung eines Filters muss zusätzlich bedacht werden, dass es sich um die Trocknung eines porösen Mediums handelt. Damit spielt der Stofftransport der Lösung (und damit auch des Salzes) durch Kapillarströmung im Filter eine Rolle. Die Trocknung von porösen Medien wird insbesondere im Hinblick auf das Trocknen durch Verdunstung bei Lebensmitteln, Gebäudematerialien oder in der Hydrologie erforscht. In der Regel ist die Verdunstung ein Verdrängungsprozess nicht mischbarer Fluide, bei dem ein weniger viskoses, nicht benetzendes Fluid (z.B. Luft) ein viskoseres, benetzendes Fluid (z.B. Wasser), das den Porenraum einnimmt, verdrängt [77]. Es wird zwischen zwei Trocknungsstufen unterschieden. In der ersten Stufe zu Beginn des Prozesses dringt Luft in das Medium ein und induziert eine Kapillarströmung zur Trocknungsfront [78, 79]. Daraus resultiert eine schnelle, fast konstante Trocknung, in der die Kapillarkräfte größer sind als der von Viskosität bestimmte Widerstand und die Schwerkraft [80, 81, 82]. Wenn Viskosität und Schwerkraft überwiegen, folgt eine langsame Verdunstungsphase mit niedriger Trocknungsrate, die durch die Transportprozesse innerhalb des Mediums mit unterbrochenen Flüssigkeitskanälen limitiert ist [83]. Diese zwei Phasen wurden auch in mathematischen Simulationen untersucht und differenzierter betrachtet (z.B. [84]). In der ersten Verdunstungsphase dringt Luft in die größeren Poren, während kleinere Poren gesättigt bleiben [85, 86, 87]. Shokri et al. [85] untersuchten diese bevorzugte Trocknungsfront mit NaCl-Partikeln als Indikator und zeigten damit, dass das Salz durch die Kapillarströmung an die Trocknungsfront transportiert wird und dort in Regionen mit überwiegend kleinen Poren auskristallisiert. Rad et al. [87] zeigten zudem, dass die Verteilung von auskristallisiertem Salz auf der Anströmseite von der Porengrößenverteilung des Mediums abhängt. Bei porösen Packungen aus kleinen Partikeln (z.B. 90-340 nm) kristallisierte das Salz homogen an der Trocknungsfront aus, bei Packungen aus großen Partikeln (z.B. 800-1400 nm) kristallisierte das Salz in dickeren Krusten an einzelnen Flächen „fleckig“ aus, was auf weniger bevorzugte Verdunstungsstellen (kleine Poren) zurückzuführen ist. Inwieweit diese Erkenntnisse auf die Trocknung von filternden Abscheidern in der Gasreinigung nach Kontakt mit Wassertropfen übertragbar sind, ist bisher nicht theoretisch analysiert oder experimentell untersucht und in dieser Arbeit erstmals diskutiert worden (siehe Kapitel 6.3.3).

3 Zielsetzung, Konzeption und Aufbau der Arbeit

Wie wirkt sich eine Beaufschlagung mit Wasser vorliegend als Wassertropfen auf bereits mittels Filter abgeschiedenes, insbesondere lösliches Partikelmaterial aus? Und unter welchen Bedingungen kommt es in diesem Rahmen zum Transport des abgeschiedenen Materials in Form von Umlagerungen oder Penetration? Beide Fragen sind für Oberflächen- und Tiefenfilter gleichermaßen relevant und bisher unbeantwortet.

Der Fokus bisheriger Forschungsarbeiten lag insbesondere auf dem Einfluss der rel. Luftfeuchtigkeit auf das Betriebsverhalten von Filtern. Dabei wurden die Folgen eines erhöhten Wassergehalts mit flüssigem Wasser vorliegend als Wassertropfen auf den Filtrationsbetrieb mit bereits abgeschiedenen Partikeln bisher nicht untersucht. Neben dem Beobachten des Betriebsverhaltens der Filter wurde nur in Ansätzen über das Kollabieren von Dendritenstrukturen durch rel. Luftfeuchtigkeit berichtet (z.B. [29], siehe Kapitel 2). Die Penetration von abgeschiedenen Partikeln in das Filtermedium war in diesem Zusammenhang nicht Gegenstand bisheriger Untersuchungen. Die Hauptmotivation für frühere Arbeiten war die Untersuchung der Auswirkungen eines erhöhten Wassergehalts, vor allem der rel. Luftfeuchtigkeit, auf die Filtrationseffizienz und nicht auf die stattfindenden Mechanismen oder folglich die Auswirkungen auf die im System vorhandenen Partikeln. Obwohl die bisherigen Studien mit unterschiedlichen Filtermedien durchgeführt wurden (z.B. Tiefenfilter mit und ohne Clogging, Oberflächenfilter), ist eine systematische Untersuchung relevanter Strukturparameter sowie Eigenschaften, wie beispielsweise der Benetzbarkeit, ebenso ausgeblieben, wie eine konkrete Prüfung der Übertragbarkeit von Erkenntnissen erworben mit einem Filtermedium auf weitere Filtermedien mit grundlegend anderem strukturellem Aufbau.

Im Fokus dieser Arbeit steht das Ziel, herauszufinden, wie sich Filter mit abgeschiedenen löslichen und unlöslichen Partikeln bei Beaufschlagung mit Wassertropfen verhalten und welchen Einfluss dies auf den Filtrationsprozess hat. Insbesondere wird untersucht, ob es zur Penetration von abgeschiedenem Material mit der Strömungsrichtung in und durch das Filtermedium kommen kann, welche Rolle die Benetzungseigenschaften des Filtermediums dabei übernehmen und inwieweit an einem Filtermedium erlangte Erkenntnisse auf ein anderes übertragbar sind.

Ziel dieser Arbeit ist es, die folgenden drei, unmittelbar daraus resultierenden Fragen zu beantworten:

1. Welchen Einfluss hat eine Beaufschlagung mit Wassertropfen von Filtern zur Gasreinigung, auf denen lösliche und unlösliche Partikeln abgeschieden sind, auf deren charakteristisches Betriebsverhalten?
2. Welchen Einfluss hat eine Beaufschlagung mit Wassertropfen von Filtern zur Gasreinigung, auf denen lösliche und unlösliche Partikeln abgeschieden sind, auf die mögliche Umlagerung und Penetration des abgeschiedenen Materials?
3. Sind die Einflüsse einer Beaufschlagung mit Wassertropfen von Filtern zur Gasreinigung, auf denen lösliche und unlösliche Partikeln abgeschieden sind, auf deren Betriebsverhalten und Penetration des abgeschiedenen Materials von der Benetzbarkeit und dem grundlegenden strukturellen Aufbau des Filtermediums abhängig?

Die Beaufschlagung eines Filters, mit löslichen und / oder unlöslichen Filterkuchenbestandteilen, mit Wassertropfen kann zunächst zu einer Lösung von Partikeln führen. Diese Mobilisierung kann einen durch Strömungs- und Kapillarkräfte oder sogar Schwerkraft dominierten Materialtransport auslösen. Darüber hinaus können die anschließende Trocknung des Filters und die Kristallisation der gelösten Stoffe zu einer neuen Anordnung des abgeschiedenen Feststoffs führen.

Auf der Grundlage dieser Mechanismen wurde zu Beginn der Arbeit zunächst ein Ablaufschema für Oberflächenfilter entwickelt, bei dem die folgenden vier möglichen Szenarien das zeitliche Verhalten von löslichem und unlöslichem Material auf einem Filter während der Beaufschlagung von Wassertropfen beschreiben:

1. Umlagerung des löslichen und unlöslichen Materials auf der Anströmseite des Filtermediums
2. Penetration des löslichen und unlöslichen Materials mit der Flüssigkeit in das Filtermedium und Verbleib im Filtermedium
3. Penetration des löslichen und unlöslichen Materials mit der Flüssigkeit durch die gesamte Tiefe des Filtermediums, was zu Drainage oder Re-Entrainment auf der Abströmseite des Filters führt. Interne Drainage ist typischerweise nur bei sehr dicken, grobporigen Filtermedien zu erwarten und daher an dieser Stelle für Oberflächenfilter nicht separat aufgeführt
4. Drainage von löslichem und unlöslichem Material mit Flüssigkeit auf der Anströmseite des Filters

Die vier Szenarien sind in Abbildung 3.1 am Beispiel eines Oberflächenfilters dargestellt und Gegenstand aller weiteren Untersuchungen.

Während der Wasserbeaufschlagung könnten die vier Szenarien unter zwei unterschiedlichen Betriebsbedingungen auftreten. Das erste Szenario stellt die Umlagerung von Partikeln auf der Rohgasseite des Filters dar. Das ist in Ansätzen schon durch das Kollabieren von Dendriten bei Beaufschlagung mit erhöhter rel. Luftfeuchtigkeit bekannt. Es könnte schon bei geringer Wassermenge und Beaufschlagungsdauer auftreten und ist bei der Beaufschlagung mit Wassertropfen

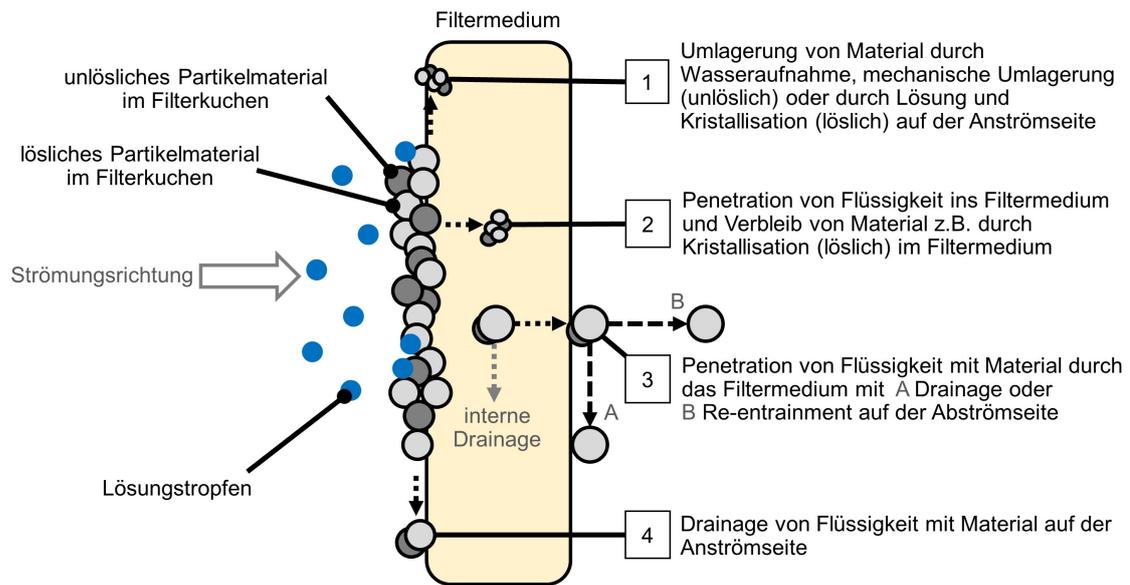


Abbildung 3.1: Vier Szenarien könnten potenziell durch die Beaufschlagung eines Oberflächenfilters mit wasserlöslichen Filterkuchenbestandteilen mit Wassertropfen ausgelöst werden.

daher auch bei einer *Kurzzeitbeaufschlagung* zu erwarten. Im Gegensatz dazu sind die anderen Szenarien eher bei einer vergleichsweise größeren Wassermenge (einstellbar über Konzentration oder Beaufschlagungsdauer), einer *Langzeitbeaufschlagung*, zu erwarten. Im zweiten Szenario wird davon ausgegangen, dass das Material mit der Flüssigkeit, ggf. gelöst, in das Filtermedium eindringt. Bei anschließender Trocknung könnte das lösliche Material dort auskristallisieren. Dieses Szenario setzt eine akkumulierte Wassermenge voraus und ist daher erst ab einer gewissen Beaufschlagungsdauer, bei *mittelfristiger Beaufschlagung* oder *Langzeitbeaufschlagung*, zu erwarten. Im dritten Szenario wird das Durchdringen des löslichen und unlöslichen Materials mit der Flüssigkeit durch die gesamte Tiefe des Filtermediums betrachtet. Dies würde zu einer Drainage oder einem Re-Entrainment auf der stromabwärts gelegenen Seite des Filters führen und ist nur bei *Langzeitbeaufschlagung* zu erwarten. Das vierte angegebene Szenario umfasst Partikelmaterial, das mit Flüssigkeit auf der Rohgasseite des Mediums abfließt. Es könnte potenziell in Zusammenhang mit *Kurzzeitbeaufschlagung*, *mittelfristiger Beaufschlagung* oder *Langzeitbeaufschlagung* auftreten, wenn der kapillare Eintrittsdruck ins Medium von der Flüssigkeit nicht überwunden werden kann und die Schwerkraft den Materialtransport dominiert. Interne Drainage ist nur bei grobporigen Medien zu erwarten.

Alle vier Szenarien sind in dieser Arbeit untersucht worden, um in ihrer Summe ein charakteristisches Betriebsverhalten von Filtern mit löslichen Filterkuchenbestandteilen bei Beaufschlagung mit Wassertropfen zu identifizieren. Da ein Auftreten verschiedener, sich überlagernder physikalischer Effekte und damit unterschiedlicher Szenarien in Abhängigkeit der Filterstruktur zu erwarten ist, wird die Struktur der Filter präzisiert. Es werden zunächst Oberflächenfilter untersucht, bevor die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf grobporige Tiefenfilter geprüft wird.

Für diese Arbeit wurden zwei Filterprüfstände aufgebaut (siehe Kapitel 4), einer für die Untersuchung der Kurzzeitbeaufschlagung von Filtermedien mit löslichen Filterkuchen und damit vermutlich einhergehenden anströmseitigen Partikelumlagerung, und einer für die Langzeitbeaufschlagung und vermutete Penetration von Partikelmaterial in und durch das Filtermedium mit simultaner anströmseitiger und abströmseitiger optischer Beobachtung, Drainagemessung und austauschbaren Filterhalterungen für ein- und mehrlagige Oberflächen- und Tiefenfilter.

In Anknüpfung an aktuelle Literatur, in der insbesondere der Einfluss von rel. Luftfeuchtigkeit im Rahmen von kurzzeitiger Beaufschlagung der Filter ohne Flüssigkeitsansammlung am Filter auf das Betriebsverhalten der Filter untersucht wurde, wird zunächst die Kurzzeitbeaufschlagung von salzbeladenen Filtern mit rel. Luftfeuchtigkeit im Vergleich zu Wassertropfen betrachtet (siehe Kapitel 5). Mit einem Vergleich dreier Salze wird geprüft, ob die Löslichkeit und Deliqueszenzfeuchte des Salzes einen Einfluss auf die auftretende Partikelumlagerung und den zu identifizierenden, damit einhergehenden, eventuell charakteristischen Differenzdruckverlauf haben.

Die Langzeitbeaufschlagung und die vermutete damit einhergehende Penetration von Partikeln wird am Beispiel von hydrophilen Oberflächenfiltern (siehe Kapitel 6) untersucht. Es werden sowohl rein lösliche Filterkuchen (Salz) als auch Mischungen mit unlöslichen Partikeln (Glas) sowie rein unlösliche Filterkuchen betrachtet. Analysiert wird insbesondere die Entwicklung des Differenzdrucks und des Fraktionsabscheidegrads der Filter sowie der Partikelmaterialverbleib nach Wasserbeaufschlagung und Trocknung. Die Analyse der herausgearbeiteten Szenarien beinhaltet insbesondere auch die Analyse der penetrierenden Flüssigkeit und des penetrierenden Partikelmaterials. Da der Großteil des beaufschlagten Partikelmaterials und der penetrierten Flüssigkeit in der Drainage, im Gegensatz zum Re-Entrainment, zu erwarten ist, ist die Drainage auf Salz- und Glasrückstände zu analysieren. Als Teil der Langzeitbeaufschlagung werden außerdem intermittierende, kontinuierliche und kontinuierliche mittelfristige Wasserbeaufschlagungs- und Trocknungszyklen betrachtet, um damit insbesondere eine mögliche Kristallisation im Inneren eines Filtermediums zu überprüfen.

Aus dem bisherigen Stand der Forschung ist die Benetzbarkeit des Filtermediums bei der Abscheidung von Tropfen als ein zentraler Einflussfaktor auf das Betriebsverhalten identifiziert worden (siehe Kapitel 2.2). Obwohl bisher in der Literatur nicht beachtet, ist zu erwarten, dass die Benetzbarkeit auch bei der Wasserbeaufschlagung von Filtern mit löslicher Partikelbeladung ein wichtiger Einflussfaktor ist. Daher wird als separater Parameter die Benetzbarkeit des Filtermediums und deren Einfluss auf das Betriebsverhalten, die Partikelumlagerung und -penetration untersucht (siehe Kapitel 7).

Abschließend wird analysiert, inwieweit die bisherigen Beobachtungen auch auf Filtermedien mit grundlegend anderem strukturellem Aufbau übertragbar sind (siehe Kapitel 8). Dafür werden Versuche mit grobporigen Tiefenfiltern durchgeführt und mit bisherigen Versuchen mit Oberflächenfiltern verglichen. Es werden an Oberflächenfiltern erprobte Messabläufe gewählt, um einen

direkten Vergleich der Druckverlustkurven zu ermöglichen und damit die Übertragbarkeit und Grenzen bisher gewonnener Erkenntnisse zu ermitteln und diese zu erweitern.

4 Materialien und Methoden

In diesem Kapitel werden die verwendeten Materialien und experimentellen Methoden erläutert, die zur Beantwortung der Forschungsfragen verwendet wurden. Zunächst erfolgt eine Beschreibung verwendeter Materialien, unterteilt in lösliches und unlösliches Partikelmaterial und Filtermedien (siehe Kapitel 4.1). Es folgt eine Beschreibung der aufgebauten Versuchsanlagen. Dabei wird zwischen einer Anlage zur Kurzzeitbeaufschlagung (siehe Kapitel 4.2) und zur Langzeitbeaufschlagung (siehe Kapitel 4.3) unterschieden. Es werden jeweils die einzelnen Komponenten der Anlage, die Aerosolerzeugung mit fester disperser Phase, der Wassereintrag und der Aufbau der Filterkammer erläutert. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer Beschreibung der notwendigen Schritte für eine Durchführung der Versuche (siehe Kapitel 4.4) und der verwendeten Charakterisierungsmethoden für die Filter und Filtermedien.

4.1 Materialien

Das eingesetzte Stoffsystem besteht aus:

- Partikelmaterial (lösliche Partikeln, unlösliche Partikeln und Wassertropfen)
- Filtermedium

Druckluft, die im Ursprung partikelfrei ist und eine rel. Luftfeuchtigkeit $< 10\%$ hat, dient als Prozessgas. Das verwendete Partikel- und Filtermaterial ist im Folgenden näher beschrieben.

4.1.1 Partikelmaterial

Die Versuche wurden mit NaCl, Kaliumchlorid (KCl) und Kaliumsulfat (K_2SO_4) als lösliches Partikelmaterial durchgeführt. Alle drei Salze sind Bestandteile natürlicher Aerosole [16] und dadurch besonders relevant für Filteranwendungen, z.B. in Anlagen in Küstennähe. Aus der Literatur ist bekannt, dass die Deliqueszenzfeuchte und Effloreszenzfeuchte von Salzen nur eine geringe Temperaturabhängigkeit aufweisen [27, 28]. In Tabelle 4.1 sind die verwendeten Salze und ihre relevanten Eigenschaften aufgelistet.

Zusätzlich wurden erste Versuche auch mit Magnesiumsulfat ($MgSO_4$) durchgeführt, da es in einer Vielzahl technischer Anwendungen auftritt und sich durch eine hohe Deliqueszenzfeuchte

Tabelle 4.1: Übersicht der verwendeten Salze mit ausgewählten Eigenschaften [88, 89, 90, 91].

Summenformel des Testsalzes	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄
Dichte ρ bei 20 °C in g/cm ³	2,170	1,988	2,66
Deliqueszenzfeuchte in %	75,6	84,7	96
Effloreszenzfeuchte in %	47,4	57,7	60
Löslichkeit in H ₂ O bei 20 °C in g/l	358	347	111
Lösungsenthalpie in H ₂ O bei 25 °C in kJ/mol	3,88	17,22	24,77

von 90,3 % (MgSO₄·7H₂O) bei 25 °C [92] auszeichnet. Es zeigte sich, dass die Partikelgrößenverteilung, der Druckverlustverlauf während der Beladung des Filters und die Flächenmasse des beladenen Filters nicht reproduzierbar waren. Die Eigenschaften von gelöstem MgSO₄ während des Trocknungsprozesses unterscheiden sich von typischen Kristallisationsprozessen, die in der Regel zu einer stabilen Kristallgröße führen [93]. Davies et al. beobachteten bei Trocknung unter 45 % rel. Luftfeuchtigkeit eine kontinuierliche Radienreduzierung assoziiert mit der Ausbildung einer Gelphase des MgSO₄, deren thermodynamische Stabilität temperatur- und feuchteabhängig ist [93]. Daher führen kleinste Änderungen der Temperatur und/oder rel. Luftfeuchtigkeit zu Veränderungen des Stoffsystems, die nicht auf gezielt eingestellte Parameter während der Filtrationsversuche zurückzuführen sind. Trotz hoher Deliqueszenzfeuchte und Anwendungsnähe bzw. Vorkommen in Filtrationsprozessen, ist MgSO₄ für eine erste Betrachtung des Einflusses von Wasser auf Gasreinigungsfilter daher nicht geeignet.

Spherglass 5000 CP00 (Potters Europe, Kirchheimbolanden, DE), basierend auf Siliciumoxid (72,5 % SiO₂, $\rho = 2,5 \text{ g/cm}^3$), dient als unlöslicher Teststaub [94].

Als Lösungsmittel wird ausschließlich demineralisiertes Wasser verwendet. Bei Beaufschlagung salzbeladener Filter mit einem Gasstrom mit hoher rel. Luftfeuchtigkeit oder Wassertropfen bildet sich eine Lösung. In Tabelle 4.2 sind relevante Stoffdaten von Wasser und der in dieser Arbeit auftretenden gesättigten Salzlösungen aufgelistet.

Tabelle 4.2: Übersicht ausgewählter Stoffdaten von Wasser und relevanten gesättigten wässrigen Salzlösungen [91].

Wasser oder wässrige Lösung	H ₂ O	NaCl	KCl	K ₂ SO ₄
Dichte ρ bei 20 °C in g/cm ³	0,998	1,197	1,162	1,081
Dyn. Viskosität bei 20 °C in mPa s	1,002	1,990	1,040	1,132
Dampfdruck bei 20 °C in kPa	2,339	1,768	2,164 ^a	2,121 ^b

a) bei 21 °C [95]

b) bei 19 °C [95]

4.1.2 Filtermedien

Die in dieser Arbeit verwendeten Filtermedien sind in Tabelle 4.3 mit ihren wichtigsten Eigenschaften aufgelistet.

Tabelle 4.3: Übersicht der verwendeten Filtermedien mit ausgewählten Herstellerangaben.

Nummerierung	1	2	3
Material	Glasfaser	PES/PA	PET
Art	Vlies, nassgelegt	Spinnvlies	Vlies
Anwendung	Ölnebelfiltration	Oberflächenfiltr.	Tiefenfiltration
Merkmale, Bearbeitung Anströmseite	organischer Binder	Wasserverfestigt, grau	thermisch verfestigt
Filterdicke in mm	0,8	1,0	20
Filtergewicht in g/m ²	94	240	300
Benetzbarkeit mit Wasser	hydrophob	hydrophil	hydrophil
Porengröße in µm	15 ^a	12±1 ^a	NA ^b
Anfangsdifferenzdruck in mbar	0,1-0,5 ^{ac}	0,4-0,6 ^{ac}	0,2-0,3 ^{ad}

a) eigene Messungen

b) Aufgrund von Mediumdicke und Grobporigkeit mittels Porometer nicht bestimmbar

c) bei 3,5 cm/s

d) bei 25 cm/s

Als Filtermedium bei der Untersuchung der Kurzzeitbeaufschlagung (siehe Kapitel 5) wird ein Glasfasermedium (Tabelle 4.3 Nr. 1) verwendet, das aufgrund seiner mechanischen Stabilität beim Auftreten einer Flüssigphase und seiner in Strömungsrichtung homogenen Struktur ausgewählt wurde. Für Langzeitversuche (siehe Kapitel 6) dient als Testfiltermedium ein hydrophiler Polyester (PES) / Polyamid (PA)-Spinnvliesstoff mit wasserstrahlverfestigten Mikrofilamenten (Tabelle 4.3 Nr. 2), das bei Untersuchungen zur Benetzbarkeit (siehe Kapitel 7) auch in hydrophober Ausführung Anwendung findet. Für Untersuchungen der Übertragbarkeit auf andere Filterstrukturen (siehe Kapitel 8) wird ein grobporiges, hydrophiles Tiefenfiltermedium (Tabelle 4.3 Nr. 3) verwendet, das aufgrund seiner vergleichsweise guten Homogenität in der Tiefe und vergleichsweise geringen Dicke ausgewählt wurde.

4.1.2.1 Konditionierung und Vorauswahl

Vor Verwendung von Filterronden und einem Vergleich dieser während einzelner Prozessschritt, ist durch eine Vorauswahl und Konditionierung die einheitliche Qualität der Ronden zu prüfen. Abscheidung durch Elektrostatik spielt in dieser Arbeit insofern eine Rolle, als darauf geachtet werden muss, dass die Filtermedien nicht geladen sind. Durch Erhöhung der rel. Luftfeuchtigkeit während der Wasserbeaufschlagung und die dadurch verbesserte Leitfähigkeit der Luft kann es sonst während der Versuche zur elektrostatischen Entladung des Filtermediums kommen. Dies könnte

insbesondere zu Fehlinterpretationen des Fraktionsabscheidegrades des Filters führen. Beim Aufrollen des Filtermediums aus PES / PA können Ladungen durch Reibung entstehen. Damit die Abscheidung von Partikeln nicht durch elektrostatische Kräfte beeinflusst wird, findet eine vollständige Entladung der Filterronden aus PES / PA vor Verwendung nach einer Methode angelehnt an ISO 16890-4:2020 [1] statt. Die einzelnen Filterronden werden über einen Zeitraum von 2 h in einem dichten Gefäß durch Diffusion mit Isopropanol gesättigt und anschließend 24 h bei 20 °C und 40 % rel. Luftfeuchtigkeit getrocknet. Zusätzlich werden alle Rondens, deren Anfangsdifferenzdruck des unbeladenen Filtermediums (Δp_0) bei einer Anströmgeschwindigkeit von $u = 3,5 \text{ cm/s}$ nicht $0,45 \text{ mbar} \pm 0,12$ beträgt, aussortiert.

4.1.2.2 Kapillarflussporometrie

Die Kapillarflussporometrie bietet ein gängiges und einfaches experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilung eines Filtermediums. Nach Erbe [96] wird eine kleine Filterprobe vollständig mit einer Benetzungsflüssigkeit gesättigt, die anschließend stufenweise durch ein zweites Fluid (hier Luft) unter Erhöhung der Druckdifferenz über der Probe verdrängt wird. Durch Messung des Volumenstroms \dot{V} bei einem Differenzdruck Δp_k ist es möglich, eine kumulative Porendurchmesserverteilung aus dem Verhältnis der Volumenströme durchs Filtermedium in trockenem und gesättigtem Zustand zu berechnen [97]:

$$Q_4(d_k) = 1 - \frac{\dot{V}_{\text{gesättigt}}(\Delta p_k)}{\dot{V}_{\text{trocken}}(\Delta p_k)} \quad (4.1)$$

Dabei ist der Volumenstrom durch das trockene Medium unter Annahme von zylindrischen, durchgehenden, nicht verzweigten Poren mit der durchgehenden Länge L wie folgt definiert:

$$V_{\text{trocken}}(\Delta p_k) = \frac{\pi \Delta p_k}{128 \mu L} \sum_{i=1}^{\infty} n_i d_i^4 \quad (4.2)$$

Der Volumenstrom durch das gesättigte Medium ist bei dem Differenzdruck Δp_k und der dabei kleinsten entleerten Pore mit Durchmesser d_k wie folgt definiert:

$$V_{\text{gesättigt}}(\Delta p_k) = \frac{\pi \Delta p_k}{128 \mu L} \sum_{i=k}^{\infty} n_i d_i^4 \quad (4.3)$$

Das Verfahren der Porometrie wird in dieser Arbeit verwendet, um Porengrößenverteilungen der Filtermedien, den kapillaren Austrittsdruck („Bubble Point“) und, durch Umdrehen der Messzelle, den Eintrittsdruck der Medien zu bestimmen und zu vergleichen. Der technische Aufbau und die Regelung des verwendeten Porometers sind von Kolb beschrieben ([48], Kapitel 10). Dort findet sich auch eine Analyse der Fehlerquellen der Kapillarflussporometrie. In dieser Arbeit wurden

Versuche mit Silikonöl (AK5, Wacker, Burghausen, DE), Wasser und gesättigter Kaliumsulfatlösung durchgeführt, wobei sich keine messbaren Unterschiede zwischen Wasser und gesättigter Kaliumsulfatlösung ergaben.

4.2 Anlage zur Kurzzeitbeaufschlagung

Es wird zwischen einer Anlage zur kurzzeitigen Wasserbeaufschlagung, durch die keine Penetration von Flüssigkeit auf die Reingasseite zu erwarten ist, und zur Langzeitbeaufschlagung (siehe Kapitel 4.3), durch die Auftreten einer Drainage zu erwarten ist, unterschieden.

Der Versuchsstand zur Kurzzeitbeaufschlagung mit erhöhter rel. Luftfeuchtigkeit mit und ohne Wassertropfen wurde zur Beaufschlagung von salzbeladenen, flachen Filterronden mit geringen Mengen an Wasser über kurzen Zeitraum (Δt) < 1 h gebaut. Die Prozesstemperatur entspricht der Umgebungstemperatur (17 – 19 °C). Der Versuchsstand ist schematisch in Abbildung 4.1 gezeigt und besteht aus drei zentralen Teilen;

- Salzaerosolerzeugung,
- Wassereintrag,
- Filterkammer.

Eine Konditionierung oder Durchströmungstrocknung des Filters kann an der Anlage zur Kurzzeitbeaufschlagung mit Druckluft durchgeführt werden (siehe Abbildung 4.1:2).

4.2.1 Salzaerosolerzeugung

Für die Generierung eines Salzaerosols wird eine Salzlösung zerstäubt (ATM 210, Topas GmbH, Dresden, DE) und die entstehenden gasgetragenen Tropfen werden in einem Diffusionstrockner (DDU 570/H, Topas GmbH, Dresden, DE) getrocknet (siehe Abbildung 4.1). Die Zerstäubung mit einer Zweistoffdüse erfolgt durch die Beschleunigung von Druckluft, die einen Unterdruck in einer Engstelle im Zerstäuber erzeugt, wodurch die Flüssigkeit über ein Steigrohr angesogen wird. Durch die Scherkräfte der Zweiphasenströmung wird das Wasser in Tropfen dispergiert, von denen die kleineren mit der Gasströmung aus dem Zerstäuber getragen werden. Der Differenzdruck über dem Zerstäuber korreliert mit der erzeugten Partikelkonzentration und Partikelgrößenverteilung. Ein abfallender Differenzdruck führt zu einem Abfall der Geschwindigkeit in der Düse und somit zu geringerem Einfluss der Scherkräfte in der Düse. Die Partikelgrößenverteilung verschiebt sich hin zu größeren Partikeln. Da durch die geringere Geschwindigkeit der Unterdruck im Zerstäuber sinkt, und weniger Flüssigkeit über das Saugrohr im Zerstäuber angezogen wird, sinkt auch die Tropfenzentration und damit die Anzahl der erzeugten Partikeln pro Zeit. Um eine Verschiebung der Partikelkonzentration und Partikelgrößenverteilung während der Beladung des Filters zu vermeiden,

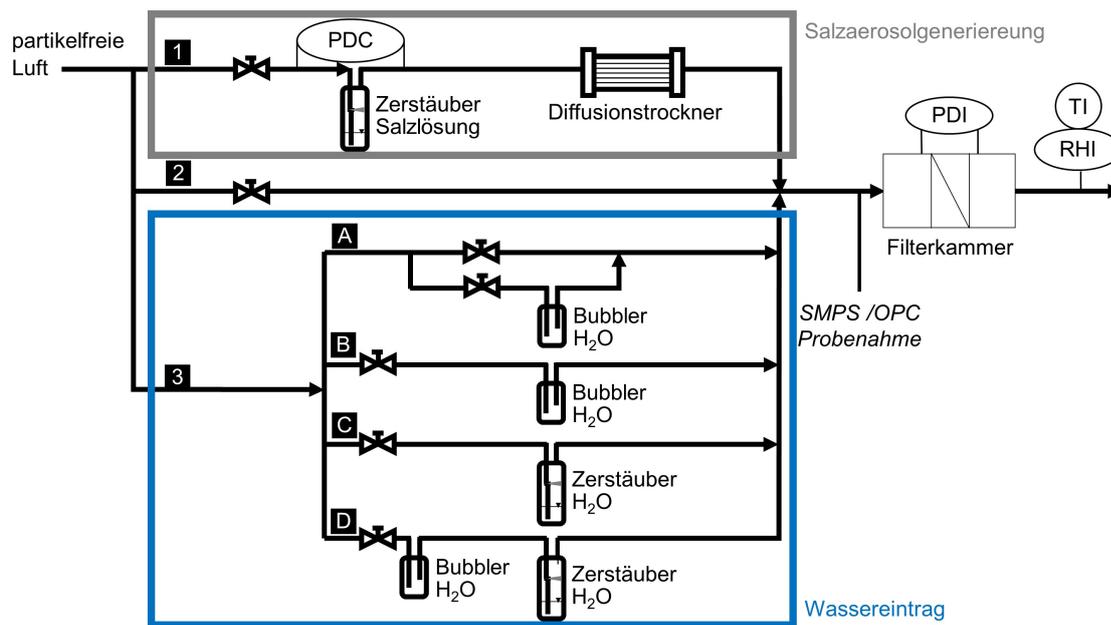


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus. Die Zahlen weisen auf die verschiedenen Schritte der Versuchsdurchführung hin; (1) die Filtration von Salz, (2) die Konditionierung und Durchströmungstrocknung mit Luft und (3) die Befuchtung, die mit verschiedenen Methoden zur Feuchte- und Wassertropfenerzeugung (A-D) durchgeführt werden kann.

wurde der Zerstäuber differenzdruckgesteuert (Differenzdruckregler $\pm 0,01$ bar, SMC, Egelsbach, DE) betrieben. Die Anlage wird mit 5 g/l-Lösungen mit NaCl, KCl oder K₂SO₄ betrieben. Abbildung 4.2 zeigt die mit einem Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) (SMPS 3938, TSI GmbH, Aachen, DE) gemessenen Partikelgrößenverteilungen der in dieser Anlage verwendeten Salze. Eine isokinetische Probenahme fand bei der Vermessung keine Anwendung, da mit kleinen Salzpartikeln ($x_{50,0} < 100$ nm) gearbeitet wurde, die aufgrund ihrer geringen Trägheit der Strömung nahezu ideal folgen [98].

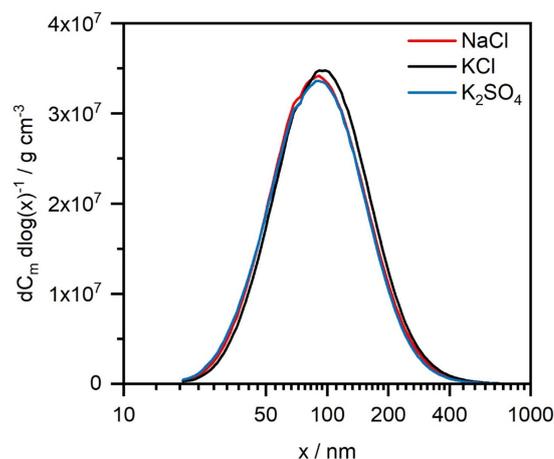


Abbildung 4.2: Partikelgrößenverteilungen der verwendeten Salze zur Untersuchung der Kurzzeitbeaufschlagung.

4.2.2 Wassereintrag

Der Wassereintrag für die Beaufschlagung findet mit einem Bubbler zur Befeuchtung und/oder einem Zerstäuber zur Tropfengenerierung statt (siehe Abbildung 4.1:3). Die geringste Wassermenge wird mit einem Bubbler und Verdünnung erzielt (siehe Abbildung 4.1:3A). Die größte Menge an Wasser kann mit einer Kombination aus Bubbler mit Zerstäuber in die Filterkammer eingetragen werden (siehe Abbildung 4.1:3D). Eine genaue Bestimmung der erzeugten Tropfenverteilung ist für dieses System mit herkömmlichen Methoden, wie beispielsweise optischen Streulichtmessgeräten nicht möglich, da keine absolut stabile Temperatur im Messsystem gewährleistet werden kann und dadurch Effekte wie Verdunstung und Kondensation an optischen Linsen die Messungen unbrauchbar machen. Eine eigene Anlage für die Vermessung von Tropfenkollektiven mittels Laserbeugungsverfahren stand für diese Arbeit nicht zur Verfügung. Allerdings zeigten Messungen mit einem Optical Particle Counter (OPC) (Promo 3000 H, Palas GmbH, Karlsruhe, DE), der zur Vermeidung von Kondensation an optischen Linsen beheizt wurde, Partikeln bis zur Größe von 1 μm . Da diese Partikelgröße wesentlich größer als Verunreinigungen aus demineralisiertem Wasser ist, konnte damit die Präsenz von Wassertropfen nachgewiesen werden. Die unterschiedlichen Wassermengen bei der Beaufschlagung mit flüssigem Wasser (H_2O), werden über die flüssige Wassermasse, die für Tropfenbildung zur Verfügung steht (m_{WT}) unterschieden. Sie wird über die insgesamt eingetragene Wassermasse ($m_{\text{W,eingetragen}}$) und die gasförmige Wasserbeladung der Luft f bei maximaler Sättigung S_{max} bei 20 °C von 17,29 g/m^3 [99], den Volumenstrom \dot{V} und die Beaufschlagungsdauer Δt über eine Massenbilanz approximiert:

$$m_{\text{W,eingetragen}} - f S_{\text{max}}(T) \cdot \dot{V} \cdot \Delta t = m_{\text{WT}} \quad (4.4)$$

Bei dieser Berechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Druckluft ist zunächst vollständig trocken.
- Die in das System eingetragene Wassermenge verdunstet bis zur vollständigen Sättigung der Luft.
- Wasserrückstände an den Kanalwänden sind vernachlässigbar.

Damit ergibt sich beispielsweise bei einer eingetragenen Wassermasse von 156,89 g mit einem Volumenstrom von 0,004874 m^3/s bei 1500 s eine Wassermasse von 30,48 g für die Tropfen während der Wasserbeaufschlagung. Über die Anströmfläche A lässt sich so die Wassertropfenbeladung der Filter in g/m^2 berechnen:

$$\frac{m_{\text{WT}}}{\rho \cdot A} = \text{Wassertropfenbeladung der Filter} \quad (4.5)$$

Damit ergibt sich für die Anlage zur Kurzzeitbeaufschlagung:

$$\frac{30,48}{0,1392 \text{ m}^2} = 218,97 \text{ g/m}^2 \quad (4.6)$$

Die Wasserbeaufschlagung wird damit im Folgenden als 219 g Wassertropfen /m² bezeichnet.

4.2.3 Verdunsten von Wassertropfen

Bei der Beaufschlagung der Filter mit Wassertropfen statt allein mit feuchter Luft muss die Wechselwirkung von Wassertropfen mit der Umgebungsluft durch Verdunstung berücksichtigt werden. Für die Betrachtung der Stabilität der Tropfen ist insbesondere die rel. Luftfeuchtigkeit relevant, da bei ansteigender rel. Luftfeuchtigkeit die Verdunstungsrate sinkt. Mit Hilfe des Diffusionskoeffizienten $D_{W/L}$ von Wasser in Luft nach Hinds mit $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ [100] und der Wassermenge bei maximaler Sättigung mS_{\max} bei 20 °C von $17,29 \text{ g/m}^3$ [99] kann die Verdunstungsrate für einen freischwebenden Tropfen mit der Größe x berechnet werden [101].

$$-\frac{dm}{dt} = 2\pi x D_{W/L} (1 - \text{rel. Luftfeuchtigkeit}) m S_{\max}(T) \quad (4.7)$$

Abbildung 4.3 zeigt die Tropfengröße in Abhängigkeit der Zeit für einen Tropfen mit einem Durchmesser von zunächst $x = 3 \mu\text{m}$ bei unterschiedlichen Werten der rel. Luftfeuchtigkeit.

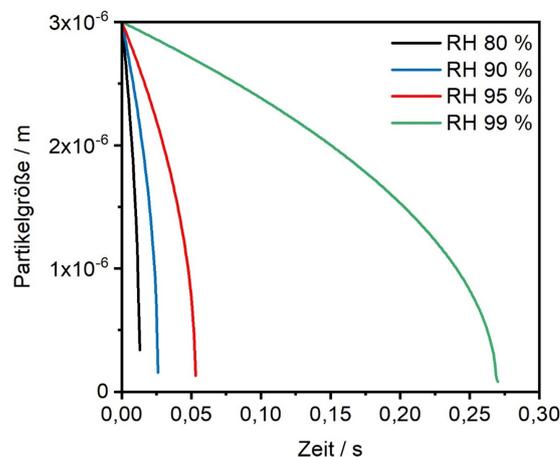


Abbildung 4.3: Abnahme des Durchmessers eines Tropfens von $x = 3 \mu\text{m}$ aufgrund von Verdunstung bei 80 %, 90 %, 95 %, und 99 % rel. Luftfeuchtigkeit.

Bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 99 % kommt es bei feinsten Tropfen von 3 μm Durchmesser innerhalb von einer viertel Sekunde zu einer Reduktion der Tropfengröße um über 30 %. Diese Abschätzung gilt für gasgetragene reine Wassertropfen. Sobald Tropfen an den Fasern des Filters abgeschieden sind, erhöht sich die Relativgeschwindigkeit zwischen Tropfen und Luft, was die Verdunstung zusätzlich begünstigt. Zudem ist das Verhalten von Tropfen, das unter anderem von Struktur und Material des Filters abhängt, auf Fasern nicht mit dem auf flachen Oberflächen

gleichzusetzen [102, 103]. Zur Vermeidung verdunstungsfördernder Faktoren wird daher in allen Versuchen zur Langzeitbeaufschlagung der Filter mit Wassertropfen auf eine Vorsättigung des Gasstroms (rel. Luftfeuchtigkeit = 100 %) gesetzt, um ein Aerosol mit stabilen dispersen Tropfen zu generieren.

Schwarmeffekte von Partikelkollektiven innerhalb einer Strömung, die die Sinkgeschwindigkeit verringern oder Kollision von Tropfen fördern könnten, sind in dieser Betrachtung vernachlässigt und können mit dem experimentellen Aufbau in dieser Arbeit nicht beobachtet werden.

4.2.4 Filterkammer

Die Filterkammer besteht aus zwei ineinander geschraubten, eloxierten Hüllen, die zentral einen Filterhalter bestehend aus zwei Ringen ohne Stützgitter halten. Die Anströmfläche der Filter beträgt $13,92 \text{ cm}^2$. Einlass und Auslass der Filterkammer sind Öffnungen mit 5 mm Durchmesser, durch die der Filter zentral angeströmt wird. Der Differenzdruck über dem Testfilter wird mit einem Differenzdrucksensor (Omega, Deckenpfronn, DE) mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2 \%$ aufgezeichnet, wobei Anschlüsse mit identischem Querschnitt in einem Abstand von 11 cm vor und hinter dem Filter verwendet werden. Die Temperatur und die rel. Luftfeuchtigkeit werden 40 cm stromabwärts der Filterkammer mit Sensoren mit einer Genauigkeit von $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $\pm 2 \%$ gemessen. Partikelkonzentrationen im Reingas und Rohgas können dabei mit OPC oder SMPS ermittelt werden.

4.3 Anlage zur Langzeitbeaufschlagung

Ein zweiter Versuchsstand wurde für die Langzeitbeaufschlagung, zur Untersuchung des Szenarios der Penetration von Partikeln durch die gesamte Tiefe des Filtermediums (siehe Kapitel 3), gebaut. Auf Basis der Erfahrung mit der Apparatur zur Kurzzeitbeaufschlagung wurde die Anlage um wesentliche Aspekte, wie eine Wassertropfengenerierung mit definierter Tropfengröße in vorgesättigter Luft, Abscheidung eines Wandfilms und Temperierung der Anlagenumgebung ergänzt. Zusätzlich kann die Drainage zu analytischen Zwecken aufgefangen werden. Die Anlage zur Langzeitbeaufschlagung mit Wasser mit simultaner optischer Beobachtung der Anström- und Abströmseite wird an dieser Stelle vollständig beschrieben. Es finden jedoch nicht alle Komponenten für jede Untersuchung Verwendung, sodass in den folgenden Kapiteln darauf hingewiesen wird, welche Komponenten verwendet bzw. nicht verwendet wurden. Der Versuchsstand zur Langzeitbeaufschlagung wurde in einem temperierten Raum bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ betrieben und besteht aus folgenden Teilen:

- Aerosolerzeugung mit fester disperser Phase
- Aerosolerzeugung mit flüssiger disperser Phase

- Filterkammer und Filterhalterung
- Optischer Aufbau zur Beobachtung der Roh- und Reingasseite im Betrieb

Abbildung 4.4 zeigt den schematischen Aufbau und ein Foto der Anlage zur Langzeitbeaufschlagung. Das Foto zeigt eine Übersicht der Anlage ohne optischen Aufbau (siehe Kapitel 4.3.4 für ein Foto und Details zum optischen Aufbau).

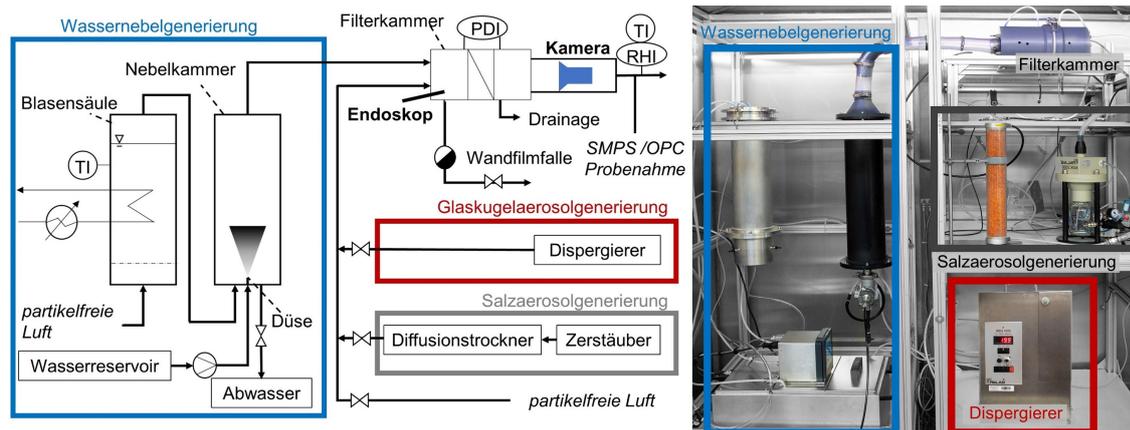


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung und Foto des Versuchsaufbaus zur Langzeitbeaufschlagung.

4.3.1 Salz- und Glasaerosolerzeugung

Für die Versuche zur Langzeitbeaufschlagung erfolgt die Beladung der Filter mit K_2SO_4 -Partikeln und/oder Glaskugeln. Die Langzeitversuche werden mit K_2SO_4 aufgrund seiner hohen Deliqueszenzfeuchte durchgeführt. Dies minimiert die Überlagerung zwischen Lösung durch Deliqueszenz und Lösung durch direkten Kontakt mit flüssigem Wasser.

Das Salzaerosol wird durch die Zerstäubung (AGK 2000, Palas GmbH, Karlsruhe, DE) einer 10 g/l K_2SO_4 -Lösung und die anschließende Trocknung der in Bewegung befindlichen Tropfen durch einen Diffusionstrockner (DDU 570/H, Topas GmbH, Dresden, DE) erzeugt. Der Zerstäuber wird dabei mit einem Differenzdruckregler $\pm 0,01$ bar (SMC, Egelsbach, DE) geregelt, um den angelegten Differenzdruck und damit die Partikelgrößenverteilung auch während der Beladung eines Filters konstant zu halten. Die so erzeugten Partikeln haben einen anzahlgewichteten Medianwert von $x_{50,0} = 68$ nm, gemessen mit einem SMPS 3938 (TSI GmbH, Aachen, DE). Es wurde keine isokinische Probenahme verwendet, da sich kleine Partikeln ($x < 100$ nm) wie Gasmoleküle verhalten [98]. Abbildung 4.5 a) zeigt die gemessene Partikelgrößenverteilung des K_2SO_4 -Partikelkollektivs.

Die Glaskugeln werden mit einem RBG 1000 Dispergierer (Palas GmbH, Karlsruhe, DE) dispergiert. Die Partikelgrößenverteilung der in die Filterkammer eintretenden Glaskugeln wurde mit einem SMPS 3938 (TSI GmbH, Aachen, DE) von 20 nm einer Größe von 800 nm und einem OPC Promo 3000 H (Palas GmbH, Karlsruhe, DE) von 300 nm bis zu 17 μm gemessen. Auch hier

wurde keine isokinetische Probenahme verwendet. Basierend auf diesen Messungen hat das Glas einen anzahlgewichteten Medianwert von $x_{50,0} = 480$ nm. Abbildung 4.5 b) zeigt die so gemessene Partikelgrößenverteilung des Glaspartikelkollektivs.

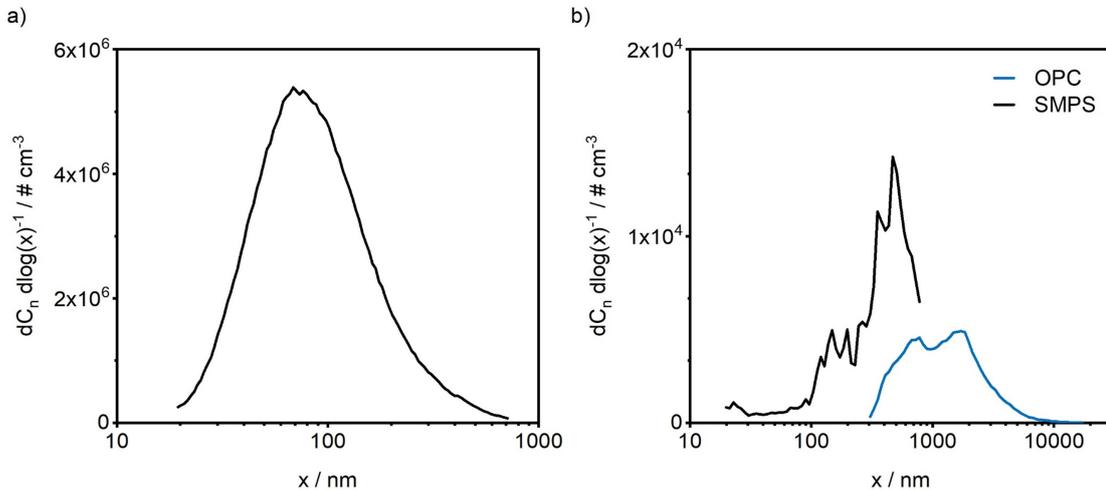


Abbildung 4.5: Partikelgrößenverteilungen von a) K_2SO_4 und b) Glas

Der Massenstrom der Glaskugeln wird entsprechend dem zu untersuchenden Gewichtsverhältnis von Salz und Glas eingestellt. Für das Glas wurde die Massenkonzentration für jede Dispergierer-einstellung individuell unmittelbar vor dem Versuch ermittelt. Ein hocheffizienter Membranfilter wurde über einen Zeitraum von 2 h mit den Glaskugeln beladen und vor und nach Beladung gewogen, um den bei der jeweiligen Einstellung erzeugten Massenstrom zu ermitteln und so die richtige Einstellung für das gewünschte Gewichtsverhältnis sicherzustellen.

4.3.2 Wassereintrag

Zur Erzeugung einer stabilen, feindispersen Wasserphase durchströmt ein zunächst trockener, partikelfreier Luftstrom eine Blasensäule und wird so gesättigt. Zur Regelung der Temperatur der Blasensäule ist diese mit einem Thermostat (CC-K12, Peter Huber Kältemaschinenbau AG, Offenburg, DE) und einem Thermoelement ausgestattet. Der gesättigte Luftstrom durchläuft eine Wassernebelkammer, in der durch Zerstäubung von demineralisiertem Wasser mit einer Einstoffdüse (Micro-line Nebeldüse 0,1 mm, Micro Rain Systems e.K., Altenburg, DE) bei 70 bar feine Tropfen erzeugt werden. Da der Luftstrom gesättigt ist, kann die Partikelgrößenverteilung der Wassertropfen als konstant mit dem vom Düsenlieferanten angegeben anzahlgewichteten Medianwert von $x_{50,0} \approx 3 \mu\text{m}$ angenommen werden. Die Wassertropfen, die sich an den Wänden der Wassernebelkammer absetzen, laufen in einen Wassertank ab. Der gesättigte Luftstrom trägt die verbleibenden Wassertropfen mit einem Volumenstrom von 0,050 ml/min an den Filter. Dieser Volumenstrom wurde durch die Massendifferenz eines hydrophilen Filters bei Beaufschlagung mit Wasser ohne Drainage über einen definierten Zeitraum bestimmt.

4.3.3 Filterkammer und Filterhalterungen

Eine Zeichnung der speziell für die Langzeitbeaufschlagung von filternden Abscheidern mit Wassertropfen konzipierte Filterkammer ist in Abbildung 4.6 gezeigt.

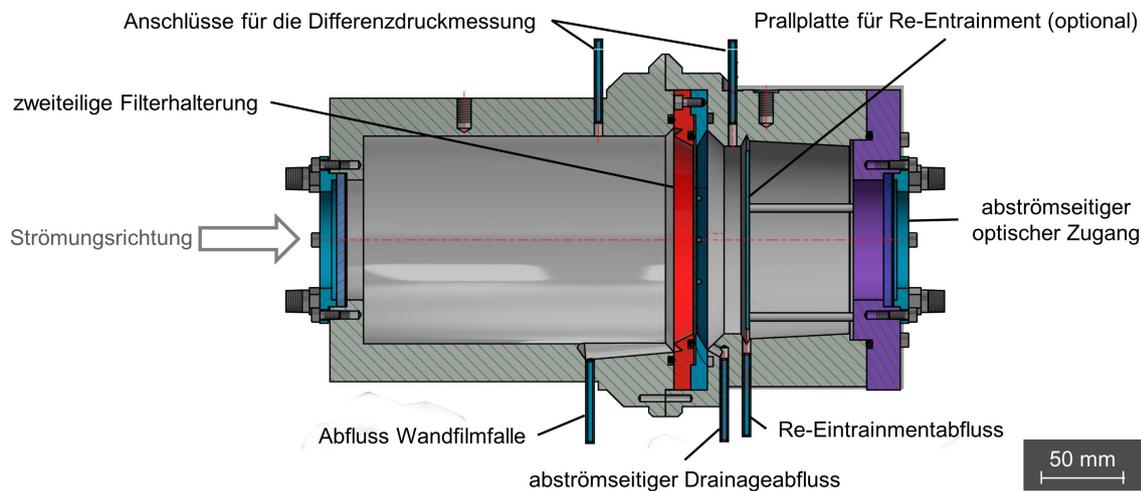


Abbildung 4.6: Zeichnung der Filterkammer für die experimentelle Untersuchung der Langzeitbeaufschlagung.

Die Filterkammer ist mit einer Wandfilmfalle, einem Abfluss unmittelbar vor dem Filtermedium für den anströmseitig anfallenden Wasserfilm an den Wänden der Filterkammer, ausgestattet. Zusätzlich befindet sich ein Drainageabfluss unmittelbar hinter dem Filter. Abströmseitig des Drainageabflusses ist ein separater Auslass, über dem eine optional einsetzbare Prallplatte positioniert ist, an der Tropfen aus potentiell auftretendem Sekundäraerosol (Re-Entrainment) abgeschieden werden und in den Auslass abfließen können. Da massenmäßig der Anteil der Drainage gegenüber Sekundäraerosol weit überwiegt, liegt in dieser Arbeit der Fokus auf der Analyse der Drainage als Nachweis der Penetration von Salz und Glas durch die gesamte Tiefe des Filtermediums. Während der hier vorgestellten Experimente kam die Prallplatte nicht zum Einsatz und der Auslass für abgeschiedene Tropfen aus dem Re-Entrainment blieb verschlossen. Zwei Sensoren zur Temperatur- und Feuchtemessung (EE08, E + E Elektronik, Engerwitzdorf, DE) sind im Abluftstrom unmittelbar hinter der Filterkammer installiert. Die Anschlüsse für den Differenzdrucksensor (Omega, Deckenpfronn, DE, Genauigkeit $\pm 0,2\%$), zur Aufzeichnung des Drucks über dem Filter während der Versuche, sind unmittelbar vor und hinter dem Filter positioniert. Die Filterkammer ist mit einer Öffnung auf der Rohgasseite, bestimmt für das Einführen eines Endoskops, und einer Plexiglas-scheibe auf der Reingasseite für visuellen Zugang ausgestattet (siehe Kapitel 4.3.4 für Details zum Aufbau des Kamerasystems). Einlass und Auslass der Filterkammer sind in Abbildung 4.6 nicht zu sehen, da es sich um eine Querschnittsansicht handelt. Einlass und Auslass der Filterkammer bestehen aus jeweils vier Öffnungen, die gleich weit vom Zentrum des Filtermediums entfernt sind,

durch die das Aerosol durch 5 mm Durchmesser ein- bzw. austritt. Je nach Anwendung kann die Filterkammer mit einer Filterhalterung für Oberflächenfilter oder einer Filterhalterung für Tiefenfilter verwendet werden.

Die Filterhalterung für flache Oberflächenfilter besteht aus zwei miteinander verschraubten Edelstahlringen. Abbildung 4.7 zeigt Fotos der Anström- und Abströmseite der Filterhalterung für Oberflächenfilter.

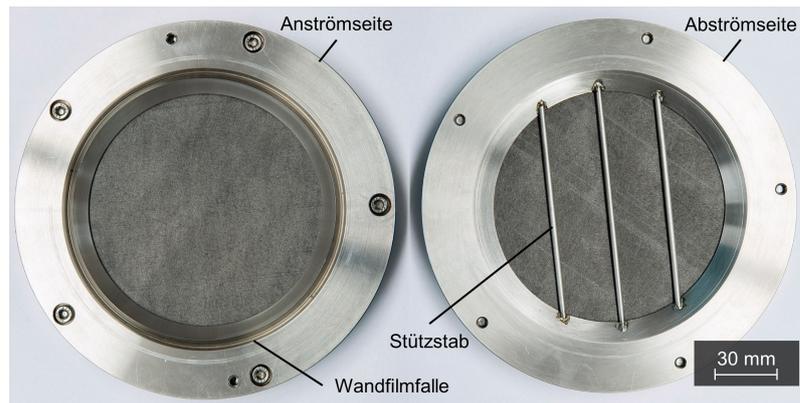


Abbildung 4.7: Fotos der Anström- und Abströmseite der Filterhalterung für Oberflächenfilter.

Die Anströmseite ist mit einer Rinne und einem vorstehenden Steg um die Anströmfläche des Filtermediums ausgestattet, der den Wandfilm abtrennt und in den dafür vorgesehenen Abfluss leitet. Als Stütze für das Medium in der Halterung dienen drei Stäbe auf der Abströmseite, die während der Versuche senkrecht positioniert sind und damit das Abfließen der Drainage nicht behindern. Die Anströmfläche beträgt 100 cm^2 . Für eine tiefenaufgelöste gravimetrische Analyse des Filters ist ein Filteraufbau aus mehreren Medienlagen, die einzeln vermessen werden können, die einzige zerstörungsfreie Methode. Dabei können mehrere aufeinanderfolgende Filtermedienlagen als ein Filter ohne interne Grenzflächen (vorausgesetzt es gibt keinen Abstand zwischen den Lagen) betrachtet werden. Aufgrund des industriellen Aufbaus von Koaleszenzfiltern, die in der Praxis auch aus mehreren Lagen bestehen, findet diese Methode im angrenzenden Forschungsgebiet der Ölnebelfiltration schon lange Anwendung. Auch aus der Tiefenfiltration ist der Filteraufbau aus mehrlagigen Medien, hier in der Regel mit einem Strukturgradient, bekannt. Zur Anwendung dieser Methode wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Filterhalterung analog zur Filterhalterung für einlagige Filter gefertigt, die statt einer Lage vier Lagen hält. Die experimentelle Prüfung der Übertragbarkeit und der Zugewinn an Erkenntnissen durch Anwendung dieser Methode finden sich in Kapitel 6.3.

Abbildung 4.8 zeigt eine Zeichnung des Querschnitts und Fotos der Anström- und Abströmseite der Filterhalterung für Tiefenfilter.

Für die Untersuchungen der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Tiefenfilter wird das Tiefenfiltermedium (siehe Tabelle 4.3) manuell in drei Lagen getrennt. Eine Trennung in vier Lagen war ohne Beeinträchtigung der Stabilität der einzelnen Lagen nicht möglich. Die Lagen werden individuell,

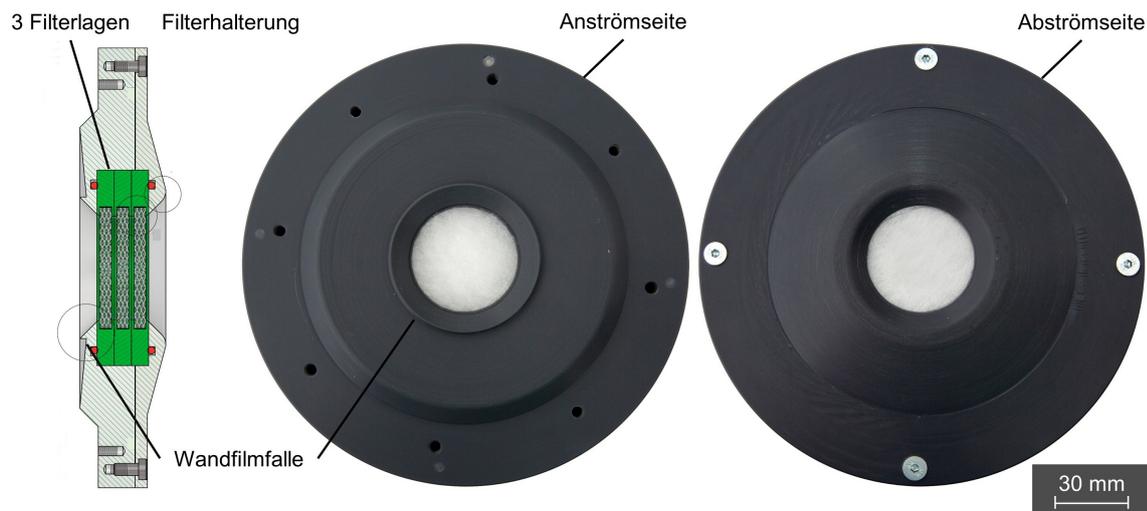


Abbildung 4.8: Zeichnung des Querschnitts und Fotos der Anström- und Abströmseite der Filterhalterung für Tiefenfilter.

um ihre Struktur nicht zu beeinflussen, nicht geklemmt, sondern wie in industriellen Anwendungen in eigene Halterungen in Form von PVC-Ringen eingeklebt. Als Kleber wurde flüssiger Alleskleber und Kraftkleber Gel (UHU, Bühl, DE) verwendet. Das Trennen in Lagen vor Versuchsbeginn ermöglicht anschließend die Untersuchung der Partikelmaterialverteilung durch gravimetrische Analyse der nun dünneren Filterlagen. Ein nachträgliches Aufteilen des Filtermediums in unterschiedliche Lagen ist nicht ohne Beschädigung der Partikelstrukturen möglich. Die drei Filterlagen, eingeklebt in Ringe aus PVC, werden anschließend in eine Halterung aus zwei miteinander verschraubten Ringe geklemmt (siehe Abbildung 4.8). Als Dichtungen dienen PTFE-Ringe mit einer Dicke von 0,2 mm. Um bei unveränderter Partikelerzeugung und gleichbleibendem Volumenstrom die für das Filtermedium im Betrieb vorgesehene Anströmgeschwindigkeit von $u = 25 \text{ cm/s}$ zu erzielen, ist die Anströmfläche des Filters auf 14 cm^2 reduziert. Da das Tiefenfiltermedium inhomogen ist, was durch visuelle Sichtprüfung festgestellt wurde, und sich die Filterlagen zusätzlich durch das Kleben in den PVC-Ringen unterscheiden, werden die Tiefenfilter nach Partikelbelastung mit K_2SO_4 und gravimetrischer Untersuchung ausgewaschen (ca. 4 l Wasser), getrocknet und wiederverwendet, um Einflüsse der variierenden Medienstruktur und des Klebens auf die Versuchsergebnisse zu vermeiden.

4.3.4 Optische Beobachtung der Filteranström- und -abströmseite im Betrieb

Während der Versuche werden Anström- und Abströmseite simultan optisch beobachtet. Abbildung 4.9 zeigt ein Foto der Anordnung des Aufbaus zur optischen Beobachtung der Anström- und Abströmseite.

Ein Endoskop mit 30° Blickrichtung und Beleuchtungsring am Endoskop (model standard boroscope, Leitner, Ansbach, DE) mit einer Kamera, The Imaging Source model DKF 264 (The Imaging

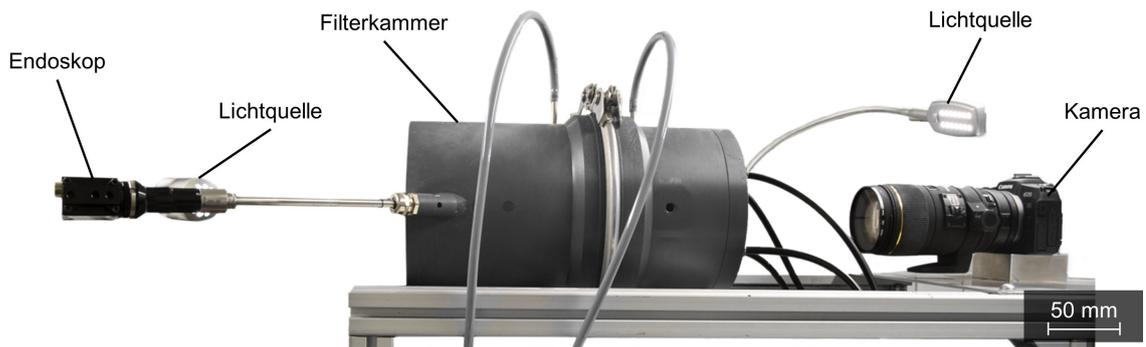


Abbildung 4.9: Aufbau zur optischen Beobachtung der Filteranström- und abströmseite.

Source, Bremen, DE: 5 Megapixel, 38 Bilder/s) nimmt die Anströmseite des Filters während der Versuche auf. Die Abströmseite wurde zeitgleich mit einer Canon model EOS RP (Canon, Krefeld, DE: 26 Megapixel, 60 Bilder/s) und einem Objektiv Sigma model EX APO Makro HSM (SIGMA, Rödermark, DE) aufgenommen. Bei Bedarf wurden damit Fotos und Videos von Anström- und Abströmseite gemacht, die in Kapitel 7 zur Untersuchung des Einflusses der Benetzbarkeit von Filtermedien auf die Penetration von löslichen Partikeln beitragen. Zur Vorbeugung gegen Kondensat auf der Scheibe der Filterkammer wurde diese mit einer wässrigen Lösung mit Polyperfluoromethylisopropylether (u.a.) beschichtet. Das Endoskop ist zu jeder Zeit eingebaut, um die Strömungsbedingungen konstant und vergleichbar zu halten. Es ist in einem Arbeitsabstand von 7 cm eingebaut, was dem 10-fachen Außendurchmesser des Endoskopschafts entspricht und so die Strömung unmittelbar vor dem Filter im Sichtfenster nicht beeinflusst.

4.4 Versuchsdurchführung

Alle Versuche mit Kuchenbildung wurden bei einer konstanten Anströmgeschwindigkeit von $u = 3,5 \text{ cm/s}$ durchgeführt, die typisch für Oberflächenfilter ist. In Kapitel 8 wird dargestellt, wie die Tiefenfilter (siehe Tabelle 4.3 Nr. 3) mit einer für diese Filter vom Hersteller empfohlenen Anströmgeschwindigkeit von $u = 25 \text{ cm/s}$ beladen werden. Durch die geringen Anströmgeschwindigkeiten und Partikelgrößen ist Partikelabprall (siehe Kapitel 2) vernachlässigbar. Jeder Versuch besteht, sofern nicht explizit anders erläutert, aus der Vorbereitung, Partikelbeladung mit Salz und/oder Glas, Wasserbeaufschlagung und Trocknung, gefolgt von Nachbereitung und Analyse nach dem Versuch. Um die Partikelbeladung der Filter zu bestimmen, wird ein Satz von Filtern nach der Partikelbeladung aus der Anlage genommen und es erfolgt eine Nachbereitung analog zur Versuchsdurchführung. Die Schritte der Wasserbeaufschlagung und Trocknung werden übersprungen. Frühzeitig aus der Anlage genommene Filter werden nicht wieder eingebaut und nicht mehr für nachfolgende Schritte verwendet. Bei Analysemethoden wie beispielsweise mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) ist diese Vorgehensweise zwingend notwendig, da die Methode nicht zerstörungsfrei arbeitet. Wenn also Bilder eines beladenen Filters außerhalb des Prüfstandes vor und nach der Wasserbeaufschlagung und Trocknung verglichen werden, handelt es sich dabei um Aufnahmen zweier verschiedener, repräsentativer Filter. Der optische Aufbau aus Kamera

und Endoskop ermöglicht die Beobachtung der Anström- und Abströmseite jederzeit während des Versuches, sodass bei Bedarf Fotos und Videos gemacht werden (siehe Kapitel 4.3.4).

4.4.1 Vorbereitung

Vor der Verwendung in einem Versuch wird jede Filterrunde 24 h bei 20 °C und 40 % rel. Luftfeuchtigkeit konditioniert und anschließend ausgewogen. Die Konditionierung vor (sowie nach) dem Versuch ist zwingend erforderlich, um definierte, vergleichbare Bedingungen für die Wägung zu schaffen. Nach Montage der Filterhalterung in der Anlage wird die Anlagensteuerung gestartet.

4.4.2 Partikelbeladung

Der Filter wird mit Salzpartikeln und/oder Glaskugeln in einem trockenen Gasstrom mit einer rel. Luftfeuchtigkeit von weniger als 15 % beladen, sofern nicht explizit anders erläutert. Für die Beladung von Oberflächenfiltern wurde, wenn nicht explizit anders erläutert, für den zentralen Versuch einer Versuchsreihe ein maximaler Differenzdruck von 10 mbar, als typischer maximaler Differenzdruck vor der Abreinigung von Oberflächenfiltern, gewählt. In Kapitel 5 werden Filter mit reiner Salzbeladung miteinander verglichen, sodass jeder Filter bis zu einem maximalen Differenzdruck von 10 mbar beladen wird. Bei dem Vergleich von Salz- und glasbeladenen Filtern, der in Kapitel 6 und Kapitel 7 relevant wird, ist hingegen der Versuch mit dem niedrigsten stabilen Salz-Glas-Verhältnis (experimentell ermittelt, 1:2) der zentrale Versuch, der bis zu einem Enddifferenzdruck von 10 mbar beladen wird. Abbildung 4.10 zeigt charakteristische Differenzdruckverläufe der Versuchsreihe zum Vergleich von Salz- und Glasbeladungen an der Versuchsanlage zur Langzeitbeaufschlagung mit Filter Nr. 2 (siehe Tabelle 4.3) während der Beladungsphase.

Bei mehreren Wiederholungen wird ein Differenzdruck von 10 mbar bei einer Salz-Glasbeladung (1:2) im Durchschnitt nach 6,2 h erreicht, was einer Beladung von $131 \text{ mg} \pm 2 \text{ mg K}_2\text{SO}_4$ ($13,1 \text{ g/m}^2$) und $262 \text{ mg} \pm 6 \text{ mg Glas}$ ($26,2 \text{ g/m}^2$) entspricht. Um einen direkten Vergleich der Salzmengen auf den Filtern und in der Drainage zu ermöglichen, werden Filter mit reiner Salzbeladung über die gleiche durchschnittliche Beladungszeit von 6,2 h beladen. Dies entspricht der gleichen Gesamtmasse von $131 \text{ mg} \pm 2 \text{ mg Salz}$. Während der Salzbeladung wird das erzeugte Aerosol mit partikelfreier Druckluft verdünnt, um die Anströmgeschwindigkeit von $u = 3,5 \text{ cm/s}$ zu erreichen. Die Beladungszeit von 6,2 h wurde auch für den glasbeladenen Filter verwendet. Da eine Beladung mit 262 mg Glas jedoch zu einem Anstieg des Differenzdrucks von lediglich 0,8 mbar führt, wurde durch Anpassen der Glaskugelsonzentration eine höhere Massenbeladung von 1000 mg gewählt, um einen deutlicheren Anstieg des Differenzdrucks zu erreichen und damit, durch ausgeprägtere Änderungen im Differenzdruck, weniger Raum für Fehlinterpretationen zu erlauben. Wie mit Hilfstangenten in Abbildung 4.10 angedeutet ist, entspricht die Beladungszeit von 6,2 h bei allen Filtern einer Partikelbeladung im Bereich der Oberflächenfiltration.

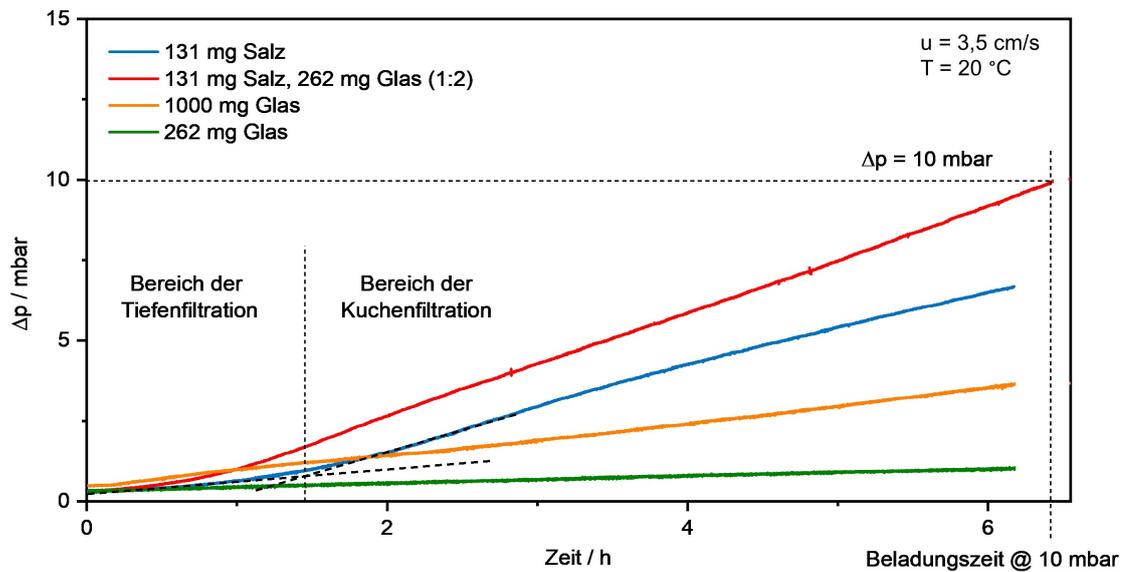


Abbildung 4.10: Differenzdruckverläufe während der Partikelbeladung zum Vergleich von salz- und glasbeladenen Filtern an der Versuchsanlage zur Langzeitbeaufschlagung mit Filter Nr. 2 (siehe Tabelle 4.3), K_2SO_4 und Glas eines salzbeladenen, eines salz-glasbeladenen (Verhältnis 1:2) und des glasbeladenen Filters.

Um den Filterkuchen stabil zu halten und vor Einflüssen von Feuchtigkeitsschwankungen oder abrupter Strömungsänderung zu schützen, wird der Filter für mindestens 20 min bis zum Start der Wasserbeaufschlagung mit trockener Druckluft (rel. Luftfeuchtigkeit $< 10\%$) durchströmt. Da bei einer Abschaltung der Partikelgenerierung der Verdünnungsvolumenstrom unverändert zur Konditionierung, der Vermeidung von Feuchteschwankungen und damit Stabilitätswahrung der Partikelstrukturen, verwendet wurde, ist die Anströmgeschwindigkeit in dieser Phase nahezu konstant bei einem Wert zwischen 2,5 cm/s und 3,5 cm/s abhängig von den Beladungsparametern. Auf eine Nachregelung dessen und damit mögliches Überschreiten der Anströmgeschwindigkeit von $u = 3,5$ cm/s wurde verzichtet.

4.4.3 Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit oder Wassertropfen

Bei einer Kurzzeitbeaufschlagung wird der Filter im zweiten Schritt der Durchführung 25 min mit rel. Luftfeuchtigkeit oder Wassertropfen beaufschlagt. Experimentelle Untersuchungen zeigten, dass diese Beaufschlagungszeit und die damit in diesem Aufbau assoziierten Beaufschlagungsmengen für aussagekräftige Analysen der Beobachtungen geeignet sind.

Bei einer Langzeitbeaufschlagung wird der Filter Wassertropfen ausgesetzt bis eine abströmseitige Drainage der Flüssigkeit einsetzt, die 70 min lang aufgefangen wird. Die Drainagedauer wurde im Hinblick auf die Gesamtversuchsdauer und die Größe des Anlagenabschnitts zum Wassereintrag gewählt. Bei ausbleibender Drainage wird der Filter noch mindestens 6 h beladen. Danach ist ein Einsetzen der Drainage, auf Basis der in dieser Arbeit gesammelten Erfahrung, bei dem vorliegenden Stoffsystem nicht mehr wahrscheinlich. Bei einem Einsetzen einer Drainage wird die

Drainageflüssigkeit, während der Filter weiterhin den Wassertropfen ausgesetzt ist, in einzelnen Aluminiumschalen aufgefangen und, um Rückschlüsse auf enthaltenes lösliches oder unlösliches Partikelmaterial zu erhalten, wie folgt analysiert:

Vor Verwendung erfolgt eine Reinigung der Schalen mit Wasser und Isopropanol, Erhitzen auf 100 °C und Konditionierung für 4 h bei 40 % rel. Luftfeuchtigkeit und einer Temperatur von 20 °C. Dadurch werden alle Verunreinigungen entfernt, um stabile, reproduzierbare Bedingungen für präzise Gewichtsmessungen zu gewährleisten. Jede Schale wird vor und nach dem Auffangen der Drainage gewogen $\pm 0,1$ mg (Mettler Toledo, Gießen, DE). Die Proben mit Drainage werden dann auf 100 °C erhitzt, um das Wasser zu verdampfen. Nach erneuter Konditionierung für 4 h bei 40 % rel. Luftfeuchtigkeit und 20 °C ist durch erneute Wägung die Masse des verbleibenden Materials in jeder Probe zu ermitteln. Durch anschließendes Spülen der Schalen mit Wasser entsteht eine Lösung, die aufgefangen und durch einen Polycarbonat (PC)-Membranfilter mit einer Porengröße von 0,2 μm filtriert wird. Der Gewichtsunterschied zwischen der Membran vor und nach dem Experiment ist das Gewicht des unlöslichen Materials, das durch das Filtermedium penetriert und in der Drainage abgefließen ist. Die Aluminiumschalen werden anschließend abermals mit Wasser und Isopropanol gewaschen und für 4 h bei 40 % rel. Luftfeuchtigkeit und 20 °C konditioniert, um zu überprüfen, ob ihr Gewicht während des gesamten Versuchs konstant geblieben ist. Beim Auftreten von Fehlproben (nicht konstantem Gewicht der Schalen) wurden die Ergebnisse der gesamten Drainageauswertung dieses Filters verworfen, da sich die spezifische Fehlerursache nicht rückblickend ermitteln lässt.

4.4.4 Trocknung

Alle Filter werden vor Entnahme aus dem Versuchsstand und vor jeder weiteren Analyse mit einem partikelfreien Luftstrom mit einer rel. Luftfeuchtigkeit < 10 % bei unveränderter Temperatur und Anströmgeschwindigkeit getrocknet. Dafür wird an beiden Anlagen manuell die Wasserzufuhr geschlossen und anschließend der Anschluss für die Durchströmung mit trockener Druckluft direkt vor der Filterkammer geöffnet. Nach einer Wasserbeaufschlagung wird jeder Filter getrocknet bis der Feuchtesensor auf der Reingasseite der Filterkammer eine rel. Luftfeuchtigkeit < 25 % misst.

4.4.5 Nachbereitung

Nach ihrer Trocknung werden die Filtermedien aus der Anlage und ihren Halterungen genommen. Nach 24 h Konditionierung bei 40 % rel. Luftfeuchtigkeit und 20 °C werden die Filtermedien gewogen $\pm 0,1$ mg (Mettler Toledo, Gießen, DE). Nach Entnahme des Filters aus der Anlage wird bei Langzeitversuchen die anströmseitige Wandfilmfalle geleert und analog zu einer Drainageprobe ausgewertet. Die Anlage wird vollständig gereinigt. Im Falle der Langzeitbeaufschlagung wird auch die Linse des Endoskops gesäubert.

4.5 Charakterisierung von Filtern und Filtermedien

4.5.1 REM, EDX und μ -CT

Eine Untersuchung der Filtermedien mit abgeschiedenem Material findet mittels REM, Energiedispersiver Röntgenspektroskopie, engl. energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) und 3D-Analyse mittels Röntgen-Mikrotomographie, engl. micro-computed tomography (μ -CT) statt um Rückschlüsse auf Umlagerungen und Strukturänderungen schließen zu können. Präparate für REM-Aufnahmen und EDX-Analyse sind mit Skalpell herausgeschnittene Proben mit quadratischer Grundfläche mit einer Kantenlänge von 1 cm mit einer Sputterschicht aus Palladium mit einer nominellen Dicke von 4,5 nm. Die μ -CT-Scans wurden mit einem ZEISS Xradia 520 Versa (Oberkochen, DE) erstellt. Das μ -CT besteht im Wesentlichen aus einer Röntgenquelle und einem digitalen Detektor, zwischen denen die Probe auf einem sich axial drehenden Probenhalter befestigt wird. Die Röntgenstrahlen schwächen beim Durchgang durch das Material abhängig von dessen physikalischen Eigenschaften ab und werden vom Detektor erfasst. Die erhaltenen Daten werden als Stapel von 2D-Schnitten rekonstruiert. Abhängig von der Materialdichte und der Ordnungszahl wird ein Schwellenwert für jedes Pixel ausgewählt, sodass die 2D-Schnitte die Materialphasen der Probe zeigen. Das erste Bestrahlen der Probe kann zu ihrer thermischen Ausdehnung führen, was die initiale Aufnahme beeinträchtigt. Daher wird vor einem Übersichtsscan und einem Detailscan immer ein Aufwärmescan der Probe gemacht, der anschließend verworfen wird. Nähere Details zur Analyse mit μ -CT finden sich in anderer Literatur (z.B. [104]). Zur Analyse mit μ -CT werden aus dem Filter Proben von 0,5 cm x 2 cm herausgeschnitten. Da durch das Schneiden des Filters Salz mobilisiert und Salzkrusten aufgebrochen werden könnten, wurde die Probengröße größer als der Scanbereich gewählt. Aufgrund der Stabilität der Filtermedien selbst musste keine Stützstruktur verwendet werden. Nach einem Aufwärmescan erreichte der Hauptscan der gesamten Tiefe des Filters eine Voxelgröße (dreidimensionaler Pixel) von 1,02 μ m. Ein Detailscan aus der Mitte des Filters liefert zusätzlich eine Voxelgröße von 0,67 μ m. Da Objekte ab der ca. zehnfachen Größe der Voxelgröße noch ausreichend gut segmentiert werden können, liegt die erreichte minimale Auflösung für dieses Stoffsystem bei etwa 6,7 μ m. Für die Segmentierung des rekonstruierten Stapels von 2D-Bildern aus dem μ -CT wird die Software Dragonfly (V. 2021.2 für Windows) (Object Research Systems (ORS) Inc., Montreal, CA, USA) verwendet. Nach der Segmentierung mit dem Deep-Learning-Tool in Dragonfly wurden kleine Materialspuren (nahe an der Grenze der minimalen Auflösung) einzeln betrachtet, um zwischen Salzspuren und Artefakten unterscheiden zu können.

Die Ergebnisse der REM-, EDX- und μ -CT-Analyse zeigen den Zustand der Filter und des Partikelmaterials nach Konditionierung. Da eine rel. Luftfeuchtigkeit von 40 % unter der Deliqueszenzfeuchte der verwendeten Salze liegt, ist nicht zu erwarten, dass die Salzkristalle nach den Versuchen während der Konditionierung ihren Zustand ändern. Die Ergebnisse beschreiben daher den Ist-Zustand der Filter bei Versuchsende in der Anlage. Eine leichte Formänderung durch hygroskopische

Vorgänge zwischen Entnahme aus der Anlage und Analyse kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Eine Analyse mit Durchlicht nach Langzeitversuchen wäre naheliegend aufgrund von Untersuchungen mit Ölnebeln (z.B. [48]). Zur Überprüfung der Wasserverteilung im Filter ist aufgrund der Materialeigenschaften (Filtermaterial und Dicke) der Filter (Tabelle 4.3 Nr. 2, Nr. 3) nicht möglich.

4.5.2 Fraktionsabscheidegradmessungen

Für die Untersuchung der Langzeitbeaufschlagung von Oberflächenfiltern wird ein zusätzlicher Satz von Filtern vorbereitet und der Standarddurchführung (siehe Kapitel 4.4) unterzogen, wobei zusätzlich der Fraktionsabscheidegrad mit einem SMPS (TSI GmbH, Aachen, DE) gemessen wird. Um eine ausreichend hohe Anzahlkonzentration von ≥ 100 Partikeln/cm³ in jeder Größenklasse zu erreichen, wurde ein K₂SO₄-Aerosol erzeugt, indem eine 20 g/l-Lösung bei einem Volumenstrom von 4 l/min mit partikelfreier Luft bis zum Zielvolumenstrom entsprechend einer Anströmgeschwindigkeit von $u = 3,5$ cm/s verdünnt wird. Abbildung 4.11 zeigt die Partikelgrößenverteilung von K₂SO₄ für die Fraktionsabscheidegradmessungen.

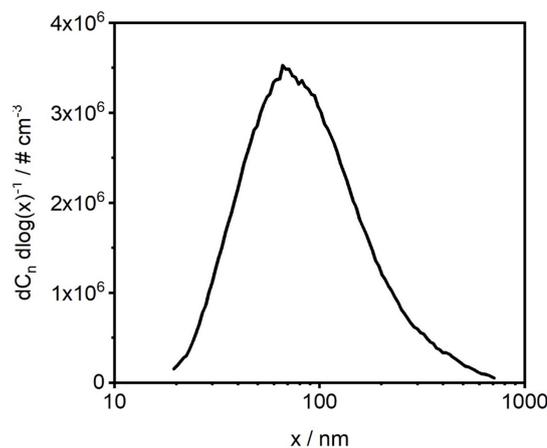


Abbildung 4.11: Partikelgrößenverteilung von K₂SO₄ für die Fraktionsabscheidegradmessungen.

Die Probenahme für das SMPS ist auf der Reingasseite der Filterkammer installiert. Eine isokinetische Probenahme ist nicht erforderlich, da in der Anlage ausschließlich mit kleinen Salzpartikeln ($x_{50,0} < 100$ nm) gearbeitet wurde, die aufgrund ihrer geringen Trägheit der Strömung nahezu ideal folgen [98]. Für die Messung der Partikelgrößenverteilung im Rohgas wird das Testaerosol, das die Filterkammer passiert, ohne eingebauten Filter gemessen. Die Partikelgrößenverteilung im Reingas wird während des Versuchs dreimal gemessen: vor der Filterbeladung, nach der Kuchenbildung und nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen mit anschließender Durchströmungstrocknung des Filters. Durch die Exposition mit dem Prüfaerosol werden die Filter mit 2,0 mg/cm² beladen. Die Verwendung eines zusätzlichen Filtersatzes für die Messungen des Fraktionsabscheidegrads

schließt eine Beeinflussung der anderen Ergebnisse (REM-Bilder und Differenzdruck) durch dieses zusätzliche Salz aus.

5 Kurzzeitbeaufschlagung von Filterkuchen aus Salz mit Wasser im gasförmigen und flüssigen Zustand - Umlagerung¹

Vier Szenarien, die bei einer Beaufschlagung von Filtern, beladen mit löslichen Filterkuchen, mit Wassertropfen auftreten können, wurden in Kapitel 3 identifiziert und beschrieben. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass das erste zu untersuchende Szenario, die Umlagerung des abgeschiedenen Partikelmaterials durch Beaufschlagung mit Wassertropfen, schon bei kurzer Beaufschlagungsdauer einen messbaren Einfluss auf das Betriebsverhalten des Filters, insbesondere den Differenzdruck, hat. Das folgende Kapitel fasst die Herangehensweise und den Versuchsablauf zusammen, bevor die Ergebnisse in den folgenden Unterkapiteln diskutiert werden.

Aus der Literatur ist bekannt, dass die Beaufschlagung eines beladenen Filters allein mit erhöhter rel. Luftfeuchtigkeit bereits zur irreversiblen Reduktion des Differenzdrucks führen kann [22, 33, 34]. Bei konstanter Anströmgeschwindigkeit während der Beaufschlagung ist eine Änderung des Differenzdrucks ein erstes Indiz, ob es zu Veränderungen im Filtermedium oder Filterkuchen kommt, bzw. ob Materialumlagerungen auftreten. Der Einfluss der Beaufschlagung mit Wassertropfen auf den Differenzdruck wurde bislang nicht ermittelt. Ferner ist bislang unklar, ob die Beschaffenheit und Eigenschaften des löslichen Materials selbst (z.B. seine Deliqueszenzfeuchte) einen Einfluss auf eine eventuelle Umlagerung des Materials haben.

In diesem Kapitel wird entsprechend dem Szenario der Partikelumlagerung geklärt, welche Auswirkung die Wassermenge während einer Beaufschlagung, gasförmig angegeben als rel. Luftfeuchtigkeit und flüssig vorliegend als Tropfen, auf den Differenzdruck und die Partikelumlagerung hat. Das erfolgt am Beispiel von K_2SO_4 -beladenen Filtern. Anschließend zeigt eine Wiederholung der Versuche mit drei Salzen mit unterschiedlicher Deliqueszenzfeuchte und Löslichkeit (NaCl, KCl und K_2SO_4 , siehe Tabelle 4.1), inwieweit auch das lösliche Partikelmaterial selbst den Differenzdruck und die Partikelumlagerung beeinflusst.

Damit ergibt sich für die Kurzzeitbeaufschlagung folgendes konkretes Versuchsszenario: In einer eigens für diese Versuche gebauten Anlage zur Kurzzeitbeaufschlagung (siehe Kapitel 4.2) werden hydrophobe Filtermedien (Tabelle 4.3, Nr. 1) sofern nicht explizit anders angegeben mit Salz bis

¹ Inhalte dieses Kapitels wurden in *Separation and Purification Technology* veröffentlicht und mit Erlaubnis von Elsevier für diese Dissertation angepasst. Almuth D. Schwarz, Jörg Meyer, and Achim Dittler. Interaction of Water Droplets With Soluble Filter Cakes in Gas Cleaning Applications. *Separation and Purification Technology*, 259:118-128, 2021. [105]

10 mbar, einem typischen maximalen Differenzdruck vor der Abreinigung von Oberflächenfiltern, beladen. Anschließend werden die Filtermedien einmalig über einen Zeitraum von 25 min mit drei unterschiedlichen Mengen an Wasser, bezogen auf die Gasphase und die disperse Flüssigphase, beaufschlagt und anschließend getrocknet. Anknüpfend an den aktuellen Stand der Literatur und für den direkten Vergleich zwischen Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit und Wassertropfen wird einmal eine hohe rel. Luftfeuchtigkeit $> 85\%$ ohne Wassertropfen zur Beaufschlagung verwendet und in zwei Fällen mit Wassertropfen ($219\text{ g Wassertropfen /m}^2$ oder $506\text{ g Wassertropfen /m}^2$) beaufschlagt. Die kontinuierliche Aufzeichnung des Differenzdrucks gibt Auskunft über das Betriebsverhalten der Filtermedien während der Versuche. REM-Aufnahmen zeigen die trockenen Partikelstrukturen vor der Wasserbeaufschlagung und nach Wasserbeaufschlagung inklusive abschließender Durchströmungstrocknung und lassen Rückschlüsse auf deren strukturelle Veränderung und Umlagerung zu. Weitere Details zur Durchführung finden sich in Kapitel 4.4. In diesem Kapitel werden Abbildungen und Verläufe einzelner Versuche aus den Versuchsreihen gezeigt, welche die Ergebnisse repräsentativ darstellen.

5.1 Einfluss der Wassermenge auf Differenzdruckverlauf und Salzverbleib

Aus der Kurzzeitbeaufschlagung von K_2SO_4 -beladenen Filtern mit Wasser (rel. Luftfeuchtigkeit $> 85\%$ ohne Tropfen, $219\text{ g Wassertropfen /m}^2$ oder $506\text{ g Wassertropfen /m}^2$) und anschließender Durchströmungstrocknung ergibt sich ein charakteristischer Differenzdruckverlauf als erstes Ergebnis dieser Arbeit. Abbildung 5.1 zeigt den charakteristischen Verlauf des Differenzdrucks und der abströmseitig gemessenen rel. Luftfeuchtigkeit am Beispiel eines K_2SO_4 -beladenen Filters mit Beaufschlagung mit $219\text{ g Wassertropfen /m}^2$. Der Versuch gliedert sich in die differenzdruckgesteuerte Salzbeladung bis 10 mbar, was einer Beladung von $11,4\text{ g/m}^2\text{ K}_2\text{SO}_4$ entspricht, die Konditionierungsphase, welche in folgenden Analysen aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht mehr explizit gezeigt ist, die Beaufschlagung mit $219\text{ g Wassertropfen /m}^2$ und die Durchströmungstrocknung des Filters.

Während der Beladung mit K_2SO_4 -Partikeln steigt der Differenzdruck nach den ersten 75 min linear an. Dies zeigt, dass sich nach anfänglicher Tiefenfiltration mit anschließender Clogging-Phase ein Filterkuchen ausgebildet hat und die Oberflächenfiltration folgt. Der Beladungsverlauf entspricht damit den grundlegenden Kenntnissen zu Differenzdruckverläufen aus der Literatur (siehe Kapitel 2.1).

Während der Konditionierung des Filters mit partikelfreier Luft mit rel. Luftfeuchtigkeit $< 10\%$ sinkt der Differenzdruck leicht von 10 mbar auf 9,7 mbar. Die Abnahme des Differenzdrucks kann durch einen leichten Druckstoß während der abrupten Beendigung der Salzfiltration im ersten Schritt verursacht worden sein. Da diese Abnahme weniger als 5% des gewünschten Zielwertes ausmacht, ist nicht anzunehmen, dass sie Einfluss auf die weitere Entwicklung des Differenzdrucks

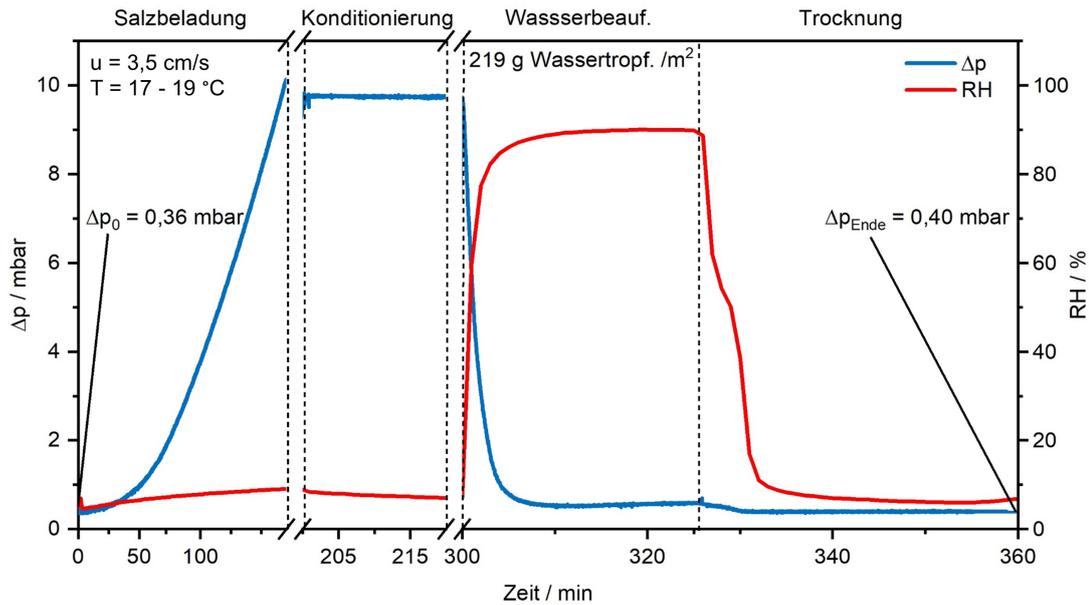


Abbildung 5.1: Differenzdruck (Δp) mit abströmseitig gemessener rel. Luftfeuchtigkeit eines hydrophoben Oberflächenfilters während der Beladung mit K_2SO_4 , der Konditionierung mit partikelfreier Luft, der Beaufschlagung mit $219 \text{ g Wassertropf. /m}^2$ innerhalb 25 min und der Durchströmungstrocknung.

hat. Der Differenzdruck bleibt während der gesamten Konditionierung konstant. Von dem konstanten Druckniveau ist auf einen stabilen Filterkuchen ohne jegliche Umstrukturierung der Partikeln während der weiteren Durchströmung zurückzuschließen.

Während der Beaufschlagung mit Wasser zeigt sich ein sofortiger, steiler Abfall des Differenzdrucks auf Werte knapp oberhalb vom Δp_0 . Gegen Ende der Wasserbeaufschlagung ist ein leichter Anstieg des Differenzdrucks zu beobachten. Der Differenzdruck sinkt beim Start der Beaufschlagung, weil die Wassertropfenabscheidung und Durchströmung des Filters mit gesättigter Luft dazu führt, dass sich Flüssigkeit im Filterkuchen ansammelt, wodurch sich das Salz, und damit der Filterkuchen, löst. Der Filter operiert ohne Filterkuchen nicht mehr im Bereich der Oberflächenfiltration, was auch anhand des niedrigen Differenzdrucks nach Start der Beaufschlagung, der vom Filtermedium selbst dominiert ist (Δp_0), festzustellen ist (siehe Erklärungen zum Differenzdruckverlauf bei Tiefen- und Oberflächenfiltration zu Abbildung 2.3). Eine Analyse mittels REM-Aufnahmen, welche die Veränderung des abgeschiedenen Salzes auf der Anströmseite des Filtermediums zeigt, folgt später (siehe unten). Der abfallende Differenzdruck bei Beaufschlagung mit Wassertropfen entspricht Beobachtungen aus der Literatur von beladenen Filtern mit Salzanteil bei Beaufschlagung mit einer rel. Luftfeuchtigkeit sowohl unter [22] als auch über [26] der Deliqueszenzfeuchte des verwendeten Salzes. Der Abfall des Differenzdrucks bei Beaufschlagung mit Wassertropfen wurde in einer folgenden Publikation auch von Pei bestätigt [106]. Der erneute leichte Anstieg des Differenzdrucks während der anhaltenden Beaufschlagung mit Wassertropfen tritt auf, weil die gebildete Salzlösung einen Teil der Filteranströmseite füllt und die Flüssigkeitsmenge mit fortschreitender Beaufschlagung mit Wassertropfen ansteigt. Dieser Anstieg des Differenzdrucks resultiert bei Koaleszenzfiltern während der Beaufschlagung mit Ölnebel aus einer Ansammlung

von Flüssigkeit am Filter [47]. Dass der steigende Differenzdruck bei andauernder Beaufschlagung mit Wassertropfen in den vorliegenden Versuchen auf die Ansammlung von Lösung am Filter zurückzuführen ist, wird zusätzlich in Kapitel 7, zur Untersuchung des Einflusses der Benetzbarkeit des Filtermediums, anhand von Endoskopaufnahmen gezeigt.

Bei Beaufschlagung mit Wassertropfen steigt die rel. Luftfeuchtigkeit abströmseitig initial steil an, erreicht aber nicht 100 %, sondern ca. 90 %. Anströmseitiges Messen der rel. Luftfeuchtigkeit bestätigt eine rel. Luftfeuchtigkeit von 100 % während der Beaufschlagung mit Wassertropfen und damit, dass die rel. Luftfeuchtigkeit abströmseitig geringer ist als anströmseitig. Dass die rel. Luftfeuchtigkeit abströmseitig des Filters unter 100 % fällt, ist auf das Verbleiben von Wasser im System und den Austrag von Wasser aus der Gasphase zurückzuführen. Das kann durch Kondensieren bei Temperaturschwankungen und Abscheidung von Wasser an den Wänden und der Wasseraufnahme des Salzes aus der Flüssig- und aus der Gasphase, was zur Lösung des Salzes führt, auftreten. Die Aufnahme von Wasser des Filtermediums kann prinzipiell auch zu der niedrigeren abströmseitigen rel. Luftfeuchtigkeit beitragen, ist aber aufgrund der hydrophoben Beschaffenheit des Filtermediums vernachlässigbar. In Versuchen von Horst et. al. [26] wurde ein Abfall der rel. Luftfeuchtigkeit von 80 % anströmseitig auf ca. 75 % abströmseitig bei Durchströmung von beladenen Oberflächenfiltern aus Polyester beobachtet. Dieser Abfall in der rel. Luftfeuchtigkeit wurde in den Untersuchungen vollständig der Wasseraufnahme einer Salzfraktion im Filterkuchen (entsprechend 1 mbar Differenzdruck bei Beladung) zugeschrieben.

Im abschließenden Trocknungsschritt wird das Filtermedium mit Luft mit einer rel. Luftfeuchtigkeit $< 10\%$ durchströmt. Die Durchströmung reduziert die abströmseitig vom Filtermedium gemessene rel. Luftfeuchtigkeit während das System, bestehend aus Filtermedium und Salzlösung, trocknet und Wasser an den Luftstrom abgibt. Der Differenzdruck sinkt auf einen Enddifferenzdruck annähernd dem Δp_0 , dem ursprünglichen Differenzdruck des trockenen unbeladenen Filters. Die Lösung trocknet und gibt die Anströmseite des Filters frei. Das Salz kristallisiert an den Faseroberflächen aus und beeinflusst den Differenzdruck wenig. Die rel. Luftfeuchtigkeit fällt schnell ab und nähert sich der rel. Luftfeuchtigkeit des trockenen Gasstroms auf der Anströmseite, sobald der Differenzdruck stabil nahe dem Δp_0 ist. Zwischen 60 % und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit reduziert sich die Abnahmerate der abströmseitig gemessenen rel. Luftfeuchtigkeit, wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist. Die Trocknung, also der Stofftransport von den Oberflächen, die mit Lösung oder Wasser benetzt sind, an die Gasphase, hängt von der Oberfläche und von der Lösungskonzentration bzw. den Dampfdrücken über der Phasengrenze ab. Im Verlauf der Trocknung nimmt der Stofftransport ab, da sich die Oberfläche reduziert und die Lösungskonzentration steigt, wodurch der Dampfdruck abnimmt (siehe Tabelle 4.2). Während der Effloreszenz kristallisiert das Salz durch spontane Abgabe vergleichsweise großer Mengen Wasser. Das führt lokal zu einer konstanten oder sogar zunehmenden rel. Luftfeuchtigkeit und zu einer Reduktion der Abnahmerate der abströmseitig gemessenen rel. Luftfeuchtigkeit im Bereich der Effloreszenzfeuchte. Der Prozess der Effloreszenz findet spontan und lokal variierend, nicht simultan statt [36], weshalb es zu einer Reduktion der

Abnahmerate der abströmseitig gemessenen rel. Luftfeuchtigkeit zwischen 60 % und 50 % kommt. Die Trocknungsoberfläche reduziert sich während der Effloreszenz weiterhin.

Basierend auf diesen Erörterungen ist zu erwarten, dass bei einer Beaufschlagung mit mehr Wasser zum einen ein ausgeprägterer Druckanstieg gegen Ende der Wasserbeaufschlagung durch Akkumulation von Flüssigkeit und zum anderen eine langsamere Trocknung auftritt.

Um dies zu überprüfen wurden K_2SO_4 -beladene Filtermedien mit rel. Luftfeuchtigkeit $> 85\%$, 219 g Wassertropfen / m^2 und 506 g Wassertropfen / m^2 beaufschlagt und anschließend getrocknet. Abbildung 5.2 zeigt für drei repräsentative Filter den Verlauf des Differenzdrucks, als Differenz zwischen Differenzdruck und Δp_0 ($\Delta p - \Delta p_0$), und der rel. Luftfeuchtigkeit während Wasserbeaufschlagung und während der anschließenden Durchströmungstrocknung. Um die Unterschiede in den Verläufen während der Wasserbeaufschlagung deutlich erkennbar zu machen, werden Daten im Druckbereich von 0 bis 2,5 mbar gezeigt.

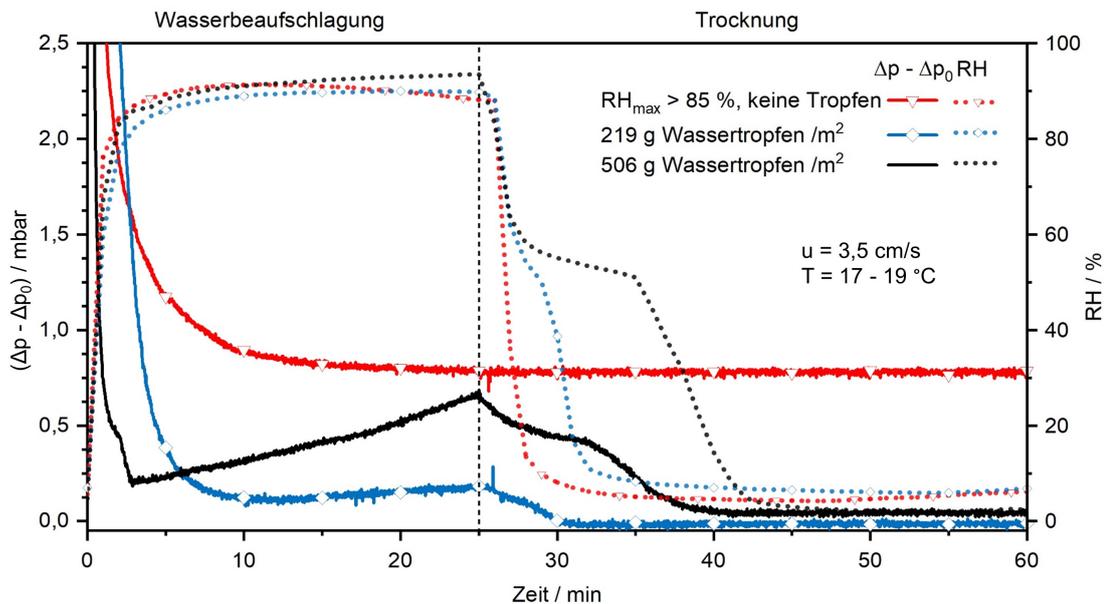


Abbildung 5.2: Differenzdruck ($\Delta p - \Delta p_0$) mit abströmseitig gemessener rel. Luftfeuchtigkeit für K_2SO_4 -beladene Filtermedien während der Beaufschlagung mit hoher rel. Luftfeuchtigkeit $> 85\%$, 219 g Wassertropfen / m^2 und 506 g Wassertropfen / m^2 und anschließender Durchströmungstrocknung. Die Zeit $t = 0$ markiert den Start der Wasserbeaufschlagung.

Ein Vergleich der drei Wassermengen während der Beaufschlagungsphase zeigt am Beispiel von K_2SO_4 , dass mit steigender Wassermenge während der Wasserbeaufschlagung der Differenzdruck schneller abfällt. Im Vergleich zu einem Abfall auf 0,5 mbar bei Beaufschlagung mit 219 g Wassertropfen / m^2 nach weniger als 3 min, fällt der Differenzdruck bei einer Beaufschlagung mit 506 g Wassertropfen / m^2 auf unter 0,25 mbar in derselben Zeit. Mit steigender Wassermenge während der Wasserbeaufschlagung steigt der Differenzdruck gegen Ende der Phase stärker an, bei Beaufschlagung mit 506 g Wassertropfen / m^2 von unter 0,25 mbar auf 0,7 mbar und bei Beaufschlagung mit 219 g Wassertropfen / m^2 von 0,15 mbar auf 0,2 mbar. Der Widerstand des

aus K_2SO_4 -Partikeln gebildeten Filterkuchens nimmt bei Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit $> 85\%$ zwar auch ab (siehe Abbildung 5.2), sinkt jedoch nur auf einen Differenzdruck von mehr als 0,5 mbar über dem ursprünglichen Δp_0 . Die K_2SO_4 -Partikeln haben sich also bei Kontakt mit einer hohen rel. Luftfeuchtigkeit umgelagert, sodass der Filterkuchen nicht mehr in seiner ursprünglichen Form zum Differenzdruck beiträgt. Allerdings tragen die neuen Partikelformationen auf der Filteranströmseite immer noch zu einem Differenzdruck von 0,5 mbar bei, anders als nach Beaufschlagung mit Wassertropfen. Da die rel. Luftfeuchtigkeit $> 85\%$ nah an der Deliqueszenzfeuchte von K_2SO_4 liegt und diese nicht wesentlich übersteigt, ist das Salz während der Kurzzeitbeaufschlagung also nicht vollständig gelöst worden und bildet weiterhin eine Partikelschicht, die zum Differenzdruck beiträgt. Während der Durchströmungstrocknung mit Luft mit rel. Luftfeuchtigkeit $< 10\%$ bleibt der Differenzdruck nach Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit $> 85\%$ konstant, während der Differenzdruck nach Beaufschlagung mit Wassertropfen auf einen Differenzdruck nahe dem Δp_0 abfällt. Nach der Beaufschlagung mit reiner rel. Luftfeuchtigkeit $> 85\%$ fällt die rel. Luftfeuchtigkeit schnell unter 40% . Sie sinkt doppelt so schnell wie nach der Beaufschlagung mit zusätzlichen Tropfen. Die Beaufschlagung des salzbeladenen Filters mit der größten Wassermenge führt zur kleinsten Abnahmerate der rel. Luftfeuchtigkeit, insbesondere zwischen 60% und 50% rel. Luftfeuchtigkeit. Die aus den bisherigen neuen Erkenntnissen abgeleiteten Erwartungen

- bei einer Beaufschlagung mit mehr Wasser, unabhängig vom Aggregatzustand, kommt es zu einem ausgeprägteren Druckanstieg gegen Ende der Wasserbeaufschlagung durch Akkumulation von Flüssigkeit
- bei einer Beaufschlagung mit mehr Wasser, unabhängig vom Aggregatzustand, kommt es zu einer langsameren Trocknung durch Akkumulation von Flüssigkeit

bestätigen sich also. Schlussfolgernd ergibt sich daraus, dass der Differenzdruckanstieg während der Wasserbeaufschlagung durch die Gesamtmenge der im System vorhandenen Flüssigkeit, die Summe der Salzlösung durch Deliqueszenz und der aktiv hinzugefügten Wassertropfen, verursacht wird. Der Anstieg des Differenzdrucks und der Verlauf der rel. Luftfeuchtigkeit während der Durchströmungstrocknung sind somit direkt von der zugefügten Lösungsmittelmenge abhängig. Dies ergänzt und erweitert die Beobachtungen von Montgomery et al. [22], welche ergaben, dass eine größere Differenz zwischen der rel. Luftfeuchtigkeit während einer Beladung und anschließenden Beaufschlagung zu stärker abfallendem Differenzdruck führt. Sie vermuteten, dass dies durch Wasseraufnahme der Partikeln und auf eine dadurch resultierende Umlagerung zurückzuführen sei. Sie bezogen ihre Erkenntnisse allerdings ausschließlich auf rel. Luftfeuchtigkeit und nicht die Wassermenge insgesamt, unabhängig von ihrem Aggregatzustand, flüssig oder gasförmig. Auch Pei [106] hat seitdem Experimente mit Beaufschlagung salzbeladener Filter mit erhöhter rel. Luftfeuchtigkeit ohne Wassertropfen durchgeführt. Wie bei Montgomery et al. [22], führte ein größerer Feuchteunterschied zwischen Beladungsphase und anschließender Beaufschlagungsphase zu einer längeren Stabilisierungsdauer des Differenzdrucks nach Abfall. Pei vermutete, dass dies auf Kapillarkondensation und damit zur Verfügung stehendes Wasser und eine daraus resultierende

schnellere Umlagerung der Partikeln zurückzuführen sei. Dabei beobachtete er auch einen niedrigeren finalen Differenzdruck nach Beaufschlagung mit höherer rel. Luftfeuchtigkeit [106]. Diese Vermutungen wurden bisher jedoch nicht mit Strukturaufnahmen bestätigt.

Eine Untersuchung der Anströmfläche der Filtermedien mit REM nach Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung gibt Hinweise darauf, warum der Differenzdruck durch die Beaufschlagung mit hoher rel. Luftfeuchtigkeit oder Wassertropfen zunächst abrupt absinkt und final auf einem niedrigen Differenzdruck verbleibt. Abbildung 5.3 zeigt REM-Aufnahmen des hydrophoben Glasfasermediums nach der trockenen Beladung des Filters und nach der Beaufschlagung mit den unterschiedlichen Wassermengen, rel. Luftfeuchtigkeit > 85 % ohne Wassertropfen, 219 g Wassertropfen /m², und 506 g Wassertropfen /m², mit anschließender Durchströmungstrocknung.

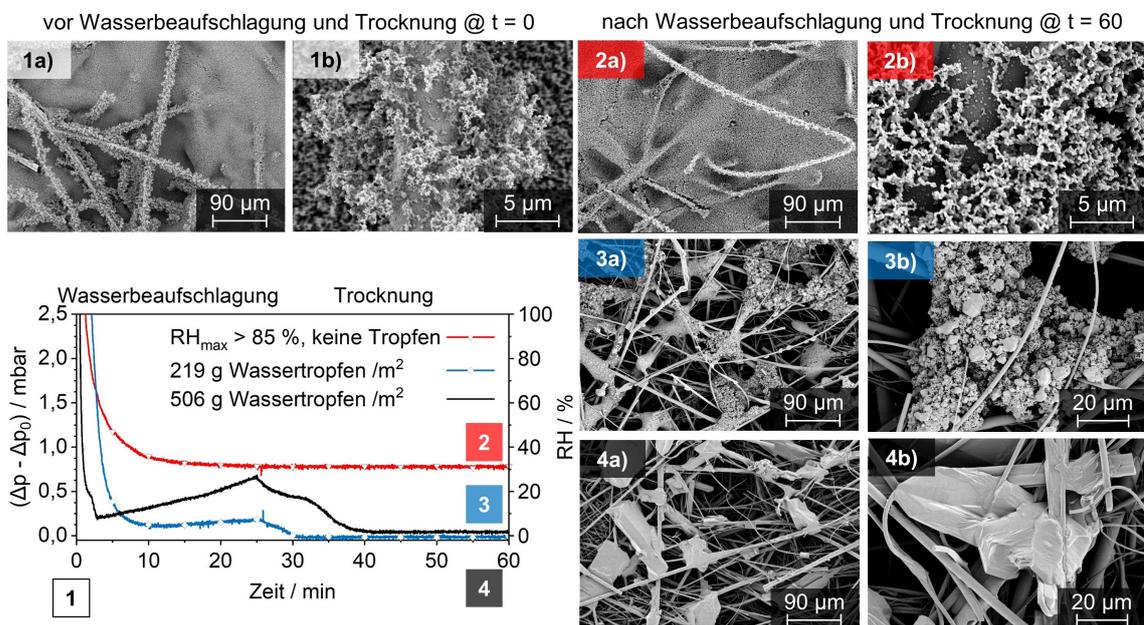


Abbildung 5.3: REM-Aufnahmen der Anströmseite von Filtermedien mit K₂SO₄ (1) nach der Beladung ohne Einfluss von rel. Luftfeuchtigkeit und nach der Beaufschlagung mit (2) rel. Luftfeuchtigkeit > 85 % ohne Wassertropfen, (3) 219 g Wassertropfen /m² und (4) 506 g Wassertropfen /m² und Durchströmungstrocknung in a) Übersichtformat und b) Detailansicht.

Die REM-Aufnahmen zeigen nach der Salzbeladung Dendriten, die das Filtermedium vollständig bedecken und einen Filterkuchen bilden (Abbildung 5.3,1). Die dichte Dendritenstruktur nach dem Kuchenaufbau zeigt bereits durch Beaufschlagung mit hoher rel. Luftfeuchtigkeit ohne Wassertropfen eine Veränderung der Salzstrukturen auf der Anströmseite des Filters. Die Primärpartikeln sind angewachsen und die Dendritenstrukturen führen nach der Umlagerung zu größeren Zwischenräumen zwischen den einzelnen Dendriten, bedecken jedoch weiterhin alle Filterporen (Abbildung 5.3, 2). Die in Abbildung 5.3, 3 und Abbildung 5.3, 4 dargestellten REM-Aufnahmen bestätigen, dass große Bereiche der Filtermedien nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen frei von Salzpartikeln sind und das Partikelmaterial auf wenige Bereiche konzentriert ist. Die Struktur

des Salzes ist dabei abhängig von der Wassermenge. Nach der Beaufschlagung mit 219 g Wassertropfen /m² ist die Oberfläche einiger Salzformationen bereits vollständig aufgelöst, während die darunter liegenden Partikelkollektive intakt bleiben (Abbildung 5.3, 3). Nach der Beaufschlagung mit 506 g Wassertropfen /m² und anschließender Durchströmungstrocknung haben sich einzelne große Salzkristalle gebildet, aus denen keine einzelnen Partikeln ersichtlich sind (Abbildung 5.3, 4)

Ein Vergleich von Abbildung 5.3, 1 mit 5.3, 2 erklärt den zuvor beschriebenen Differenzdruckabfall durch die Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit > 85 % ohne Tropfen. Die Umstrukturierung des Filterkuchens führt zu einem Abfall des Differenzdrucks, während die Poren des Filters weitestgehend bedeckt bleiben, was wiederum in dem finalen Differenzdruck von 0,5 mbar über dem Δp_0 resultiert. Bei Beaufschlagung mit Wassertropfen ist nach initialem Druckabfall ein Anstieg des Differenzdrucks zu beobachten, verursacht durch Ansammlung von Lösung auf der Anströmseite des Filters, und ein sehr niedriger Differenzdruck nach abschließender Durchströmungstrocknung des Filters. Beides deutet darauf hin, dass mehr Salz als bei Beaufschlagung mit reiner erhöhter rel. Luftfeuchtigkeit gelöst ist. Das Formen von definierten Kristallen statt Salzkrusten ist für Salzlösung durch Effloreszenz auf hydrophoben Fasern typisch [36]. Vollständig freigelegte Filterporen sind nach der Beaufschlagung des beladenen Filters mit Wassertropfen in beiden Fällen deutlich sichtbar. Die Luft strömt bevorzugt durch die Fläche mit dem geringsten Widerstand was insgesamt zu dem minimalen Differenzdruck nach der Durchströmungstrocknung der Filtermedien führt. Die Reduktion des Differenzdrucks, im Vergleich zum ursprünglich beladenen Filtermedium vor Wasserbeaufschlagung durch die teilweise freie Anströmfläche des Filtermediums auf das Niveau des unbeladenen Filters, ist mit Beobachtungen, die bei der unvollständigen Regeneration von Oberflächenfiltern, beim „patchy cleaning“, gemacht wurden [16], vergleichbar. Trotz einer unvollständigen Abreinigung wurden hier Differenzdrücke nahe dem Δp_0 beobachtet. Die strukturellen Unterschiede der Kristalle nach Beaufschlagung mit Wassertropfen (vergl. Abbildung 5.3, 3 mit 5.3, 4) zeigen, dass bei Beaufschlagung mit 219 g Wassertropfen /m² das Salz durch kurzzeitige Beaufschlagung mit der geringen Wassermenge nur teilweise gelöst wurde, während große Salzkristalle ohne erkennbare einzelne Partikeln nach der Beaufschlagung mit 506 g Wassertropfen /m² darauf hindeuten, dass das Salz vollständig gelöst wurde. Der Unterschied zwischen den verschiedenen Kristallstrukturen, resultierend aus unterschiedlichen Mengen an flüssigem Wasser während der Beaufschlagung, lässt sich nur anhand der REM-Bilder feststellen. Er kann nicht aus den Differenzdruckaufzeichnungen abgeleitet werden, da in beiden Fällen der Differenzdruck nach dem Trocknen des Filters fast den Δp_0 erreicht.

REM-Aufnahmen wurden auch verwendet, um zusätzlich die Querschnittsflächen der Filtermedien zu untersuchen. Abbildung 5.4 zeigt exemplarisch REM-Aufnahmen der Anströmseite und des Querschnitts von K₂SO₄-beladenen Filtern nach der Beladung mit Salz und nach der Beaufschlagung mit 506 g Wassertropfen /m² mit anschließender Durchströmungstrocknung.

Die Übersichtsaufnahmen der Querschnitte zeigen keine Penetration des Partikelmaterials in das Filtermedium. Die vergrößerten Ausschnitte des Querschnitts nahe der Anströmseite zeigen Unterschiede in der Morphologie des Salzes, Dendriten nach der Beladung und große Kristalle nach

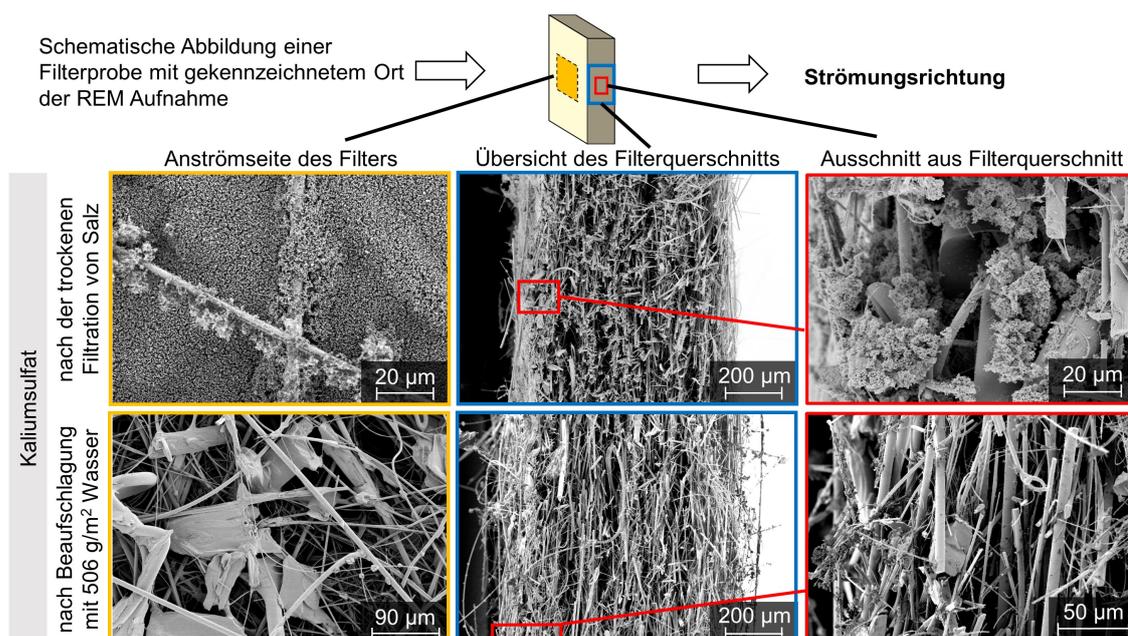


Abbildung 5.4: REM-Aufnahmen der Anströmseite und des Querschnitts von K_2SO_4 -beladenen Filtermedien nach der Salzbeladung (oben) und nach der Beaufschlagung mit 506 g Wasser/m² und anschließender Durchströmungstrocknung (unten).

Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung. Dies deckt sich mit Aufnahmen der Anströmseiten. Keine Änderungen der Morphologie von Salz über die Tiefe der Filtermedien im Querschnitt war festzustellen.

Eine gravimetrische Analyse der zuvor beschriebenen Filtermedien ergibt, dass sie nach der Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung mit derselben Menge Salz beladen sind wie zuvor. Dies zeigt, dass eine kurze, einmalige Beaufschlagung zur Umlagerung des Salzes, aber nicht zur Penetration von Salz durch das Filtermedium führt.

5.2 Einfluss der Salzart auf Differenzdruckverlauf und Salzverbleib

Vor dieser Arbeit gab es lediglich experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der rel. Luftfeuchtigkeit auf beladene Filter. Dabei wurden zwar verschiedene Materialsysteme untersucht, ein direkter Vergleich von löslichen Partikelsystemen bzw. deren Einfluss auf die Beobachtungen gab es jedoch nicht. Zur Untersuchung des Einflusses des Salzes als zentrale Komponente des Materialsystems auf die anströmseitige Umlagerung des Partikelmaterials, wurden Filtermedien mit NaCl, KCl und K_2SO_4 beladen. Dabei entspricht die differenzdruckgesteuerte Beladung bis 10 mbar einem Flächengewicht von 10,2 g/m² NaCl, 9,9 g/m² KCl und 11,4 g/m² K_2SO_4 . Der Unterschied in der Beladungsmasse führt dazu, dass NaCl und KCl aufgrund ihrer leicht unterschiedlichen Löslichkeit (siehe Tabelle 4.1) mit exakt der gleichen Wassermenge vollständig gelöst werden können, während zum vollständigen Lösen von K_2SO_4 , aufgrund sehr viel geringerer Löslichkeit, eine sehr

viel höhere Wasserbeladung von 102 g Wassertropfen /m² nötig wäre. Abbildung 5.5 zeigt die Differenzdruck- und rel. Luftfeuchtigkeit-Verläufe während der Beladung mit Salz, Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung. Für jedes Salz sind drei Diagramme dargestellt. Die Wasserbeaufschlagung wurde wie in Kapitel 5.1 mit rel. Luftfeuchtigkeit > 85 %, 219 g Wassertropfen /m² und 506 g Wassertropfen /m² durchgeführt.

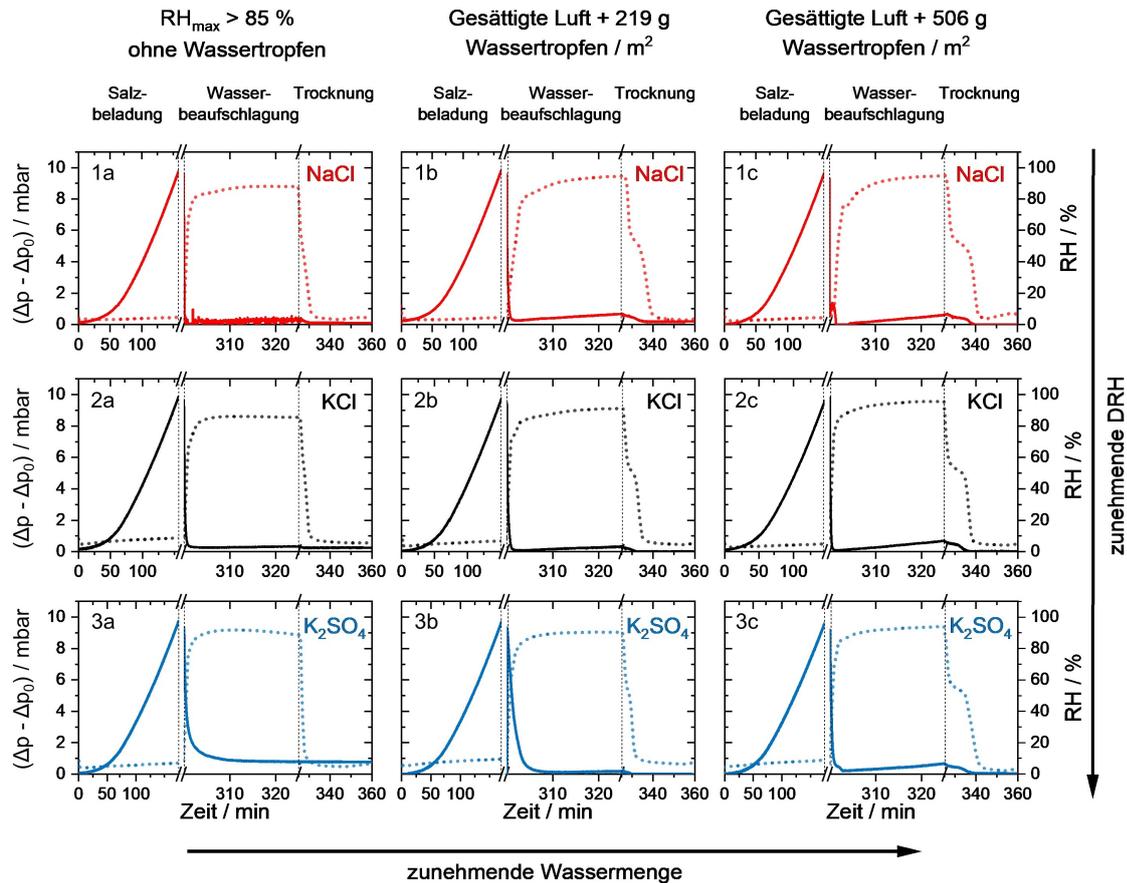


Abbildung 5.5: Differenzdruck ($\Delta p - \Delta p_0$) mit abströmseitig gemessener rel. Luftfeuchtigkeit während der Beladung mit (1) NaCl, (2) KCl und (3) K₂SO₄, der Beaufschlagung mit (a) hoher rel. Luftfeuchtigkeit > 85 %, (b) 219 g Wassertropfen /m² und (c) 506 g Wassertropfen /m² und der anschließenden Durchströmungstrocknung der Filter.

Die Partikelbeladung bis 10 mbar verläuft für alle drei Salze vergleichbar, wie aufgrund der sich kaum unterscheidenden Größenverteilungen der Partikelkollektive zu erwarten ist. Salzbeladene Filter, die ausschließlich hoher rel. Luftfeuchtigkeit ausgesetzt wurden, weisen nach der Durchströmungstrocknung mit steigender Deliqueszenzfeuchte einen höheren finalen Differenzdruck auf, da Salze mit höherer Deliqueszenzfeuchte erst bei höherer rel. Luftfeuchtigkeit und dadurch später gelöst werden und über die Beaufschlagungsdauer weniger Wasser aus der Umgebung aufnehmen. In Kapitel 5.1 ist beschrieben, dass sich die K₂SO₄-Partikel bei Kontakt mit einer hohen rel. Luftfeuchtigkeit umlagern, aber die Partikelstrukturen erhalten bleiben und weiterhin größere Teile der Filterporen bedecken, wodurch der Differenzdruck erhöht bleibt. Zusätzlich nimmt die

Menge des sich im System ansammelnden Wassers mit kleinerer Deliqueszenzfeuchte des Materialsystems zu, wodurch die anschließende Abnahmerate der rel. Luftfeuchtigkeit während der Trocknung kleiner wird.

Abbildung 5.6 zeigt die Differenz zwischen Differenzdruck und Δp_0 und den Verlauf der rel. Luftfeuchtigkeit nach der Salzbeladung bis 10 mbar während der Beaufschlagung mit 219 g Wassertropfen /m² und Durchströmungstrocknung für alle drei Salze. Für eine bessere Lesbarkeit sind die Daten analog zu Abbildung 5.2 bis 2,5 mbar gezeigt. Alle drei Salze sind bei diesem Experiment zumindest teilweise gelöst.

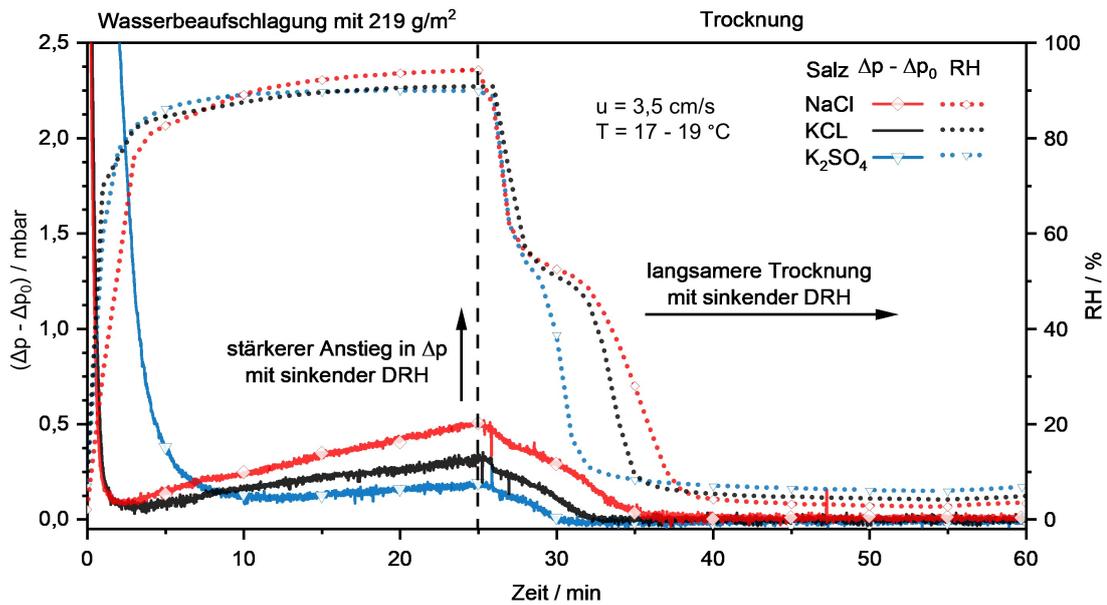


Abbildung 5.6: Differenzdruck ($\Delta p - \Delta p_0$) mit abströmseitig gemessener rel. Luftfeuchtigkeit während der Beaufschlagung mit 219 g Wassertropfen /m² und anschließender Durchströmungstrocknung für K₂SO₄, KCl und NaCl

Der initiale steile Abfall des Differenzdrucks zeigt, dass es keinen (unbeschädigten) Filterkuchen mehr gibt, der zum Differenzdruck beiträgt und der Differenzdruck ab Wasserbeaufschlagung vom Filtermedium (Δp_0) dominiert wird. Der Differenzdruck steigt mit fortgesetzter Wasserbeaufschlagung, ein Indiz für die Ansammlung der Lösung auf dem Filter. NaCl mit der niedrigsten Deliqueszenzfeuchte weist hier das höchste Druckniveau kurz vor der Durchströmungstrocknung des Filters auf. Die rel. Luftfeuchtigkeit zeigt, dass die Trocknung des NaCl-beladenen Filters entsprechend länger dauert als bei KCl- oder K₂SO₄-Beladung. Beides zeigt, dass während des Versuchs mit NaCl die größte Menge an Lösung im Filtermedium akkumuliert. Während der Reduktion der rel. Luftfeuchtigkeit liegen die Lösungstropfen übersättigt vor und geben bei weiterer Reduktion der rel. Luftfeuchtigkeit kontinuierlich Wasser ab bis die Effloreszenz eintritt, was sich in einer Reduktion der Trocknungsrate zwischen einer rel. Luftfeuchtigkeit von 60 % und 50 % widerspiegelt (Näheres zum Trocknungsverlauf, siehe Diskussion zu Abbildung 5.1).

Abbildung 5.7 zeigt REM-Aufnahmen der Anströmseite, des Querschnitts und der Abströmseite der salzbeladenen Filtermedien vor und nach Beaufschlagung mit 506 g Wassertropfen /m² mit anschließender Durchströmungstrocknung.

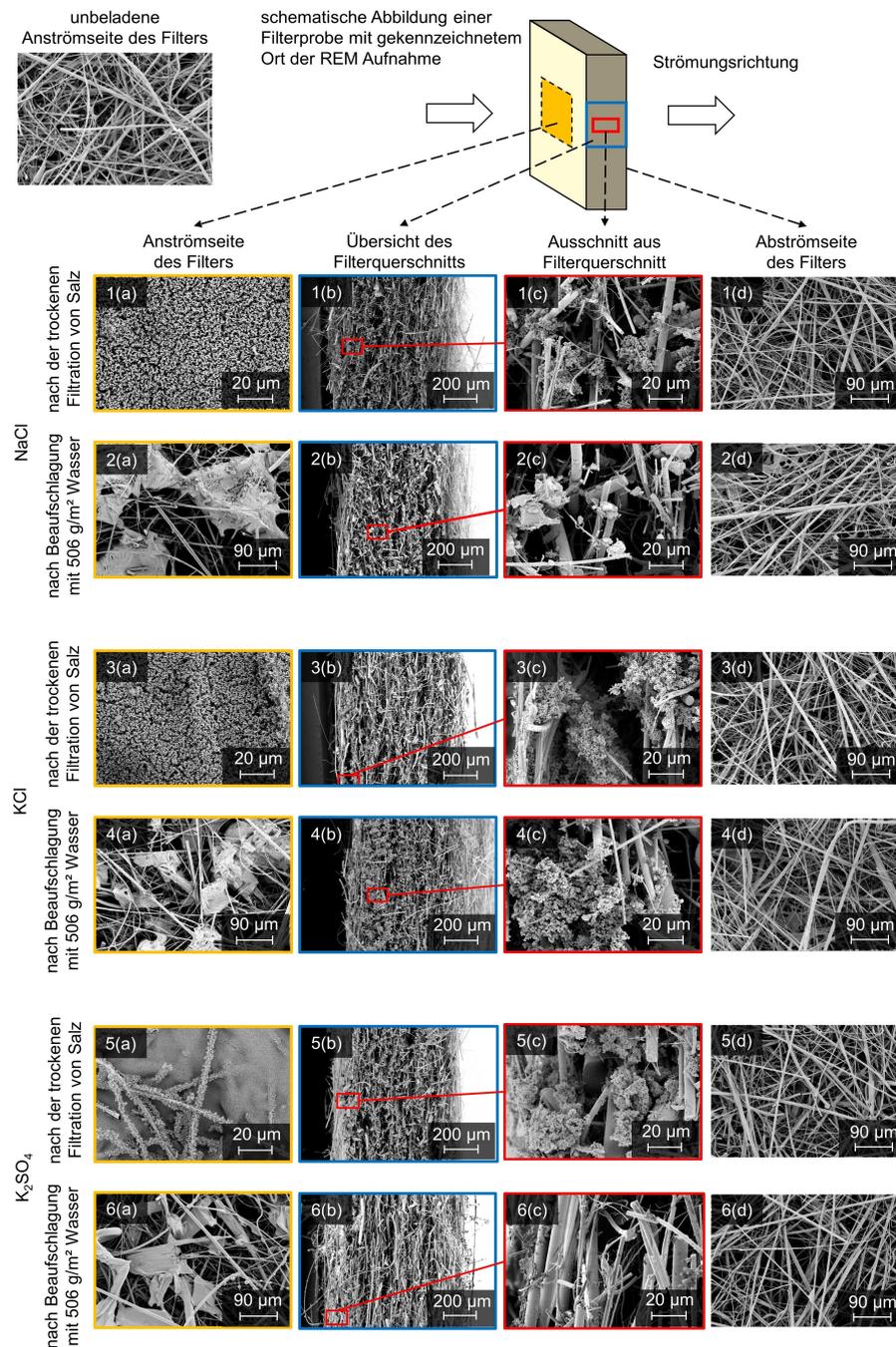


Abbildung 5.7: REM-Aufnahmen a) der Anströmseite, der Querschnittsfläche als b) Übersicht und c) Ausschnitt und d) der Abströmseite salzbeladener Filtermedien vor und nach Beaufschlagung mit 506 g Wassertropfen /m² und anschließender Durchströmungstrocknung für NaCl (1, 2), KCl (3, 4) und K₂SO₄ (5, 6).

Nach der Partikelbeladung mit NaCl, KCl und K₂SO₄ bis zu 10 mbar zeigen die REM-Aufnahmen Anströmseiten, die alle vollständig mit einem Filterkuchen bedeckte sind (siehe Abbildung 5.5, 1a, 3a, 5a).

Dieser Hinweis auf die Oberflächenfiltration stimmt mit den Differenzdruckmessungen (siehe Abbildung 5.5) überein. Nach der Beaufschlagung mit Tropfen zeigen die REM-Aufnahmen mehrere Salzplatten, die einige Faserkreuzungen und Poren auf der Anströmseite der Filtermedien bedecken. Damit sind die meisten Poren, die zuvor der Filterkuchen bedeckte, frei von Salz. Die beträchtliche Freilegung der Poren erklärt den zuvor beschriebenen finalen Differenzdruck, der auf einem ähnlichen Niveau liegt wie der Δp_0 des unbeladenen Filters, da der Filterkuchen nun nicht mehr zum Differenzdruck beiträgt.

Die Bilder der Querschnittsflächen der mit NaCl-, KCl- und K₂SO₄-beladenen Filtermedien nach der Beaufschlagung mit 506 g Wassertropfen /m² zeigen, dass neben dem Salz auf der Filteranströmseite auch das Salz auf der anströmseitig gelegenen Hälfte des Filterquerschnitts durch die Wasserbeaufschlagung beeinflusst wird. Im Querschnitt des NaCl-beladenen Filtermediums haben sich, wie auf der Anströmseite des Filtermediums, Salzkristalle gebildet, die um ein Vielfaches größer sind als die Primärpartikeln nach trockener Beladung (vergl. Abbildung 5.5, 2c mit Abbildung 5.5, 2a und Abbildung 5.5, 1a). Agglomerate und ihre Primärpartikeln sind nach Beaufschlagung nicht mehr identifizierbar. Das Salz wurde also durch die Beaufschlagung auch im Filterquerschnitt vollständig gelöst und ist durch die Durchströmungstrocknung wieder kristallisiert. Auffällig ist der Querschnitt des KCl-beladenen Filters nach Wasserbeaufschlagung (siehe Abbildung 5.5, 4c). Im Filterquerschnitt bleiben Agglomerate aus Primärpartikeln sichtbar. Die im Querschnitt des Filters sichtbaren Primärpartikeln sind allerdings nach der Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung größer als die im Querschnitt des mit trockenen Partikeln beladenen Filters (siehe Abbildung 5.5, 3c), was bedeutet, dass eine Aufnahme von Wasser und damit einhergehende Umlagerung und lokale Lösung von Salz stattgefunden und so zur Formation größerer Partikeln durch die Durchströmungstrocknung geführt hat. Die Partikeln im Inneren des Filtermediums bleiben jedoch als Agglomerate bestehend aus Primärpartikeln erkennbar, anders als die auf der Filteroberfläche sichtbaren Salzkristalle (vergl. Abbildung 5.5, 4c mit Abbildung 5.5, 4a) und anders als beim NaCl-beladene Filtermedium nach Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung (vergl. Abbildung 5.5, 4c mit Abbildung 5.5, 2c). Dies zeigt, dass das Salz im Inneren des Filtermediums insgesamt weniger Kontakt zu Wasser hatte als Salz auf der Anströmseite und durch Beaufschlagung mit Wassertropfen nicht flächendeckend gelöst wurde.

Die Abströmseiten der Filtermedien zeigen nur in Einzelfällen punktuell Salzpartikeln. Es wurden keine messbaren Unterschiede zu beladenen Filtermedien, die nicht mit erhöhter rel. Luftfeuchtigkeit oder Wassertropfen beaufschlagt wurden oder REM-Aufnahmen des unbeladenen Filtermediums, festgestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Partikelumlagerung und der Differenzdruck und damit das Betriebsverhalten während der Beaufschlagung mit Wassertropfen bei gleicher Wassermenge vom Salz abhängen.

Abbildung 5.8 zeigt den Differenzdruck von Filtern, die mit NaCl, KCl oder K₂SO₄ bis ca. 4,5 mbar bei einer rel. Luftfeuchtigkeit < 30 % beladen und mit einer rel. Luftfeuchtigkeit von 45 % für 25 min

beaufschlagt und anschließend mit einem Luftstrom mit rel. Luftfeuchtigkeit < 10 % getrocknet wurden. Bei der Salzbeladung und dem Wert der rel. Luftfeuchtigkeit handelt es sich um Werte, die annähernd um den Faktor 2 niedriger sind als die der bisher untersuchten Filter. Dieser Versuch ist angelehnt an Versuche von Montgomery et al. [22], die beobachteten, dass schon eine geringe Differenz zwischen rel. Luftfeuchtigkeit während der Beladung und Beaufschlagung zu einem Abfall des Differenzdrucks führt und der Abfall mit steigender Differenz der rel. Luftfeuchtigkeit zunimmt.

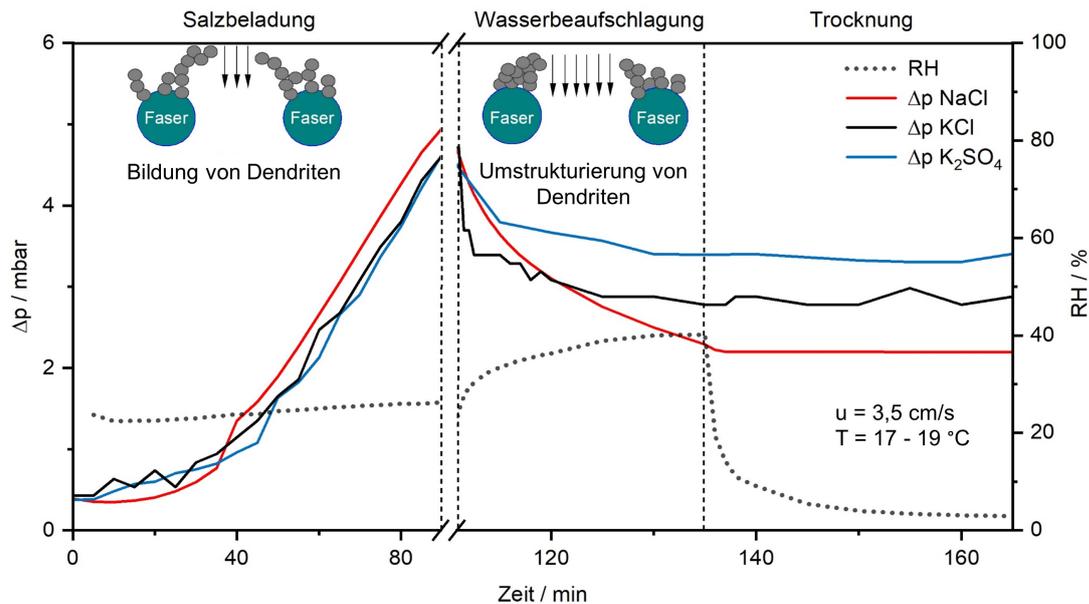


Abbildung 5.8: Differenzdruck von Filtern während der Beladung bei rel. Luftfeuchtigkeit < 30 % mit NaCl, KCl oder K_2SO_4 bis ca. 4,5 mbar, der Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit von 45 % und anschließender Durchströmungstrocknung und schematisch die auf Basis der REM-Aufnahmen (siehe Abbildung 5.3) abgeleiteten Dendritenstrukturen während der Beladung und der Wasserbeaufschlagung.

Abbildung 5.8 bestätigt, dass schon bei geringfügig höherer rel. Luftfeuchtigkeit von 15 % während der Beaufschlagung gegenüber der Beladung der Differenzdruck abfällt. In ähnlichen Arbeiten mit Untersuchungen zum Differenzdruckverlauf bei variierender rel. Luftfeuchtigkeit wurden bereits Umlagerungen von Dendriten bei Systemen ähnlicher Partikelgröße auf Kapillarkondensation zurückgeführt [30, 106]. Diese Untersuchungen melden Kapillarkondensation bei rel. Luftfeuchtigkeit von gerade mal 30 %. Für eine Krümmungsfläche vergleichbarer Größe analysieren und misst Thundat et al. den Einfluss der Kapillarkräfte ab 20 % rel. Luftfeuchtigkeit [107]. In der vorliegenden Arbeit wurde Kapillarkondensation nicht explizit nachgewiesen. Ergänzend ist in Abbildung 5.8 zu erkennen, dass der Abfall des Differenzdrucks während der Wasserbeaufschlagung mit gleicher rel. Luftfeuchtigkeit mit steigender Deliquescenzfeuchte (und sinkender Löslichkeit) des Salzes abnimmt. Die Beobachtungen aus Abbildung 5.5 bestätigen sich also für wesentlich geringere Partikelbeladungen und Wassermenge während der Beaufschlagung mit hoher rel. Luftfeuchtigkeit.

5.3 Zusammenfassung

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben die Prüfung der Hypothese, dass schon kurzzeitige Beaufschlagung eines löslichen Filterkuchens mit Wassertropfen zur Umlagerung des Materials führen kann, zum Ziel. Dazu wurden Versuche mit Beaufschlagung von hydrophoben, K_2SO_4 -beladenen Filtern mit unterschiedlichen Wassermengen, rel. Luftfeuchtigkeit $> 85\%$ ohne Wassertropfen, $219\text{ g Wassertropfen /m}^2$, und $506\text{ g Wassertropfen /m}^2$, durchgeführt, um festzustellen, ob der Aggregatzustand des Wassers oder die Wassermenge einen Einfluss auf die Partikelumlagerung sowie den einhergehenden Differenzdruckverlauf haben. Zusätzliche Experimente erfolgten mit unterschiedlichen Salzen, NaCl, KCl und K_2SO_4 , um den Einfluss des Salzes auf die Umlagerung und den Differenzdruckverlauf zu prüfen.

Es ergibt sich ein charakteristischer Differenzdruckverlauf bei kurzzeitiger Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit und Beaufschlagung mit Wassertropfen, der durch einen abrupten Abfall des Differenzdrucks markiert ist. Diese Erkenntnisse stimmen mit Beobachtungen von Montgomery et al. [22] von salzbeladenen Filtern bei der Beaufschlagung mit erhöhter rel. Luftfeuchtigkeit überein und wurden später auch mit reiner rel. Luftfeuchtigkeit ohne flüssiges Wasser von Pei [106] bestätigt. Dieser Differenzdruckabfall ist auf die anströmseitige Materialumlagerung und, in Abhängigkeit der Wassermenge im System, teilweises oder vollständiges Lösen des Salzes und damit die Veränderung des Filterkuchens, Zusammenziehen der Dendritenstrukturen oder vollständiges Auflösen des Filterkuchens, zurückzuführen. Eine größere Wassermenge, die zu vollständig gesättigter Luft oder zu Wassertropfen führt, verstärkt die Effekte und führt durch zusätzlich gelöstes Salz auf der Anströmseite der Filtermedien zu stärkeren Umlagerungen und einem schnelleren Abfall des Differenzdrucks bei Beaufschlagung. Anhaltende Beaufschlagung mit Wassertropfen nach initialem Differenzdruckabfall führt zu anschließendem Anstieg des Differenzdrucks, der bei Durchströmungstrocknung des Filters wieder abfällt. Dieser Anstieg ist bei Beaufschlagung mit erhöhter rel. Luftfeuchtigkeit, also rein gasförmigem Wasser, nicht zu beobachten und ist vermutlich auf eine Akkumulation von Lösung auf der Anströmseite der hydrophoben Filtermedien zurückzuführen.

Die Laboruntersuchungen zeigen, dass auch die Beaufschlagung salzbeladener Filtermedien mit reiner rel. Luftfeuchtigkeit dazu führt, dass der Filterkuchen sich verändert und es zum Sinken des Differenzdrucks kommt. Die rel. Luftfeuchtigkeit schwankt lokal und es kann zu Kapillarkondensation kommen, wodurch sich das Salz lokal löst und sich die Dendriten verformen. Versuche mit drei unterschiedlichen Salzen mit unterschiedlicher Deliqueszenzfeuchte zeigen, dass insbesondere bei geringer rel. Luftfeuchtigkeit und damit geringer Wassermenge ohne Flüssigkeit die Ausprägung der Effekte vom löslichen Material selbst abhängt. Mit steigender Deliqueszenzfeuchte des Salzes fällt der initiale Abfall des Differenzdrucks bei Beaufschlagung mit reiner rel. Luftfeuchtigkeit weit unter der Deliqueszenzfeuchte geringer aus, was auf eine geringere Veränderung des Filterkuchens durch weniger Wasseraufnahme des Salzes zurückzuführen ist. Inwieweit Kapillarkondensation für die Umlagerung des Salzes verantwortlich ist, kann an dieser Stelle nicht quantifiziert werden.

Das Szenario der Umlagerung von Salzpartikeln auf der Rohgasseite eines Filters (siehe Kapitel 3) wurde als Resultat lokaler oder vollständiger Lösung des Salzes beschrieben, das schon bei kurzer Wasserbeaufschlagung zu einer Umstrukturierung des Filterkuchens oder der vollständigen Lösung dessen führt. Es wurde gezeigt, dass es während der Kurzzeitbeaufschlagung nicht zum Massenverlust des beladenen Filters und damit nicht zur Penetration von Salz durch das Filtermedium kommt. Der identifizierte charakteristische Differenzdruckabfall ist daher ein Indiz für eine Strukturänderung des Filterkuchens, nicht jedoch für Partikelpenetration.

6 Langzeitbeaufschlagung von Filterkuchen aus Salz mit Wassertropfen in gesättigter Luft - Penetration¹

Insgesamt wurden vier Szenarien identifiziert, die bei der Beaufschlagung mit Wassertropfen von Filtern mit löslichem Filterkuchen auftreten können (siehe Kapitel 3). Dabei wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Szenarien, die eine Penetration von Partikelmaterial in oder durch das Medium beschreiben, erst bei mittelfristiger Beaufschlagung oder Langzeitbeaufschlagung mit Wassertropfen auftreten.

Die Langzeitbeaufschlagung, die potentiell zur Penetration von Flüssigkeit und Partikelmaterial durch die gesamte Filtertiefe auf die Reingasseite führen kann, stellt gegenüber der Kurzzeitbeaufschlagung den zweiten Grenzfall der Beaufschlagungsdauer dar, der in diesem Kapitel im Fokus steht. In Anknüpfung an das vorangegangene Kapitel 5 wird zunächst das Betriebsverhalten von ausschließlich mit Salzpartikeln (K_2SO_4) beladenen Oberflächenfiltern bei kontinuierlicher Langzeitbeaufschlagung mit Wassertropfen mit anschließender Durchströmungstrocknung betrachtet. Anschließend wird das Stoffsystem um unlösliche Glaspartikeln erweitert. Da eine Langzeitbeaufschlagung immer auch eine Kurzzeitbeaufschlagung enthält, werden hier ergänzende Informationen zu Kapitel 5 geliefert. Die Ergebnisse geben keinen Anlass für eine zusätzliche, separate Untersuchung der Kurzzeitbeaufschlagung mit unlöslichen Partikeln. Abschließend wird die Kristallisation im Innern des Filters mithilfe eines mehrlagigen Filteraufbaus untersucht und in diesem Rahmen auch eine mittelfristige und intermittierende Beaufschlagung betrachtet.

Im Folgenden wird ausschließlich der Versuchsstand zur Langzeitbeaufschlagung von flachen Filtern mit Wassertropfen in gesättigter Luft angewendet (siehe Kapitel 4.3). In diesem Kapitel werden hydrophile Oberflächenfilter verwendet (Tabelle 4.3 Nr. 2, siehe Kapitel 4.3).

6.1 Penetration von Salz auf die Reingasseite

Am Beispiel eines ausschließlich mit Salz beladenen hydrophilen Oberflächenfilters wird in diesem Kapitel die Penetration von Salz auf die Reingasseite durch Langzeitbeaufschlagung mit

¹ Inhalte dieses Kapitels wurden in *Membranes* veröffentlicht und mit Erlaubnis von MDPI für diese Dissertation übersetzt bzw. angepasst. Almuth D. Schwarz, Jörg Meyer, and Achim Dittler. Penetration of Water-Soluble Material through Gas-Cleaning Filters. *Membranes*, 2022. [108]

Wassertropfen aufgezeigt und diskutiert. Abbildung 6.1 zeigt den, in dieser Arbeit als charakteristisch identifizierten, Differenzdruckverlauf und die Entwicklung der rel. Luftfeuchtigkeit während der Salzbeladung, Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung (siehe Kapitel 4.4)².

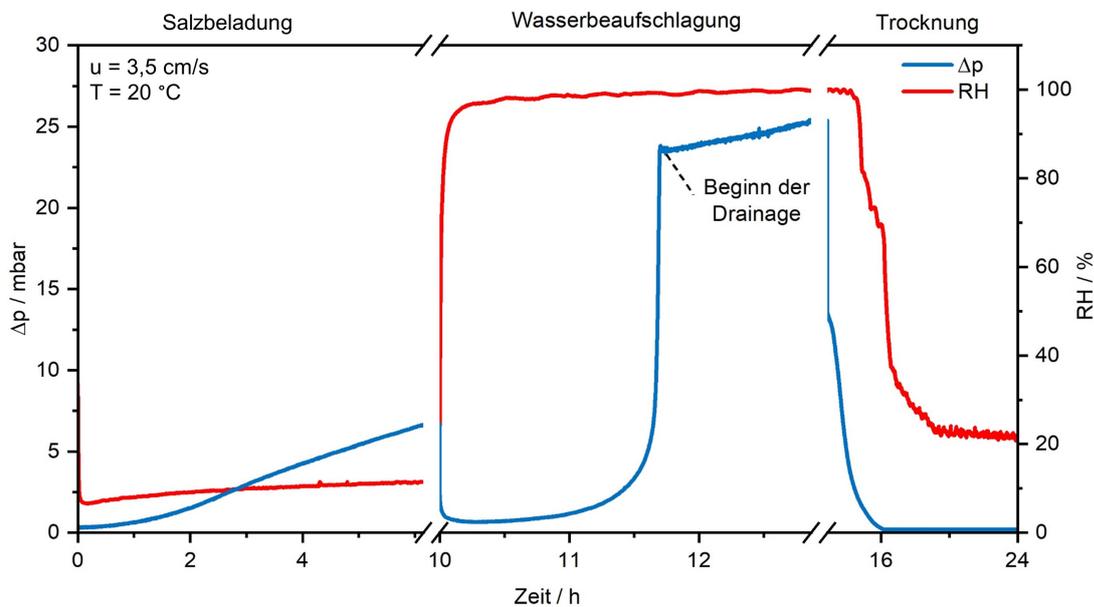


Abbildung 6.1: Differenzdruck mit abströmseitig gemessener rel. Luftfeuchtigkeit während der Beladung mit K_2SO_4 , der Beaufschlagung mit Wassertropfen und der Durchströmungstrocknung mit eingezeichnetem Beginn der abströmseitigen Drainage.

Während der Beladung des Filters mit K_2SO_4 -Partikeln steigt der Differenzdruck an. Nach den ersten 2 h steigt er linear an, was zeigt, dass auf die anfängliche Tiefenfiltration mit anschließender Clogging-Phase die Oberflächenfiltration folgt. Dies entspricht den grundlegenden Erkenntnissen aus der Literatur (siehe Kapitel 2.1). Die Beladung verläuft damit wie zu erwarten und ähnlich wie bei den Versuchen zur Kurzzeitbeaufschlagung (siehe Kapitel 5).

Die Beaufschlagung mit Wassertropfen führt zum abrupten Abfall des Differenzdrucks von 6,7 mbar auf 0,7 mbar, gefolgt von einem langsamen Anstieg bis auf ca. 5 mbar nach 1,6 h Beaufschlagungsdauer. Es folgt ein steiler Anstieg im Differenzdruck. Bei ca. 22 mbar erreicht der Differenzdruck ein lokales Maximum. Zu diesem Zeitpunkt kann am Auslass unmittelbar abströmseitig des Filtermediums in der Filterkammer der Beginn einer abströmseitigen Drainage beobachtet werden. Nach Einsetzen der Drainage bleibt der Differenzdruck mit leicht steigender Tendenz quasi-stationär. Durch die Durchströmungstrocknung sinkt der Differenzdruck auf einen Wert nahe dem Δp_0 .

Die Beaufschlagung mit Wassertropfen ist der zentrale Schritt in den Experimenten. Der anfängliche Abfall des Differenzdrucks beim Start der Beaufschlagung mit Wassertropfen wird, entsprechend

² Abbildungen werden, wie in Kapitel 5 erläutert, aus Gründen der Übersichtlichkeit ohne die Konditionierungsphase und mit unterschiedlichem Maßstab während Beladung, Wasserbeaufschlagung und Trocknung abgebildet.

der Ergebnisse in Kapitel 5 zur Kurzzeitbeaufschlagung, durch die Lösung des Salzes, und damit das Wegfallen des Filterkuchens für einen erhöhten Differenzdruck, verursacht. Ergebnisse einer Kurzzeitbeaufschlagung mit explizit diesem Versuchsstand und diesem Partikelmaterial sind im Rahmen dieser Arbeit von der Autorin separat veröffentlicht worden [109, 110].

Abbildung 6.2 zeigt drei Fotos: Ein unbeladenes Filtermedium und ein salzbeladenes Filtermedium vor und nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen, einschließlich Durchströmungstrocknung. Die Fotos entsprechen drei Zeitpunkten im Experiment, die im Differenzdruckdiagramm in Abbildung 6.2 angegeben sind.

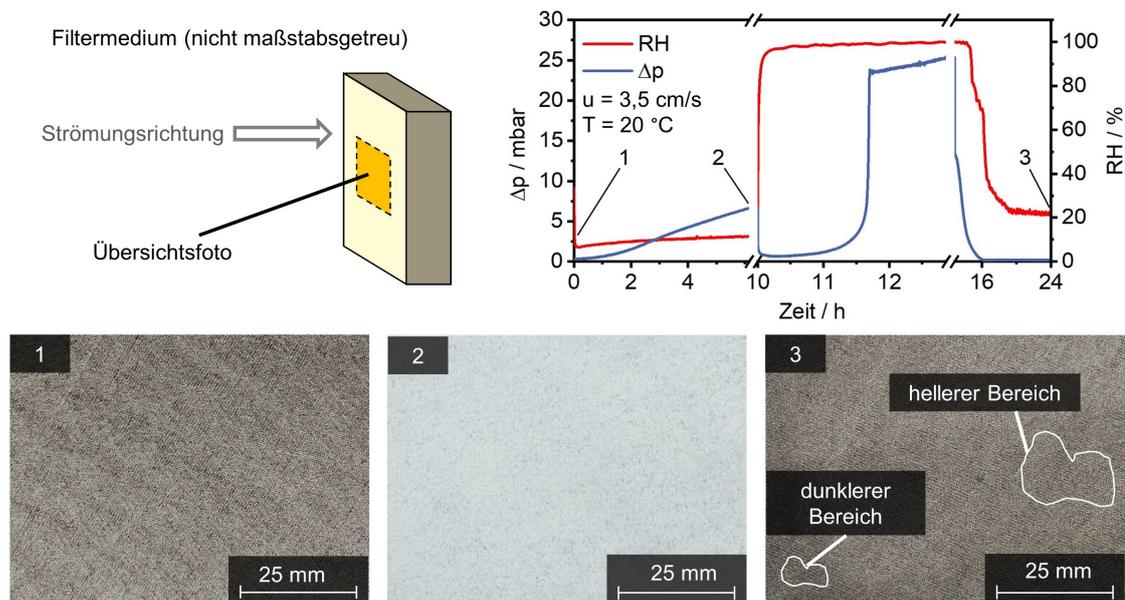


Abbildung 6.2: Fotos der Anströmseite des unbeladenen Filtermediums (1), eines salzbeladenen Filtermediums (2) und eines salzbeladenen Filtermediums nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung (3) entsprechend der im Differenzdruckdiagramm angegebenen Zeitpunkte.

Abbildung 6.2 zeigt, dass die Anströmseiten des unbeladenen und des salzbeladenen Filtermediums vor der Beaufschlagung mit Wassertropfen gleichmäßig strukturiert sind, während das Filtermedium nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen durch hellere und dunklere Bereiche gekennzeichnet ist. REM-Aufnahmen und entsprechende EDX-Scans ermöglichen es, die Homogenität im Aussehen mit der Verteilung von Materialrückständen auf den Filtern zu korrelieren. Abbildung 6.3 zeigt den Differenzdruck des salzbeladenen Filters mit drei markierten Positionen, vor der Partikelbeladung (1), nach der Partikelbeladung (2) und nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung (3). Anhand von Proben aus den entsprechenden Filtermedien zeigen REM-Aufnahmen, in zwei Maßstäben, und EDX-Scans, jeweils von der gesamten Probe, die Materialverteilung auf der Anströmseite der Filter.

Der EDX-Scan des unbeladenen Filtermediums (siehe Abbildung 6.3, 1c) zeigt einen hohen Kohlenstoffgehalt, da das Filtermedium aus PA und PES besteht. Nach der Partikelbeladung ist das Filtermedium mit einem Filterkuchen bedeckt (siehe Abbildung 6.3, 2.1a, 2.2a). Im größeren

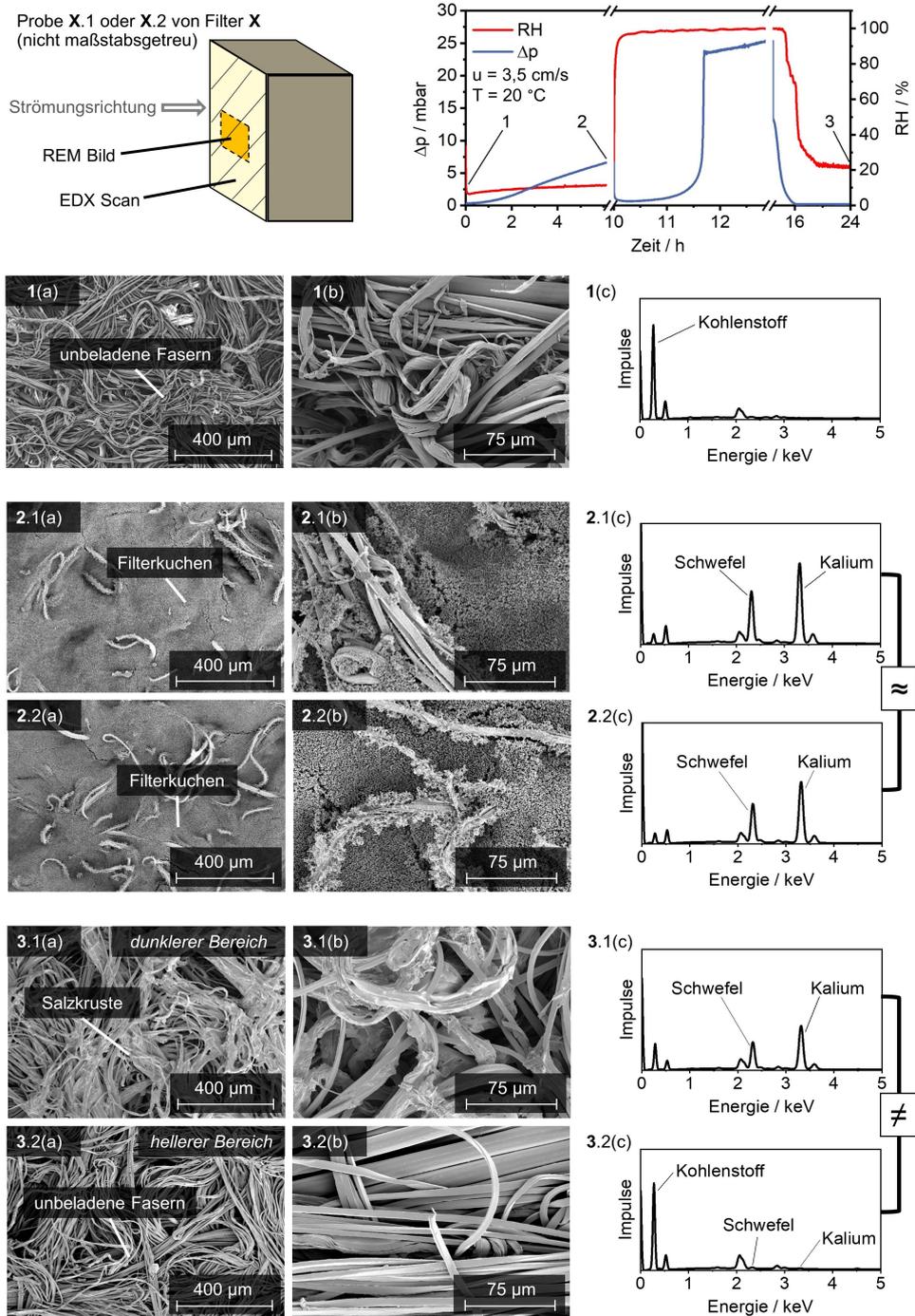


Abbildung 6.3: REM-Aufnahmen eines Ausschnittes der Anströmseite der Filtermedienproben (a) mit Vergrößerungen (b) und entsprechenden EDX-Scans der Proben (c) von (1) einer Probe vor der Partikelbeladung und (2) zwei Proben nach der Partikelbeladung und (3) zwei Proben nach Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung (3.1, 3.2).

Maßstab zeigt sich, dass die Filterkuchen aus nahezu kugelförmigen Partikeln bestehen, die Dendriten bilden. Beide Proben sind von einem geschlossenen Filterkuchen bedeckt, mit einzelnen herausragenden Fasern, an denen Dendriten haften (siehe Abbildung 6.3, 2.1b, 2.2b). Entsprechende REM-Aufnahmen bestätigen den Eindruck eines gleichmäßig gebildeten Filterkuchens auf

der Oberfläche des Mediums, da die EDX-Scans der Proben ähnliche Materialverteilungen zeigen (siehe Abbildung 6.3, 2.1c, 2.2c). Nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen ist das Salz ungleichmäßig auf dem Filtermedium verteilt (vgl. Abbildung 6.3, 3.1 mit Abbildung 6.3, 3.2). Die auf einem Foto des Filtermediums (siehe Abbildung 6.2) zu sehenden dunkleren und helleren Bereiche entsprechen den Bereichen, in denen noch viel Salz (siehe Abbildung 6.3, 3.1) bzw. kein Salz verbleibt (siehe Abbildung 6.3 3.2). Das auf der Anströmseite des Filtermediums verbliebene Salz kristallisierte während des letzten Trocknungsschritts um die Faserbündel herum aus (siehe Abbildung 6.3, 3.1b). Die Lösung breitet sich auf den hydrophilen Fasern aus, statt ihre Oberfläche wie auf hydrophoben Oberflächen zu minimieren, sodass durch Kristallisation Salzkrusten entstehen [36]. Der EDX-Scan zeigt hohe Peaks für Schwefel und Kalium, ein Indikator für einen hohen K_2SO_4 -Gehalt. Der hellere Bereich weist kein Salz auf den REM-Aufnahmen auf, und EDX-Scans bestätigen, dass die hellen Bereiche des Filtermediums einem unbeladenen Filtermedium ähneln (vgl. Abbildung 6.3, 3.2c mit 1c). Das Salz kristallisiert also auf der Anströmseite der Filtermedien in bestimmten Bereichen aus. Aus Untersuchungen zu Verdunstungsprozessen bei der Trocknung gesättigter poröser Strukturen ist bekannt, dass Salz bevorzugt in Bereichen mit kleineren Poren auskristallisiert [85, 87]. Bei Betrachtung des Filters nach Penetration von Lösung als teil-gesättigtes poröses System, markieren die dunkleren Filterbereiche mit mehr kristallisiertem Salz demnach Bereiche des Mediums mit überwiegend kleinen Poren. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht überprüft bzw. bestätigt werden.

Nach dem Versuch wurde der Querschnitt des salzbeladenen Filters mittels REM und μ -CT weiter analysiert. Abbildung 6.4 zeigt REM-Aufnahmen von der Anströmseite, des Querschnitts und der Abströmseite und μ -CT-Aufnahmen eines salzbeladenen Filtermediums nach Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung.

Im Querschnitt und auf der Abströmseite des salzbeladenen Filtermediums konnte mittels REM kein Salz nachgewiesen werden (siehe Abbildung 6.4 b, c). Der segmentierte μ -CT-Scan der vollen Tiefe des Filtermediums (siehe Abbildung 6.4 d) zeigt Salz ausschließlich auf der Anströmseite des Filtermediums. Die verbleibenden Artefakte an den Rändern des Scans wurden einzeln analysiert und als salzfrei identifiziert (für die Durchführung siehe Kapitel 4.4). Im Zentrum der Probe konnte mit einer Mindestauflösung von ca. $6,7 \mu\text{m}$ kein Salz nachgewiesen werden (siehe Abbildung 6.4 e). Zusätzlich zeigt der Volumenanteil der Fasern und des Salzes über die Tiefe des Filtermediums (siehe Abbildung 6.4 f), berechnet aus der Anzahl der Pixel für den gesamten Bildstapel des vollständigen Tiefenscans (siehe Abbildung 6.4 d), dass das im Filtermedium verbleibende Salz nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung auf der Anströmseite des Filtermediums verbleibt, genauer gesagt innerhalb einer Oberflächenschicht mit einer Dicke von $100 \mu\text{m}$. Die untersuchte Filterprobe ist ca. $600 \mu\text{m}$ dick (und damit dünner als der für dieses Filtermedium vom Hersteller angegebene Wert). Mit einer minimalen Auflösung von ca. $6,7 \mu\text{m}$ in der μ -CT-Analyse und einer maximalen Probengröße von bis zu 1 cm^2 im REM sind beide Methoden, REM und μ -CT-Analyse, in der Auflösung von feinen Salzkrusten und der Probengröße begrenzt. Daher erlauben die in Abbildung 6.4 dargestellten Ergebnisse nicht den

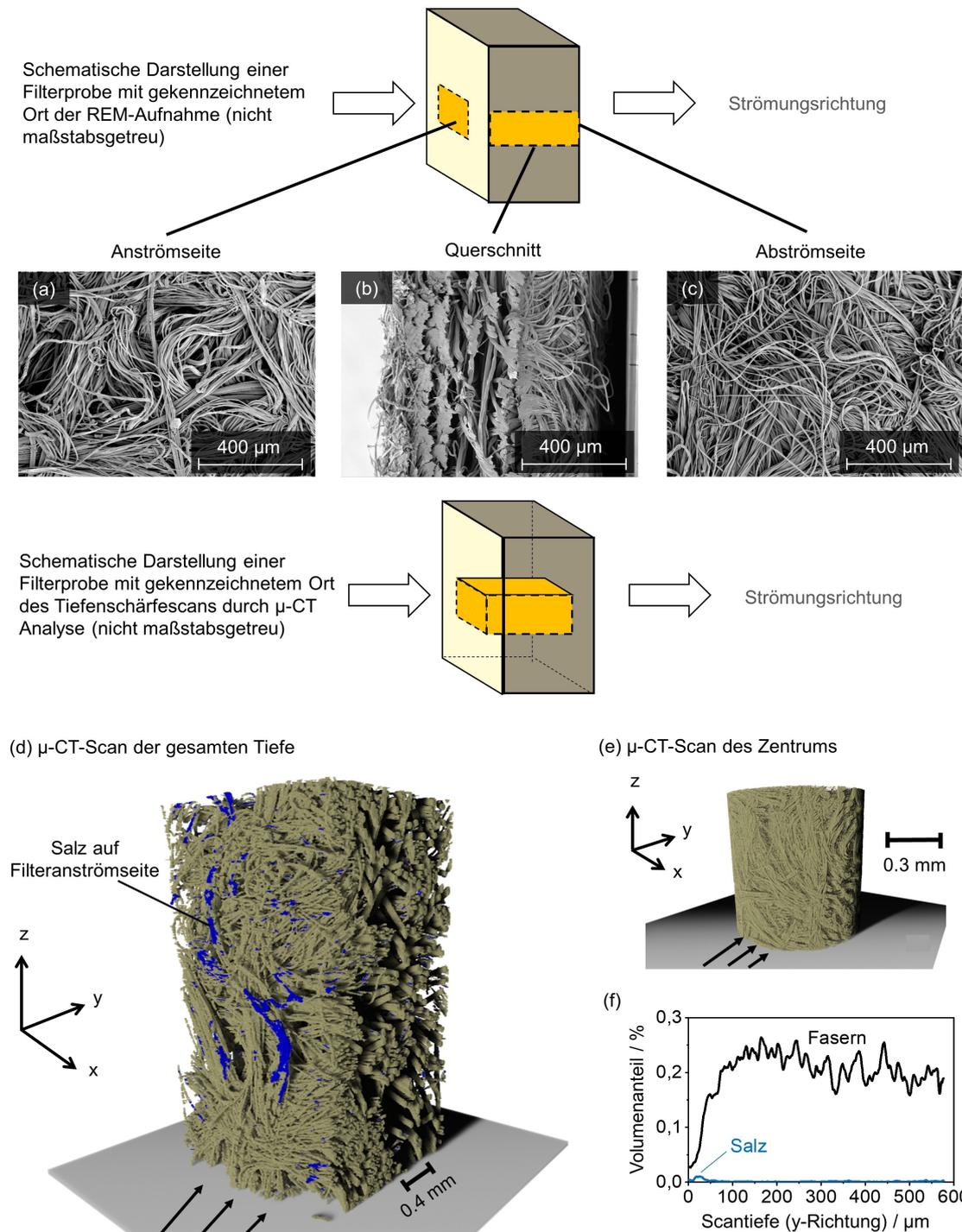


Abbildung 6.4: Analyse eines salzbeladenen Filtermediums nach Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung: REM-Aufnahmen der Anströmseite (a), des Querschnitts (b) und der Abströmseite (c), 3D-Ansicht eines µ-CT-Scans der gesamten Tiefe des Filtermediums (d), des Zentrums des Filtermediums (e) und der Volumenanteil von Fasern und Salz über die Tiefe des dargestellten µ-CT-Scans (f).

vollständigen Ausschluss von Salzkrusten auf Fasern innerhalb des Filtermediums. Sie bestätigen jedoch, dass sich der Großteil des nach dem Versuch im Filtermedium verbleibenden Salzes auf der Anströmseite des Filtermediums befindet. Kristallisation im Inneren des Mediums wird im

Folgenden gesondert mit einem dafür erprobten mehrlagigen Filteraufbau in Kapitel 6.3 weiter untersucht.

Nach dem initialen Abfall des Differenzdrucks, der durch die Lösung des Salzes und damit das Wegfallen des Filterkuchens bei initialer Kurzzeitbeaufschlagung (siehe Kapitel 5) verursacht wird, sind Parallelen zwischen dem weiteren Differenzdruckverlauf bei Beaufschlagung salzbeladener hydrophiler Oberflächenfilter mit Wassertropfen und dem Differenzdruckverlauf von Filtermedien bei Beaufschlagung mit Öltröpfen aus dem Forschungsgebiet der Ölnebelfiltration zu erkennen. In Abbildung 6.5 wird eine schematische Darstellung der zeitlichen Entwicklung des Differenzdruckverlaufs eines benetzbaren Filters bei Beaufschlagung von Ölnebel nach dem Kanal-Film-Modell (a) mit dem Differenzdruckverlauf des salzbeladenen benetzbaren Filters (aus Abbildung 6.1) bei Beaufschlagung mit Wassertropfen (b) verglichen.

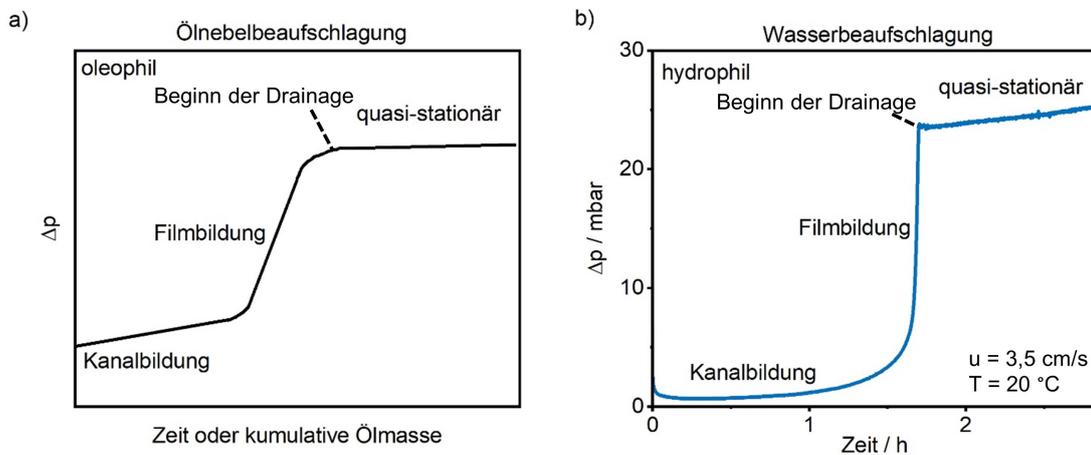


Abbildung 6.5: Vergleich zwischen (a) dem schematischen Differenzdruck für benetzbare Filter durch das Kanal-Film-Modell beschrieben, und (b) dem beobachteten Verhalten eines salzbeladenen benetzbaren Filters bei der Beaufschlagung mit Wassertropfen.

Ein Vergleich der Differenzdruckverläufe zeigt, dass es bei der Beaufschlagung mit Wassertropfen ebenfalls, wie bei der Beaufschlagung oleophiler Filtermedien mit Ölnebel, zu einem steilen Anstieg des Differenzdrucks kommt. Die Ursache ist die Ausbildung eines Flüssigkeitsfilms auf der Abströmseite des Filtermediums. Mit andauernder Beaufschlagung mit Wassertropfen ab Beginn der Drainage erreichen beide Prozesse einen quasi-stationären Zustand. In der Ölnebelfiltration wird der kriechende Anstieg im quasi-stationären Zustand, wie er auch bei der Wasserbeaufschlagung salzbeladener Oberflächenfilter zu beobachten ist (siehe Abbildung 6.5 b), auf eine ansteigende Sättigung des Filtermediums zurückgeführt und ist Teil der aktuellen Forschung [48]. Wie im Kanal-Film-Modell für oleophile Ölnebelfilter beschrieben, wird auch bei hydrophilen Oberflächenfiltern bei der Beaufschlagung mit Wassertropfen im Anschluss an die Filmbildung eine abströmseitige Drainage beobachtet. Die Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der Drainage (a) und des Filtermediums (b) werden in Abbildung 6.6 mit dem Differenzdruck des salzbeladenen Filters in Beziehung gesetzt.

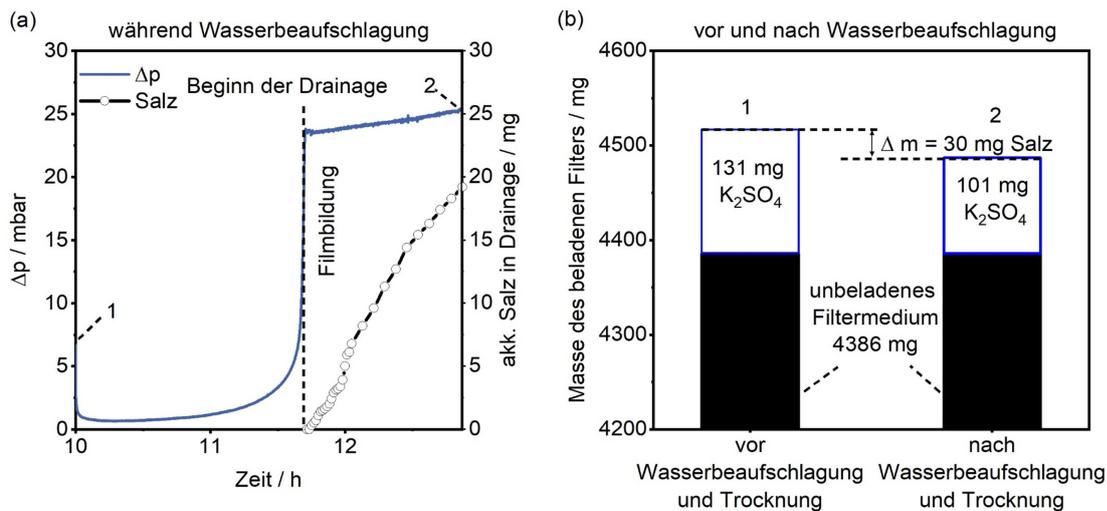


Abbildung 6.6: (a) Differenzdruck des salzbeladenen Filters während der Beaufschlagung mit Wassertropfen mit der in der Drainage nachgewiesenen akkumulierten Salzmasse und (b) die gravimetrische Analyse des Filters.

Nach der Filmbildung und dem Einsetzen der Drainage nimmt die kumulative Salzmasse, die durch das Filtermedium penetriert ist und in der Drainage nachgewiesen wird, mit der fortgesetzten Beaufschlagung von Wassertropfen zu. 19 mg Salz werden aus der Drainage zurückgewonnen. Insgesamt hat sich das Gewicht des salzbeladenen Filters um 30 mg reduziert.

Es wurde geprüft, ob die Diskrepanz von 11 mg zwischen der Gewichtsabnahme und der in der Drainage nachgewiesenen Salzmasse durch das Filtermedium verursacht wurde. Abhängig vom Materialsystem kann der Filter selbst während der Beaufschlagung mit Wassertropfen an Gewicht verlieren, z. B. durch lose Fasern. In diesem Fall zeigten unbeladene Filter nach gleicher Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung jedoch keinen Gewichtsverlust. Es ist möglich, dass die Diskrepanz zwischen dem Salz, welches das Filtermedium verlassen hat, und dem Salz, das in der Drainage nachgewiesen wurde, auf tote Zonen zwischen der Abströmseite des Filters und des Drainageauslasses sowie auf Re-Entrainment zurückzuführen ist. Auswaschen der Filterkammer konnte diese Vermutung nicht bestätigen. Ein exakter Nachweis der Salzmenge in der Filterkammer durch Ausspülen war allerdings aufgrund der großen dafür benötigten Wassermenge nicht möglich.

In diesem Abschnitt wurde das Szenario der Penetration durch die gesamte Tiefe des Filters (siehe Kapitel 3) aufgezeigt und erörtert, was zu einer Drainage auf der Abströmseite des Filters führt. Das vierte Szenario, die Drainage von löslichem und unlöslichem Material mit der Flüssigkeit auf der Anströmseite des Filters, ist, wie bei einem benetzbaren Filter zu erwarten, nicht eingetreten. In Endoskopaufnahmen von der Anströmseite der Filter während der Beaufschlagung mit Wassertropfen wurden keine abfließenden Tropfen beobachtet und es konnte kein Salz in der anströmseitigen Wandfilmfalle nachgewiesen werden.

6.2 Einfluss von unlöslichem Partikelmaterial im Filterkuchen auf die Penetration von Salz

Die Szenarien, Umlagerung von Partikeln auf der Anströmseite und Penetration durch die gesamte Tiefe des Filters, die für rein lösliche Filterkuchen in dieser Arbeit bereits untersucht wurden (siehe Kapitel 6.1), werden im Folgenden mit Mischungen aus unlöslichem und löslichem Partikelmaterial untersucht. Für die Experimente werden die hydrophilen Oberflächenfilter (Tabelle 4.3 Nr. 2) mit Glaskugeln (unlöslich) und K_2SO_4 (löslich) beladen, einer Langzeitbeaufschlagung mit Wassertropfen und der abschließenden Durchströmungstrocknung ausgesetzt (siehe Kapitel 4.4). Auf eine Beschreibung und Diskussion von Differenzdruckverlauf, Partikelmaterialverbleib und Fraktionsabscheidegrad folgt eine theoretische Betrachtung der Ergebnisse und eine damit einhergehende Prüfung der Übertragbarkeit des Kanal-Film-Modells. Die experimentelle Untersuchung zeigt insbesondere auf, ob auch unlösliches Partikelmaterial bei Langzeitbeaufschlagung mit Wassertropfen durch das Filtermedium penetriert oder die Penetration des löslichen Materials beeinflusst.

6.2.1 Differenzdruckverläufe, Partikelmaterialverbleib und Fraktionsabscheidegrade

Zunächst erfolgt eine Betrachtung der Differenzdruckverläufe von beladenen Filtern während der Beaufschlagung mit Wassertropfen. Um eine Abschätzung der für einzelne Filter dargestellten Daten zu ermöglichen, ist in Abbildung 6.7 der Differenzdruck des in Kapitel 6.1 besprochenen salzbeladenen Filters mit Standardabweichung (ausgefüllte Fläche) aus drei Versuchen aufgetragen.

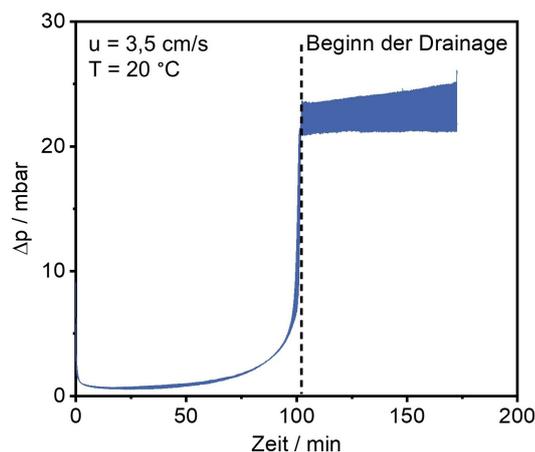


Abbildung 6.7: Bereich des Differenzdrucks des salzbeladenen Filters mit Standardabweichung während der Beaufschlagung mit Wassertropfen. Die Zeit $t = 0$ markiert den Start der Wasserbeaufschlagung.

Der Anstieg des Differenzdrucks tritt bei allen getesteten Filtern mit kaum messbaren Abweichungen auf, z.B. nach 50 min mit einer Standardabweichung von weniger als 0,2 mbar. Der sprunghafte Anstieg durch die Filmbildung tritt nach 100 min Beaufschlagung auf. Der Wert, auf

den der Differenzdruck bei Filmbildung ansteigt, zeigt jedoch eine Standardabweichung von mehr als 3 mbar. Die Abweichung nimmt ab Beginn der Drainage während des kriechenden Anstiegs des Differenzdrucks zu. Dieser Unterschied im Anstieg des Differenzdrucks bei der Filmbildung sowie im quasi-stationären Zustand ist aus der Ölnebel filtration bekannt und bleibt Bestandteil aktueller Forschung [111]. Aufgrund der in Abbildung 6.7 gezeigten Wiederholbarkeit werden im Folgenden zur besseren Übersichtlichkeit weiterhin repräsentative Einzelversuche dargestellt.

Vier, sich in ihrem Anteil an löslichem Partikelmaterial unterscheidende, Beladungen werden im Folgenden verglichen:

- Unbeladen
- Ausschließlich mit Salz (131 mg) beladen ($13,1 \text{ g/m}^2$)
- Mit Salz (131 mg) und Glas (262 mg) in einem Verhältnis von 1:2 beladen ($39,3 \text{ g/m}^2$)
- Ausschließlich mit Glas (1000 mg) beladen (100 g/m^2)

Die Differenzdruckverläufe der unterschiedlich beladenen Filter während der Beladung und der Beaufschlagung mit Wassertropfen sind in Abbildung 6.8 dargestellt.

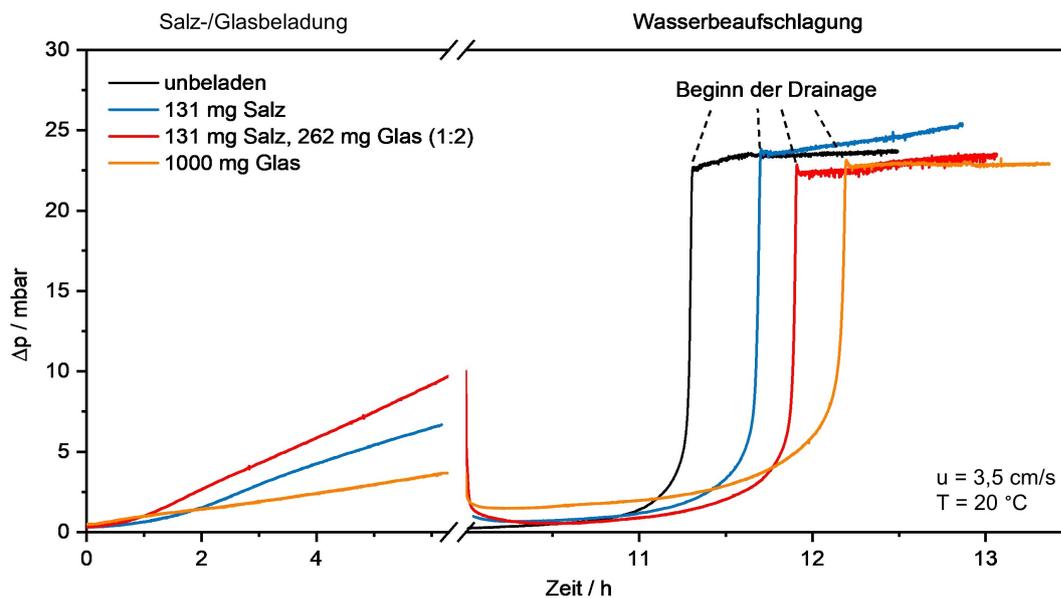


Abbildung 6.8: Differenzdruckverläufe während Beladung und der Beaufschlagung mit Wassertropfen eines salzbeladenen Filters, eines mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln im Verhältnis 1:2 beladenen Filters und eines glasbeladenen Filters und zusätzlich der Differenzdruckverlauf eines unbeladenen Filters während der Beaufschlagung mit Wassertropfen.

Der Differenzdruck während der Partikelbeladung variiert in Abhängigkeit von der Beladung bzw. Porosität des sich bildenden Filterkuchens von 3,6 bis 10 mbar. Der niedrige Differenzdruck des glasbeladenen Filters trotz der höchsten Gesamtpartikelbeladung in Bezug auf Anzahl und Gewicht

resultiert aus einem geringeren Durchflusswiderstand aufgrund der viel größeren Partikeln und breiteren Partikelgrößenverteilung im Filterkuchen (siehe Abbildung 4.5). Der Kuchenwiderstand ist im Wesentlichen von der Porosität, der Partikelgrößenverteilung und der Kuchenhöhe abhängig. Beim Start der Beaufschlagung mit Wassertropfen sinkt der Differenzdruck aller Filter auf unter 2,5 mbar. Der Differenzdruck des glasbeladenen Filters bleibt jedoch deutlich über dem der anderen Filter und über seinem ursprünglichen Δp_0 . Auch während des langsamen Anstiegs des Differenzdrucks bis zur Filmbildung verbleibt der Differenzdruck des glasbeladenen Filters oberhalb dem der übrigen Filter. Außerdem zeigen die Differenzdruckverläufe, dass die Zeit der Filmbildung von der Partikelbeladung des Filters abhängt. Während der Beaufschlagung mit Wassertropfen zeigt der Differenzdruck des unbeladenen Filters den frühesten steilen Differenzdruckanstieg aufgrund der Filmbildung. Die Filmbildung des ausschließlich mit Salz beladenen, des salz- und glasbeladenen und des ausschließlich glasbeladenen Filters folgen. Nach Drainagebeginn erreichen alle Filter den quasi-stationären Zustand mit leicht kriechendem Anstieg im Differenzdruck, der aus der Ölnebelfiltration bekannt [48] und mit der größten Abweichung in den Messungen assoziiert ist (siehe Abbildung 6.7).

Der initiale Abfall des Differenzdrucks bei Beaufschlagung mit Wassertropfen ist auf eine Strukturänderung des Filterkuchens zurückzuführen (siehe Kapitel 5). Im Gegensatz zu den Filtern, die mit weniger Partikeln, einschließlich Salz, beladen sind, verbleibt bei der reinen Glasbeladung mehr Partikelmaterial auf der Filteroberfläche, was zu dem geringeren initialen Abfall bei Start der Beaufschlagung auf einen Differenzdruck über Δp_0 führt. Durch Flüssigkeit im porösen System ändern sich die Adhäsionskräfte im Filtermedium [112] durch Bildung von Flüssigkeitsbrücken. Dadurch können sich im Filterkuchen kleine Löcher bzw. Lücken oder Risse bilden. Eine anströmseitige, inhomogene Struktur mit stark glasbeladenen Bereichen einerseits und Rissen bzw. Lücken andererseits führt zur Durchströmung insbesondere der unbeladenen Bereiche mit höherer lokaler Anströmgeschwindigkeit durch die bevorzugt durchströmten Bereiche. Das führt zu dem beobachteten Differenzdruck. Dieser ist zum einen niedriger verglichen mit dem Differenzdruck des Filters mit homogen verteilten Partikelschicht, die zur Abscheidung beiträgt. Zum anderen ist der beobachtete Differenzdruck, durch höhere lokale Anströmgeschwindigkeit, höher verglichen mit dem des unbeladenen Filters. Jedoch war es nicht möglich, REM-Aufnahmen für den nur mit Glaskugeln beladenen Filter zu erstellen, um diese Hypothese zu unterstützen, weil die große Menge und die lockere Struktur der Glaskugeln eine angemessene Beschichtung und den Elektronenfluss während der REM-Probenpräparation behindert. Allein die Entnahme eines glasbeladenen Filtermediums ohne Salz als Stützstruktur ist ohne Beschädigung des Filterkuchens nicht möglich, was jede weitere Analyse, auch beispielsweise mit Laser-Scanning-Mikroskop (LSM), ungeeignet macht. Eine Beschichtung der glasbeladenen Filter innerhalb der Anlage durch Auftragen einer aushärtenden Substanz, beispielsweise Harz, könnte in diesem Fall Abhilfe schaffen und Betrachtungen des glasbeladenen Filters erlauben. Dieser Prozess ist allerdings experimentell sehr aufwendig und durch limitierte Tiefenschärfe bei der Analyse der Proben eingeschränkt. Zudem ist fraglich, ob die Methode nicht selbst die Partikelstruktur beeinflussen würde. Die unterschiedlichen Zeitpunkte der

Filmbildung in Abhängigkeit der Beladung zeigen, dass ein anfänglicher Filterkuchen auf der Anströmseite des Filters den Transport der Flüssigkeit verlangsamt. Die Verzögerung beim Einsetzen der Drainage nimmt mit zunehmender Partikelbeladung zu. Die zuvor diskutierten spezifischen Differenzdruckanstiege während der Filmbildung und folgenden Gradienten im quasi-stationären Zustand liegen innerhalb des Fehlers von 2 mbar (siehe Abbildung 6.7). Da die optische Beobachtung des Filters mittels Endoskop von der Anströmseite und Kamera von der Abströmseite keine Rückschlüsse auf einen Grund der verzögerten Filmbildung erlaubt, wird deshalb der Zeitpunkt der Filmbildung gesondert theoretisch betrachtet (siehe Kapitel 6.2.2).

Um ein besseres Verständnis vom Einfluss der unlöslichen Partikeln auf die gesamte Materialverteilung auf der Anströmseite der Filter zu erlangen, wurden die Filter mittels REM analysiert. In Abbildung 6.9 sind Fotos und REM-Aufnahmen des salz- und glasbeladenen Filtermediums mit dem salzbeladenen Filtermedium verglichen.

Vor der Beaufschlagung mit Wassertropfen sind beide Filtermedien gleichmäßig mit einem Filterkuchen bedeckt (siehe Abbildung 6.9 1a, 3a). Im Falle des salz- und glasbeladenen Filtermediums ragen keine einzelnen Fasern aus dem Filterkuchen heraus, was die Aussage stützt, dass dieser Filterkuchen eine größere Filterkuchenhöhe als der Filterkuchen aus reinem Salz aufweist (siehe Abbildung 6.9, 3b). Nach Beaufschlagung mit Wassertropfen hat das Salz Krusten um einzelne Faserbündel des salzbeladenen Filtermediums gebildet, andere Stellen sind frei von Salz (vgl. Abbildung 6.3). Auf der Anströmseite des Filtermediums, das mit Salz und Glas beladen ist, verbleiben nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen sowohl Glaskugeln als auch Salz. Ähnlich wie beim salzbeladenen Filtermedium zeigt auch das mit Salz und Glas beladene Material nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung hellere und dunklere Bereiche (siehe Abbildung 6.9, 2a, 4a). Der dunklere Bereich zeigt Glaskugeln und Salz auf der REM-Aufnahme und dem EDX-Scan (siehe Abbildung 6.9, 4.1b, 4.1c), während der hellere Bereich überwiegend Glaskugeln bzw. Silicium enthält (siehe Abbildung 6.9, 4.2b, 4.2c). Die ungleichmäßige Verteilung von Material führt zu sichtbaren Flecken auf der Anströmseite der Filtermedien, die unabhängig von ihrer Position im Prüfstand sind, sondern nur vom jeweiligen Filtermedium abhängen. Ein Vergleich von Abbildung 6.9, 2.1 und 2.2 mit 4.1 und 4.2 zeigt, dass insgesamt mehr Fasern auf dem salz- und glasbeladenen Filtermedium bedeckt bleiben als auf dem salzbeladenen Filtermedium. Offenbar verbleiben mehr Partikeln auf dem salz- und glasbeladenen Filter, und das Salz bildet nicht nur Krusten um die Faserbündel, sondern auch um das Glas (siehe Abbildung 6.9, 4.1).

Die Gesamtmengen an Salz und Glas, die in der abströmseitigen Drainage der einzelnen Filter nachgewiesen wurden, sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Die Drainagen wurden entsprechend der Durchführung in Kapitel 4.4.3 zum Nachweis löslicher und unlöslicher Inhaltsstoffe untersucht.

Bei dem unbeladenen Filter und dem glasbeladenen Filter wurden keine Partikelrückstände im Drainagewasser festgestellt. Glas wurde in keiner der Drainagen nachgewiesen. Abbildung 6.10 zeigt die Analyse der Drainage der Filter, die mit Salz bzw. Salz und Glas im Verhältnis 1:2 beladen wurden.

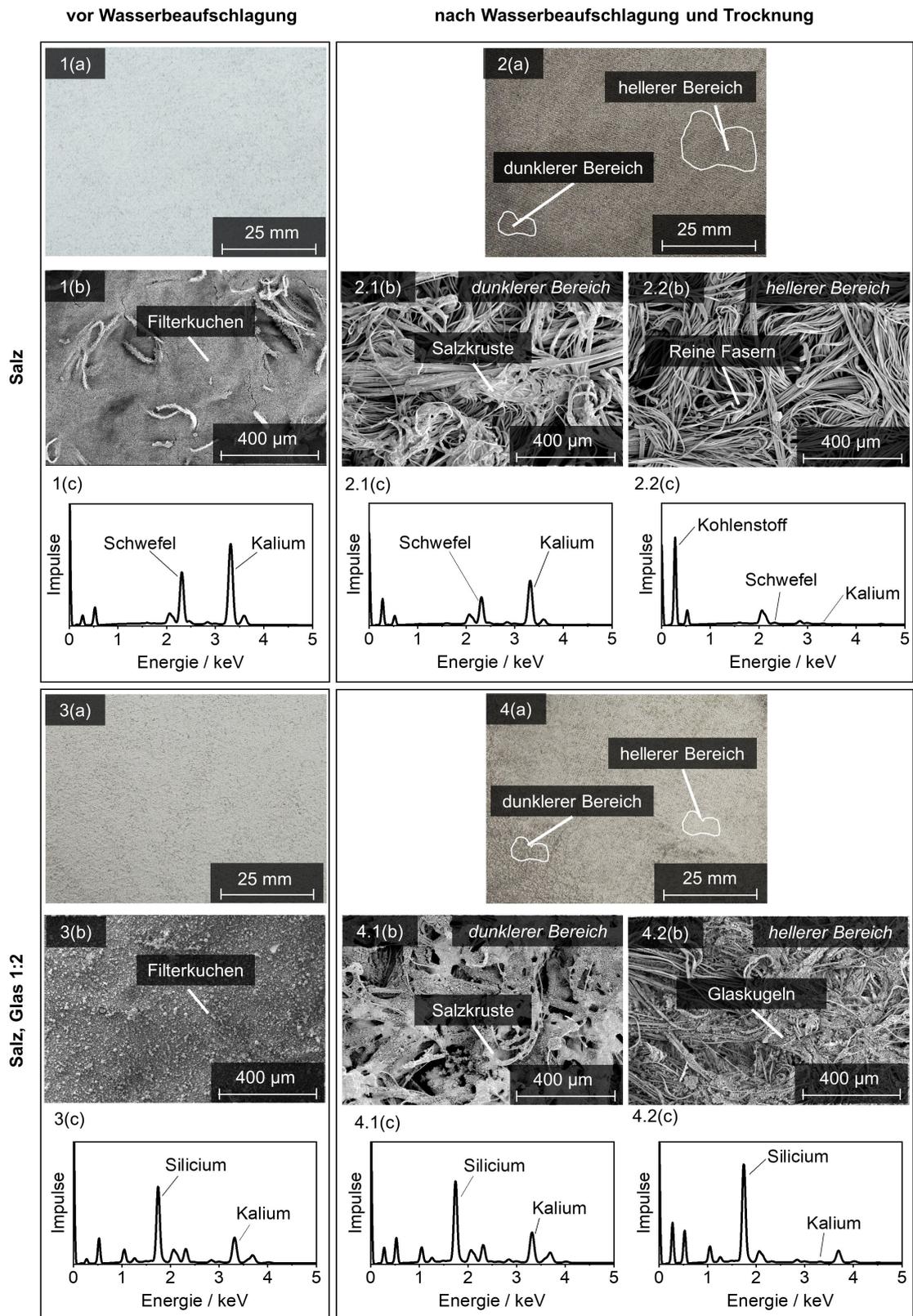


Abbildung 6.9: Fotos (a), REM-Aufnahmen (b) und EDX-Scans (c) der Anströmseite des salzbeladenen Filters vor (1) und nach (2) Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung sowie des mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln im Verhältnis 1:2 beladenen Filters vor (3) und nach (4) Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung.

Tabelle 6.1: Analyse der Drainage in absoluten Werten.

Beladung des Filters	Salzgehalt / mg	Glasgehalt / mg
Unbeladen	0	0
Salzbeladen	19.2	0
Salz- und Glasbeladen	23.4	0
Glasbeladen	0	0

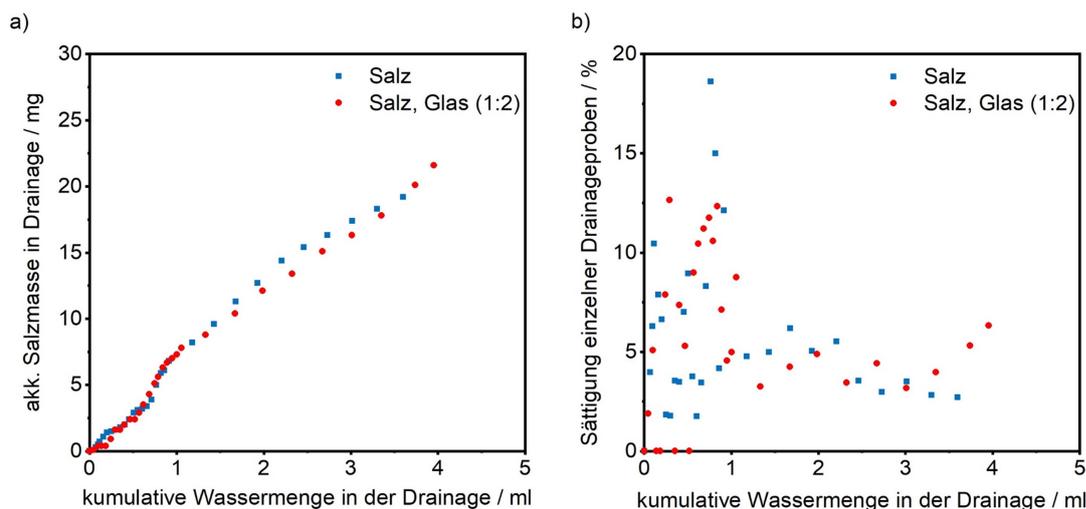


Abbildung 6.10: Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der Drainage eines salzbeladenen und eines mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln im Verhältnis 1:2 beladenen Filters. Die Zeit = 0 markiert den Beginn der Drainage.

Das gelöste Salz penetrierte die gesamte Tiefe des Filtermediums und wurde in der Drainage auf der Reingasseite nachgewiesen. Die penetrierte Salzmenge nimmt mit zunehmender Drainage fast linear zu. Abbildung 6.10 zeigt, dass sich die Salzmassen, welche in der Drainage des salzbeladenen und salz- / glasbeladenen Filters nachgewiesen wurde, nicht signifikant unterscheiden und stützt damit die Aussage, dass unlösliches Material im Filterkuchen keinen wesentlichen Einfluss auf die Menge des durch das Filtermedium penetrierenden Salzes (in Lösung) hat. Die Sättigung der Drainage liegt bis zu einem Volumen von 1 ml zwischen 0 % und 19 % und weist damit eine hohe Streuung im Vergleich zu den darauffolgenden Werten zwischen 3 % und 7 % auf. Im ersten Milliliter der Drainage des salz- und glasbeladenen Filters konnte teilweise kein Salz nachgewiesen werden. Das bedeutet, dass das penetrierende Wasser nicht zwangsläufig mit Salz in Berührung kommt oder soweit verdünnt ist, dass es nicht mehr in der Drainage nachgewiesen werden kann. Insgesamt liegt die Sättigung der Drainage konstant unter 20 %. Abbildung 6.10 b zeigt, dass die Streuung der Sättigung stärker bei der Analyse der ersten Drainageproben bei der Analyse von 1 Probe / 1 min ist. Sie nimmt ab, sobald die Messintervalle größer bzw. die Probenahmerate reduziert wird (1 Probe / 5 min, siehe Details zur Durchführung in Kapitel 4.4). Für zukünftige aufwendige Wägungsanalysen der Drainage mit Wasser ist eine einheitliche Probenahmerate zu empfehlen, sodass ein Einfluss der Probenahme- und Analyseverfahren in den Daten ausgeschlossen werden kann.

Das Eindringen von Salz und die Umlagerung von Partikeln auf der Anströmseite des Filters beeinflusst nicht nur das Betriebsverhalten des Filters in Bezug auf den Differenzdruck, sondern auch den Fraktionsabscheidegrad der Filter. Die Fraktionsabscheidegrade von vier unterschiedlichen Beladungen werden verglichen:

- Ausschließlich mit Salz (131 mg) beladen ($13,1 \text{ g/m}^2$)
- Ausschließlich mit Glas (1000 mg) beladen (100 g/m^2)
- Beladen mit Salz (131 mg) und Glas (262 mg) in einem Verhältnis von 1:2 ($39,3 \text{ g/m}^2$)
- Beladen mit Salz (131 mg) und Glas (786 mg) im Verhältnis 1:6 ($91,7 \text{ g/m}^2$)³

Abbildung 6.11 zeigt den Fraktionsabscheidegrad von vier Filtern vor der Beladung, nach der Beladung und nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung.

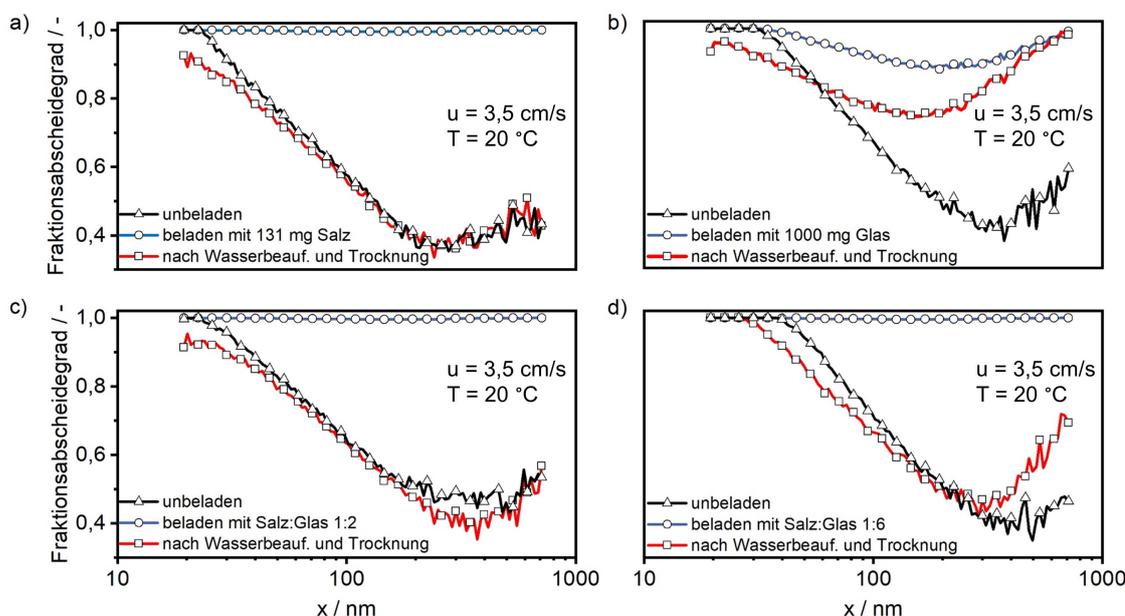


Abbildung 6.11: Fraktionsabscheidegrade vor der Beladung (unbeladen), nach der Beladung (beladen) und nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung eines (a) mit Salz beladenen, (b) mit Glas beladenen, (c) mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln im Verhältnis 1:2 beladenen und (d) mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln im Verhältnis 1:6 beladenen Filters. Die salzhaltigen Filterkuchen enthalten alle die gleiche Salzmasse von 131 mg.

Die MPPS des unbeladenen Filters liegt zwischen 200 und 400 nm, wobei der Fraktionsabscheidegrad etwa 40 % beträgt. Mit Ausnahme des glasbeladenen Filters haben die beladenen Medien einen Fraktionsabscheidegrad von über 98 % für alle Partikelgrößen. Der mit Glas beladene Filter (siehe Abbildung 6.11 b) hat einen geringeren Fraktionsabscheidegrad von knapp über 87 % mit

³ Dieses Verhältnis in der Beladung von löslichem und unlöslichem Partikelmaterial wurde als Wert zwischen reiner Glasbeladung und großem Salzanteil mit salz-glasbeladung (1:2) zusätzlich zur Unterstreichung der Ergebnisse hinzugefügt.

niedrigerer MPPS gegenüber dem unbeladenen Filter. Die Beaufschlagung mit Wassertropfen führt zu einer Abnahme des Fraktionsabscheidegrads, die durch das Umstrukturieren des Filterkuchens verursacht wird. Abbildung 6.11 a und c zeigen, dass der Fraktionsabscheidegrad der salzbeladenen und salz-glasbeladenen Filter Werte erreicht, die denen des unbeladenen Filters nahekommen. Die MPPS des glasbeladenen Filters nimmt ab, während der Fraktionsabscheidegrad über 70 % bleibt (siehe Abbildung 6.11 b). Der Fraktionsabscheidegrad der MPPS des mit Salz und Glas im Verhältnis 1:6 beladenen Filters sinkt auf fast 40 % und auch die MPPS selbst nimmt ab (siehe Abbildung 6.11 d).

Die Betrachtung der Differenzdruckverläufe allein könnte zu dem Schluss führen, Beaufschlagung mit Wassertropfen beladener Filter Sorge für einen geringeren Differenzdruck und ermögliche damit einen energiesparenden und kostengünstigen Filtrationsbetrieb. Pei [106] schlägt beispielsweise vor, die Erkenntnisse des abfallenden Differenzdrucks durch Beaufschlagung mit hoher rel. Luftfeuchtigkeit für eine Optimierung zu längerem Filtereinsatz aufgrund von erhöhter Staubspeicherkapazität bei geringem Differenzdruck zu nutzen. Dies ist als Pauschalaussage für beliebige Stoffsysteme ohne eingehende Prüfung nicht sinnvoll, da Abbildung 6.11 zeigt, dass der Fraktionsabscheidegrad der untersuchten Filter durch Beaufschlagung mit Wassertropfen mit Ausnahme von Partikeln < 30 nm nah der Messgrenze sinkt.

Die beobachtete Abnahme der MPPS bedeutet, dass eine Abnahme in der Abscheidung durch Diffusion und eine Zunahme in der Trägheitsabscheidung vorliegt. Eine inhomogene Struktur des verbleibenden löslichen oder unlöslichen Materials nach der Durchströmungstrocknung der Filter, wie auf den REM-Aufnahmen zu sehen ist (siehe Abbildung 6.9), mit stark beladenen Bereichen einerseits und unbeladenen Bereichen in Form von Rissen oder Lücken andererseits, führt zur Durchströmung insbesondere der unbeladenen Bereiche mit höherer lokaler Anströmgeschwindigkeit. Ein vergleichbarer Effekt ist von Filtern nach unvollständiger Abreinigung bekannt [16], bei der ein Teil des Filterkuchens auf dem Filter verbleibt und Bereiche mit geringerem Strömungswiderstand bildet und es zu einer inhomogenen Durchströmung kommt. Daraus folgt ein reduzierter Differenzdruck gegenüber Filtern mit einem homogenen Filterkuchen und die Abscheidung wird insgesamt schlechter, weil die bevorzugt durchströmten Bereiche keinen Kuchen zur zusätzlichen Abscheidung tragen. Durch die lokal höhere Anströmgeschwindigkeit wird die Abscheidung im Diffusionsbereich schlechter als beim unbeladenen Medium, aber die Trägheitsabscheidung verbessert sich gegenüber dem unbeladenen Medium, woraus die Verschiebung der MPPS zur kleineren Partikelgröße resultiert.

6.2.2 Theoretische Betrachtungen zum Zeitpunkt der Filmbildung

In diesem Kapitel wird der Zeitpunkt der Filmbildung in Abhängigkeit der Beladung der Filter (siehe Kapitel 6.2) näher beleuchtet und anhand dieser Betrachtung werden die Grenzen der Übertragbarkeit des Kanal-Film-Modells diskutiert.

Von Untersuchungen mit mehrlagigen oleophilen Ölnebelfiltern ist bekannt, dass die Dauer bis zur Filmbildung Δt proportional zur Lagenanzahl bzw. Filterdicke und damit zum mit Flüssigkeit gefüllten Volumen ($V_{\text{Fl.}}$) ist [48].

$$\Delta t_{\text{Filter}} \sim V_{\text{Fl.},\text{Filter}} \quad (6.1)$$

Unter der Annahme, dass es sich beim Filterkuchen um eine starre, poröse Struktur mit konstanter Porosität handelt und der Übergang vom Filterkuchen zum Medium vernachlässigbar klein ist, könnte diese Erkenntnis auf das in dieser Arbeit untersuchte Stoffsystem übertragbar sein. Es stellt sich somit die Frage, ob der experimentell ermittelte Wert für die Kanalverzögerung, die durch den Filterkuchen verursachte Verzögerung in der Filmbildung (Δt_{Kuchen}), allein auf das zusätzliche Flüssigkeitsspeichervolumen durch den Filterkuchen zurückzuführen ist.

$$\Delta t_{\text{gesamt}} = \Delta t_{\text{Kuchen}} + \Delta t_{\text{Filter}} \quad (6.2)$$

$$V_{\text{Fl.},\text{gesamt}} = V_{\text{Fl.},\text{Kuchen}} + V_{\text{Fl.},\text{Filter}} \quad (6.3)$$

Dann gilt für Δt_{Kuchen} :

$$\Delta t_{\text{Kuchen}} \sim V_{\text{Fl.},\text{Kuchen}} \quad (6.4)$$

Abbildung 6.12 zeigt grafisch den Zusammenhang zwischen der Dauer bis zur Filmbildung Δt des unbeladenen Filters und die Kanalverzögerung Δt_{Kuchen} an den Differenzdruckkurven während der Beaufschlagung mit Wassertropfen des unbeladenen und des glasbeladenen Filters gegenüber einer schematischen Darstellung des Filterkuchens als Flüssigkeitsspeicher mit $V_{\text{Fl.},\text{Kuchen}}$.

Das von Flüssigkeit eingenommene Volumen im Filterkuchen lässt sich über die Sättigung S und das Hohlraumvolumen (V_{H}) berechnen.

$$S_{\text{Kuchen}} = \frac{V_{\text{Fl.},\text{Kuchen}}}{V_{\text{HKuchen}}} \quad (6.5)$$

Mit bekanntem Gesamtvolumen (V_{G}) lässt sich das V_{H} über die Porosität ε berechnen.

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{H}}}{V_{\text{G}}} \quad (6.6)$$

Für einen Filterkuchen, für den das V_{G} in der Regel nicht bekannt ist, lässt sich das V_{H} über das Feststoffvolumen (V_{Fest}) berechnen.

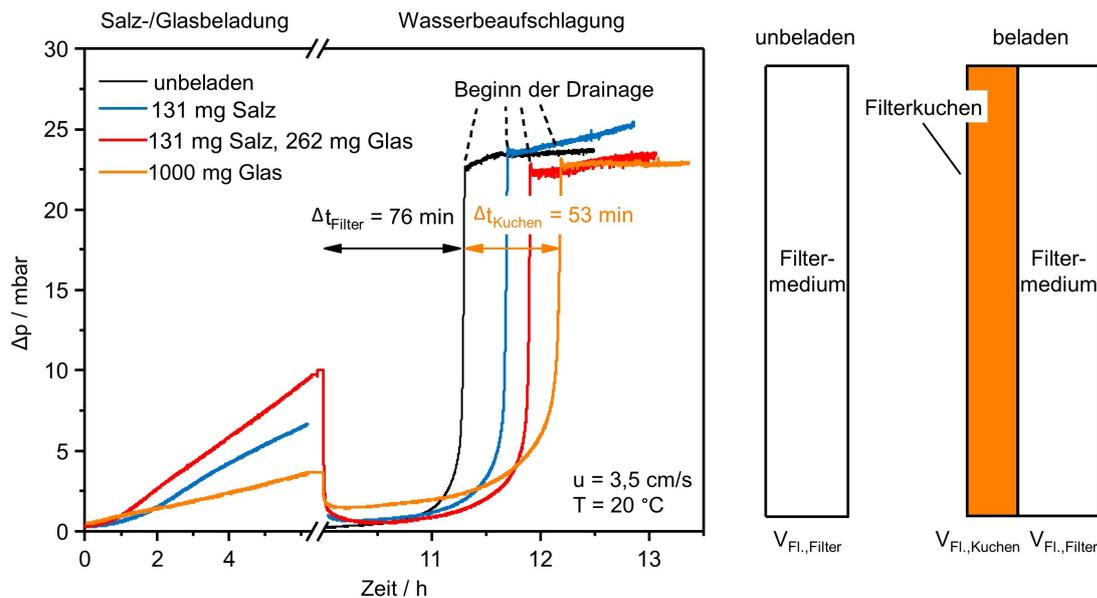


Abbildung 6.12: Differenzdruckverläufe während der Beaufschlagung mit Wassertropfen eines unbeladenen Filters, eines salzbeladenen Filters, eines mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln beladenen Filters und eines glasbeladenen Filters.

$$\varepsilon_{\text{Kuchen}} = \frac{V_{\text{H,Kuchen}}}{V_{\text{H,Kuchen}} + V_{\text{Fest,Kuchen}}} \quad (6.7)$$

Das $V_{\text{Fest,Kuchen}}$ ist dann über die Dichte des Partikelmaterials und die Beladung bestimmbar.

Unter Annahme einer sinnvollen Porosität für den Filterkuchen (0,8) [12] lässt sich $V_{\text{H,Kuchen}}$ berechnen. Unter der konservativen Annahme, dass die Sättigung 1 ist, also der Filterkuchen als maximaler Flüssigkeitsspeicher betrachtet wird und $V_{\text{H,Kuchen}}$ zu 100 % mit Flüssigkeit gesättigt ist, lässt sich $\Delta t_{\text{Kuchen,max}}$ berechnen.

$$\frac{V_{\text{Fl.}}}{\Delta t} = \frac{V_{\text{Fl.,Kuchen}}}{\Delta t_{\text{Kuchen,max}}} \quad (6.8)$$

Es ergeben sich die in Tabelle 6.2 gezeigten Werte und daraus berechneten Δt_{Kuchen} , die im Folgenden mit den experimentellen Werten verglichen werden.

Zur Prüfung des glasbeladenen Filters, auf den die Annahme der unveränderten Porosität am besten zutrifft, ergibt sich mit den Werten aus Tabelle 6.2 für $\Delta t'$:

$$\Delta t'(\text{berechnet}) = 13\text{min} \quad (6.9)$$

Mit den Annahmen, die zu einer maximal durch den Filterkuchen verursachten Verzögerung in der Filmbildung führen, ergibt sich eine Kanalverzögerung von 13 min. Dieser Wert ist kleiner als der aus Abbildung 6.8 ersichtliche Wert von 53 min, was zeigt, dass diese Verzögerung im

Tabelle 6.2: Hohlraumvolumen für Filter mit unterschiedlichen Beladungen.

Beladungsart	K ₂ SO ₄	Glas:K ₂ SO ₄ 1:2	Glas
Δt_{Kuchen} (experimentell) in min	24	36	53
$\varepsilon_{\text{Kuchen}}$ (angenommen)	0,8	0,8	0,8
Masse Filterkuchen in g	131	262	998
$V_{\text{Fest.,Kuchen}}$ in m ³	$4,92 \cdot 10^{-8}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$	$3,99 \cdot 10^{-7}$
$V_{\text{H.,Kuchen}}$ in m ³	$1,97 \cdot 10^{-7}$	$4,06 \cdot 10^{-7}$	$1,60 \cdot 10^{-7}$
$V_{\text{Fl.,Kuchen}}$ in m ³	$1,97 \cdot 10^{-7}$	$4,06 \cdot 10^{-7}$	$1,60 \cdot 10^{-7}$
$\Delta t_{\text{Kuchen,max}}$ (berechnet) in min	1,6	3,3	13,0
$\varepsilon_{\text{Kuchen}}$ (berechnet)	0,983	0,978	0,942

„Sprung“ nicht ausschließlich mit dem zusätzlichen $V_{\text{H.,Kuchen}}$ bzw. der Kuchenbeschaffenheit begründet werden kann. Umgekehrt würde eine Verzögerung der Filmbildung von 53 min bei der angenommenen Sättigung von 100 % einer $\varepsilon_{\text{Kuchen}}$ von 0,94 entsprechen. Diese Porosität liegt, wenn auch höher als angenommen, in einem möglichen Bereich. Dies lässt darauf schließen, dass die in der Ölnebelfiltration gewonnen Erkenntnisse zumindest in ihren Ansätzen auf Oberflächenfilter mit Filterkuchen übertragbar sein können. Bei dem Vergleich eines mehrlagigen Filters mit nur einer Filtermedienlage muss beachtet werden, dass bei der ersten Lage eine höhere Sättigung und kein definierter Kanalbereich in der anströmseitigen Lage auftritt [48]. Bei mehreren Lagen wird dieser Erstelage-Effekt vernachlässigbar.

Eine experimentelle Abschätzung der Porosität ist über die Höhe des Filterkuchens möglich. Die Kuchenhöhe des glasbeladenen Filters nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung konnte mit einem LSM, anhand eines unbeschädigten Randstücks der Filterrunde nach Entnahme aus der Anlage, auf 148,33 μm bestimmt werden. Vor der Beaufschlagung mit Wassertropfen war keine Messung mit LSM möglich, da keines der glasbeladenen Filtermedien aus der Anlage entnommen werden konnte, ohne die Struktur des Filterkuchens zu beschädigen. Damit folgt

$$M = \frac{Ah(1 - \varepsilon)\rho}{A} \quad (6.10)$$

wo M die Flächenbeladung, A die beladenen Filterfläche, h die Höhe des Filterkuchens and ρ die Dichte der Partikeln ist. Damit lässt sich eine Porosität von 0,73 bestimmen. Dies entspricht einer noch geringeren Kanalverzögerung.

$$\Delta t'(\text{experimentell}) = 8,8 \text{ min} \quad (6.11)$$

Wesentliche Unterschiede verglichen mit dem Kanal-Film-Modell bestehen im Stoffsystem, durch das lösliche Salz mit sich zeitlich veränderndem Zustand und die unlöslichen Glaspartikeln, die den Wasserspeicherraum im System beeinflussen. Dies führt zu signifikant anderem Verhalten bei

der Penetration von Flüssigkeit auf die Reingasseite. Bei den salzbeladenen Filterkuchen lösen sich die Salzpartikeln durch Erhöhung der rel. Luftfeuchtigkeit über die Deliqueszenzfeuchte und durch direkten Kontakt mit Wassertropfen. In diesem Fall kann der Filterkuchen also nicht als starrer, stabiler Wasserspeicher betrachtet werden. Nur bei einem Filterkuchen aus unlöslichen Glaskugeln wäre anzunehmen, dass er als solcher betrachtet werden kann. Allerdings ist auch bei Glaskugeln eine Abnahme des Differenzdrucks und damit eine Veränderung des Filterkuchens bei der Beaufschlagung mit Wassertropfen beobachtet worden. Somit beschreibt $\Delta t'$ (experimentell) den Filterkuchen aus Glaskugeln nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen, basierend auf der Porosität, die nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung ermittelt wurde. Das Verhalten des Differenzdrucks beim Filterkuchen aus Salz- und Glaspartikeln (siehe Abbildung 6.12) ist mit einer Überlagerung der Effekte eines rein salzbeladenen und rein glasbeladenen Filtermediums zu erklären.

6.3 Kristallisation von Salz im Filtermedium

Von den in 3.1 aufgeführten Szenarien wurden die anströmseitige Umlagerung von Partikeln (siehe Kapitel 5) und die Penetration durch die gesamte Tiefe des Filters (siehe Kapitel 6.1) bisher untersucht und erläutert. Wie die Analyse eines Aufbaus aus einer einzelnen Filterlage, im Folgenden als einlagiger Filter bezeichnet, zeigt (siehe Kapitel 6.1), ist mittels REM und μ -CT kein Salz im Filterinnern nachweisbar. Durch die Untersuchung von Aufbauten, in denen mehrere Filtermedienlagen als eine betrachtet werden, im Folgenden als mehrlagiger Filter bezeichnet, konnten Erkenntnisse über die Partikelmaterialverteilung im Inneren des Filtermediums (siehe Kapitel 4.3.3) gewonnen werden. Dabei werden 4 Lagen desselben Filtermediums hintereinander geklemmt und als ein Filtermedium, das die vierfache Dicke des einlagigen Mediums besitzt, betrachtet.

Die vier einzelnen Medienlagen ermöglichen eine Unterteilung in einen Anströmbereich, die Filterlage 1, einen mittleren Bereich, der sich aus der Filterlage 2 und 3 zusammensetzt, und einen abströmseitigen Bereich, die Filterlage 4. Die gravimetrische Analyse der einzelnen Lagen gibt Aufschluss über die Salzverteilung im Filterinneren. Dies ermöglicht die Untersuchung einer mittelfristigen Beaufschlagung, das heißt einer Langzeitbeaufschlagung, die vor Beginn der Filmbildung unterbrochen wird, und einer intermittierenden Beaufschlagung, also einer Langzeitbeaufschlagung mit einer Unterbrechung, während welcher der Filter nach der in Kapitel 4.4 beschriebenen Durchführung getrocknet wird und somit Lösungs- und Kristallisationsprozess mehrfach auftreten.

Da diese Methode bisher noch keine Anwendung in der Forschung der Oberflächenfiltration mit löslichen Partikeln gefunden hat, ist zunächst zu prüfen, ob die Erkenntnisse, die mit einem vierlagigen Filter gewonnen werden, auch wirklich auf einen Filter mit einer Lage übertragbar sind.

6.3.1 Prüfung der Anwendbarkeit eines mehrlagigen Filteraufbaus

Ein Vergleich eines einlagigen und eines vierlagigen Filters mit gleicher Salzbeladung während der Beaufschlagung mit Wassertropfen dient der Prüfung der Übertragbarkeit von Beobachtungen und Erkenntnissen von mehrlagigen auf einlagige Filter, wie oben ausgeführt. Abbildung 6.13 zeigt den Differenzdruck eines salzbeladenen einlagigen Filters (wie er bereits in Kapitel 6.1 diskutiert wurde) abzüglich Δp_0 im Vergleich zum Differenzdruck eines salzbeladenen vierlagigen Filters abzüglich Δp_0 während der Beaufschlagung mit Wassertropfen.

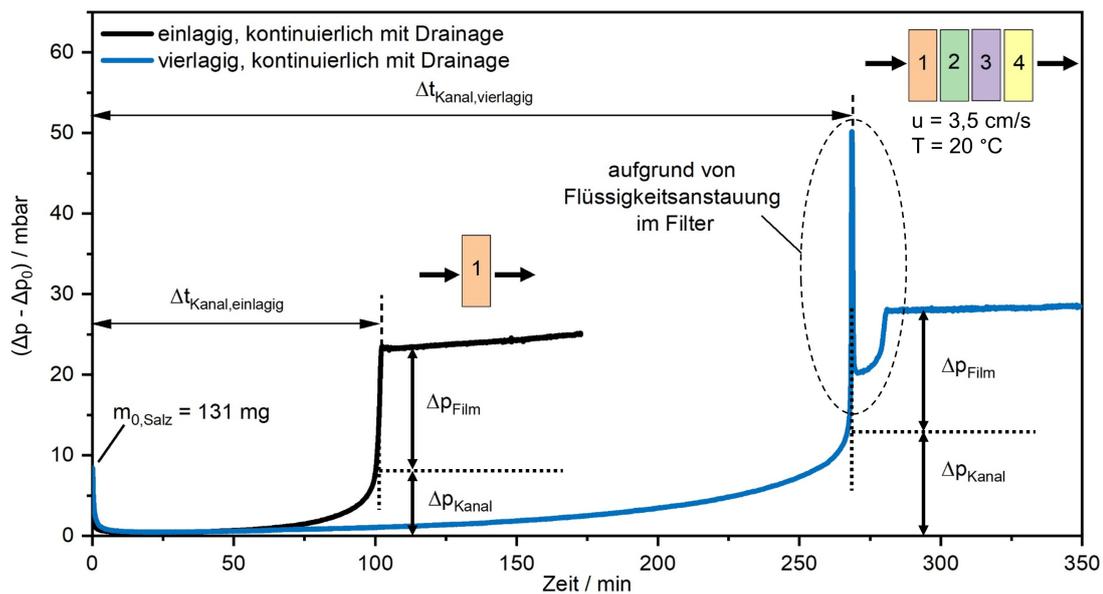


Abbildung 6.13: Differenzdruck ($\Delta p - \Delta p_0$) eines salzbeladenen einlagigen Filters und eines salzbeladenen vierlagigen Filters während der Beaufschlagung mit Wassertropfen.

Nach Beladung mit 131 mg Salz sinkt auch der Differenzdruck des vierlagigen Filters zu Beginn der Beaufschlagung mit Wassertropfen auf einen Differenzdruck nahe Δp_0 . Die Zeit der Flüssigkeitspenetration durch das Filtermedium, der Kanalbereich des Differenzdruckverlaufs bis zur Filmbildung, δt_{Kanal} , verlängert sich und der Differenzdruck des Kanalabschnitts Δp_{Kanal} nimmt mit der Filterdicke zu. Der Differenzdruck des vierlagigen Filters zeigt einen unerwartet steilen Anstieg des Differenzdrucks bis ca. 50 mbar bei der Filmbildung. Es folgt ein Abfall des Differenzdrucks mit dem die Drainage startet, bevor der Differenzdruck wieder ansteigt und auf etwa 30 mbar den erwarteten quasi-stationären Zustand erreicht. Abbildung 6.13 zeigt, dass der aus der Filmbildung resultierende Differenzdruck Δp_{Film} , hier definiert als Differenzdruck ab einer Steigung von 2 mbar / 5 min bis zum Anfangsdifferenzdruck des quasi-stationären Zustands, des vierlagigen Filters dem Δp_{Film} des einlagigen Filters entspricht.

Die Beobachtungen aus Abbildung 6.13 passen zu den Ergebnissen aus Experimenten mit Ölnebelfiltern, die nahelegen, dass die Lagenanzahl in erster Linie den Kanalbereich, also den Differenzdruckverlauf bis zur Filmbildung tangiert, während die Filmbildung selbst kaum davon beeinflusst

ist (siehe Kapitel 6.2.2). Während der Differenzdruck durch die Filmbildung die gleiche Größe beibehält und sich dessen Aufbau nur leicht verzögert, verlängert sich der Kanalbereich. Demzufolge erhöht sich der finale Differenzdruck dieses Bereichs, der den Punkt markiert, an dem die Filmbildung startet, bei Ölnebeln proportional zur Filterdicke.

Abbildung 6.13 zeigt, dass der proportionale Zuwachs von Δt_{Kanal} und Δp_{Kanal} bei dem salzbeladenen Oberflächenfilter nicht gegeben ist, der Δp_{Film} jedoch wie bei mehrlagigen Filtern in der Ölnebelnfiltration unverändert bleibt. Bei der Beaufschlagung mit Wassertropfen der mehrlagigen Filter tritt zu Beginn der Drainage ein steiler Anstieg bis über 50 mbar durch Anstauung von Flüssigkeit im Filter auf. Bei Erreichen eines Differenzdruckes über 50 mbar kam es zu einem abrupten abströmseitigen Austritt von Flüssigkeit, der am unteren, äußeren Rand des Filtermediums visuell zu beobachten war, mit dem vorhandenen optischen Aufbau aber aufgrund von Reflexion und steilem Winkel nicht festgehalten werden konnte. Der Austritt der Flüssigkeit spiegelt sich im Differenzdruckverlauf durch ein Absinken und ein anschließendes Ansteigen des Differenzdrucks auf einen Wert von 28 mbar wider, ab dem der Differenzdruck einen quasi-stationären Zustand erreicht, der auch bei einlagigen Filtern nach der Drainage zu beobachten ist (siehe Abbildung 6.13). Bei der schnellen Änderung des Differenzdrucks durch die Flüssigkeitsanstauung ist ein Überschwingen im Differenzdrucksensor bei Differenzdruckabfall nicht auszuschließen. Eine Erklärung für die Anstauung von Flüssigkeit im Filtermedium kann auf Basis der vorliegenden Versuche an dieser Stelle bisher nicht geliefert werden. Aufgrund der sich lösenden Flüssigkeitsanstauung im Filter weist die erste Probe der Drainage eine sehr große Lösungsmenge verglichen mit einlagigen Filtern auf. Ein detaillierter Drainagevergleich findet sich in Abbildung 6.14 a). Abbildung 6.14 b) zeigt die Ergebnisse der gravimetrischen Analyse des einlagigen und vierlagigen Filters.

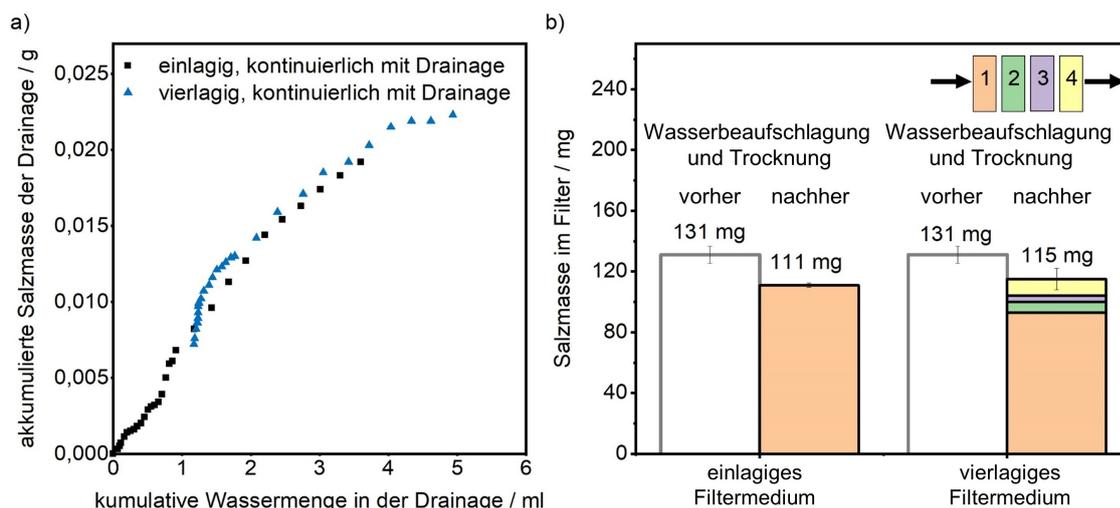


Abbildung 6.14: Vergleich der Ergebnisse der gravimetrischen Analyse des einlagigen und vierlagigen Filters von a) Drainage und b) Filterlagen.

Ein Vergleich der Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der beiden Filter (siehe Abbildung 6.14 b) zeigt, dass der überwiegende Salzanteil nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und anschließender Durchströmungstrocknung in der ersten Filterlage verbleibt.

Abgesehen von der ersten Probe der Drainage, welche die angestaute Lösung enthält, ist der Salzgehalt der Drainage, die den vierlagigen Filter abströmseitig verlässt, sehr ähnlich zu dem des einlagigen Filters (siehe Abbildung 6.14 a). Die erste Drainageprobe des vierlagigen Filters enthält viel mehr Lösung und Salz als die des einlagigen Filters. Dies ist wiederum eine Folge der zuvor beschriebenen Flüssigkeitsansammlung im Filter, welche das auffällige Maximum im Differenzdruckverlauf bei der Filmbildung verursacht.

Ein Vergleich der Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der beiden Filter (siehe Abbildung 6.14 b) zeigt, dass beide Filter nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und der Durchströmungstrocknung eine vergleichbare Menge an Salz enthalten. Die Analyse des vierlagigen Filters gibt zusätzlich Aufschluss darüber, dass das Salz überwiegend in der ersten Filterlage auf der Anströmseite des Filtermediums kristallisiert. Dies bestätigt die Beobachtungen aus Kapitel 6.1, wonach bei einer Langzeitbeaufschlagung eines salzbeladenen hydrophilen Filtermediums mit Wassertropfen und anschließender Durchströmungstrocknung das im Filter verbleibende Salz überwiegend auf der Anströmseite des Filtermediums auskristallisiert.

Der Vergleich zwischen dem einlagigen und dem vierlagigen Filter zeigt, dass die Ergebnisse von mehrlagigen Filtern mit denen von einlagigen Filtern vergleichbar sind. Zu einer Anstauung von Lösung im Filtermedium kommt es nur bei mehrlagigen Oberflächenfiltern. Auf Basis dieser Untersuchung werden mehrlagige Filter im Folgenden eingesetzt, um die Salzverteilung über die Tiefe von Filtermedien zu untersuchen.

6.3.2 Differenzdruckverläufe und Salzverbleib in Abhängigkeit der Betriebsweise während der Beaufschlagung mit Wassertropfen

Ein vierlagiger Filter wird analog zu den bisherigen Versuchen (siehe Kapitel 6.3.1 und Kapitel 4) mit löslichem K_2SO_4 beladen, mit Wassertropfen beaufschlagt und getrocknet. Die Beaufschlagung wird allerdings frühzeitig, nach einer Beaufschlagungsdauer von 70 % der Beaufschlagungsdauer bis zur Filmbildung des vierlagigen Filters beendet, was einer Beaufschlagungszeit von 190 min entspricht (siehe Abbildung 6.15, mittelfristige Beaufschlagung). Dadurch wird die Beaufschlagung mit Wassertropfen gestoppt, bevor eine Filmbildung oder Drainage einsetzt. Abbildung 6.15 zeigt den Differenzdruckverlauf ($\Delta p - \Delta p_0$) von dem vierlagigen salzbeladenen Filter aus Abbildung 6.13 während der kontinuierlichen Beaufschlagung mit Wassertropfen mit Drainage und von einem vierlagigen salzbeladenen Filter, der 190 min nach Beginn der Beaufschlagung mit Wassertropfen getrocknet wurde. Zusätzlich sind die zugehörigen Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der beiden Filter gezeigt.

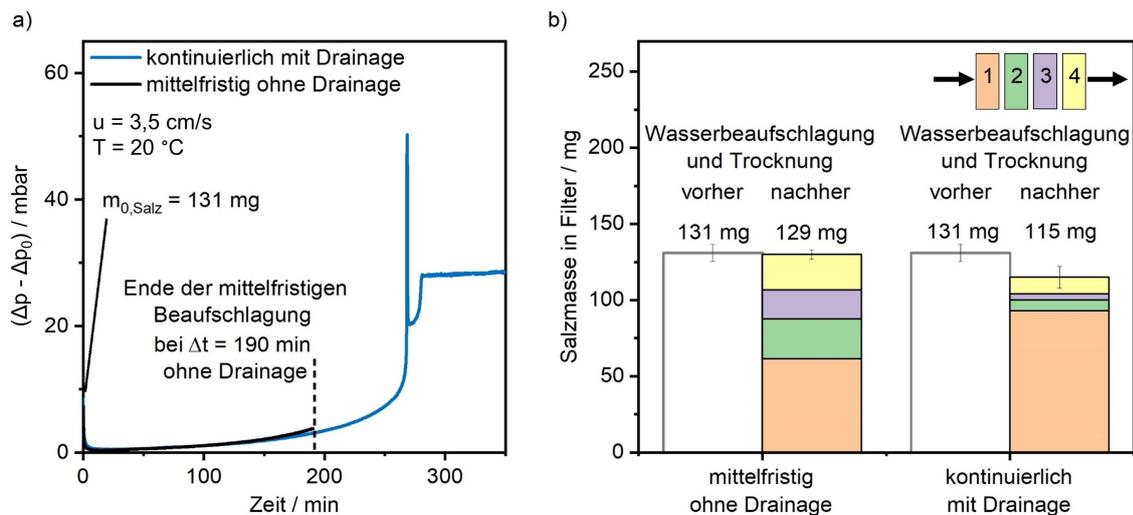


Abbildung 6.15: Vergleich von zwei vierlagigen Filtern, die mit Salz beladen, 190 und 350 Minuten lang mit Wasser beaufschlagt und durch Durchströmung getrocknet wurden: a) Differenzdruck ($\Delta p - \Delta p_0$) und b) die Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der Filterlagen.

Abbildung 6.15 a) zeigt, dass sich der Differenzdruck beider Filter bis zum Ende der mittelfristigen Beaufschlagung nahezu deckungsgleich entwickelt. Abbildung 6.15 b) bestätigt, dass bei dem Filter, der 190 min mit Wasser beaufschlagt wurde und bei dem keine Drainage zu beobachten war, von den $131 \text{ mg} \pm 2 \text{ mg}$ K_2SO_4 kein Salz während des Versuches das Filtermedium verlassen hat. Außerdem zeigt sie, dass ein erheblicher Teil des im Filter verbleibenden Salzes in Filterlage 2 bis 4 auskristallisiert. Dies beweist, dass bereits an Oberflächenfiltern abgeschiedenes Salz durch Beaufschlagung mit Wassertropfen in die Filter penetrieren und dort bei anschließender Durchströmungstrocknung auskristallisieren kann. Nach einer länger anhaltenden kontinuierlichen Langzeitbeaufschlagung über den Eintritt einer Drainage hinaus hat, wie zu erwarten, Salz, gelöst in der abströmseitigen Drainageflüssigkeit, das Filtermedium verlassen. Das übrige Salz verbleibt überwiegend in der anströmseitigen Filterlage 1, wo abschließend nach Durchströmungstrocknung absolut mehr Salz als nach mittelfristiger Beaufschlagung und Durchströmungstrocknung verbleibt.

Im Folgenden wird ein Filter beschrieben und diskutiert, das intermittierend mit zwei Zyklen, jeweils bestehend aus Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung, beaufschlagt wurde. Dabei ist der erste Zyklus analog zur mittelfristigen Beaufschlagung durchgeführt worden. Die Durchströmungstrocknung wurde nach 190 min vor Eintritt einer abströmseitigen Drainage eingeleitet. Der zweite Zyklus entspricht der kontinuierlichen Langzeitbeaufschlagung mit Beaufschlagung über die Drainage hinaus (siehe Kapitel 6.1). Der Differenzdruckverlauf des Filters ist in Abbildung 6.16 neben dem der Filter während mittelfristiger und kontinuierlicher Beaufschlagung ab Beginn der Wasserbeaufschlagung dargestellt.

Der Differenzdruckverlauf bei Beaufschlagung mit Wassertropfen ohne Drainage (0 bis 190 min) ist nahezu deckungsgleich mit dem der kontinuierlichen Beaufschlagung und der intermittierenden Beaufschlagung. Die Differenzdruckverläufe der kontinuierlichen Beaufschlagung (0 bis 350 min) und des zweiten Beaufschlagungszyklus der intermittierenden Beaufschlagung (530 bis 860 min)

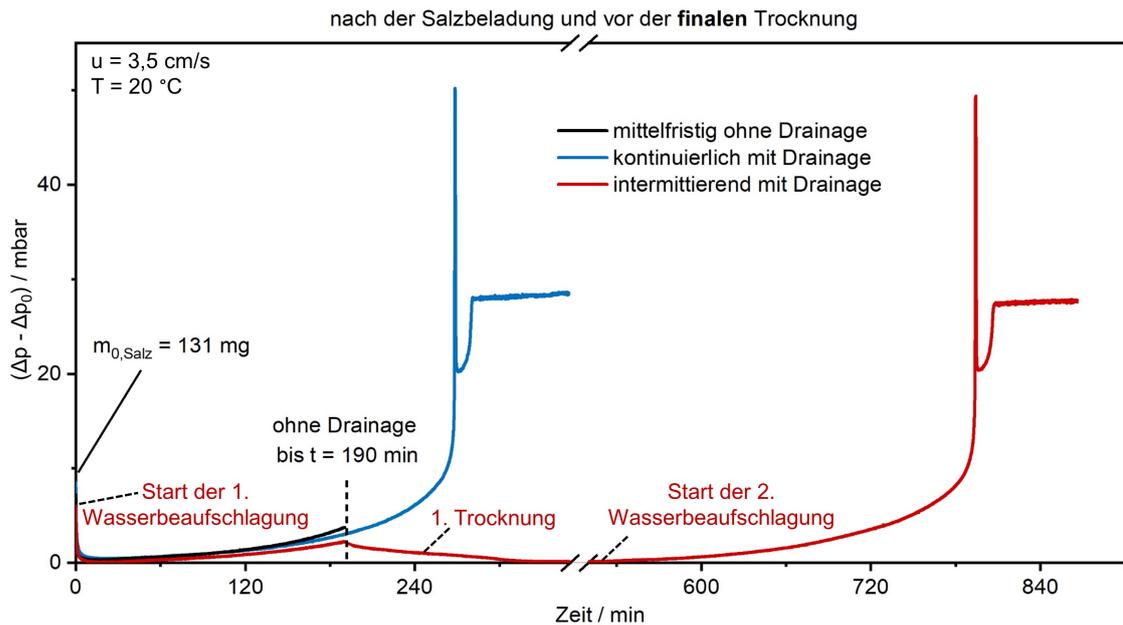


Abbildung 6.16: Differenzdruckverlauf von vierlagigen Filtern während der mittelfristigen Beaufschlagung ohne Drainage, der kontinuierlichen Beaufschlagung mit Drainage und der intermittierenden Beaufschlagung mit Drainage. Die Zeit $t = 0$ markiert den Start der Wasserbeaufschlagung.

sind ebenfalls nahezu deckungsgleich und zeigen den charakteristischen „Sprung“ während der Filmbildung. Im quasi-stationären Zustand zeigen beide Verläufe Abweichungen im Rahmen der Wiederholbarkeit (siehe Abbildung 6.7). Abbildung 6.17 zeigt den Differenzdruckverlauf des vierlagigen Filters während der kontinuierlichen Langzeitbeaufschlagung mit Drainage und des vierlagigen Filters während der zweiten Beaufschlagung mit Wassertropfen der intermittierenden Langzeitbeaufschlagung mit Drainage (siehe Abbildung 6.17 a) und die Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der zugehörigen Drainagen.

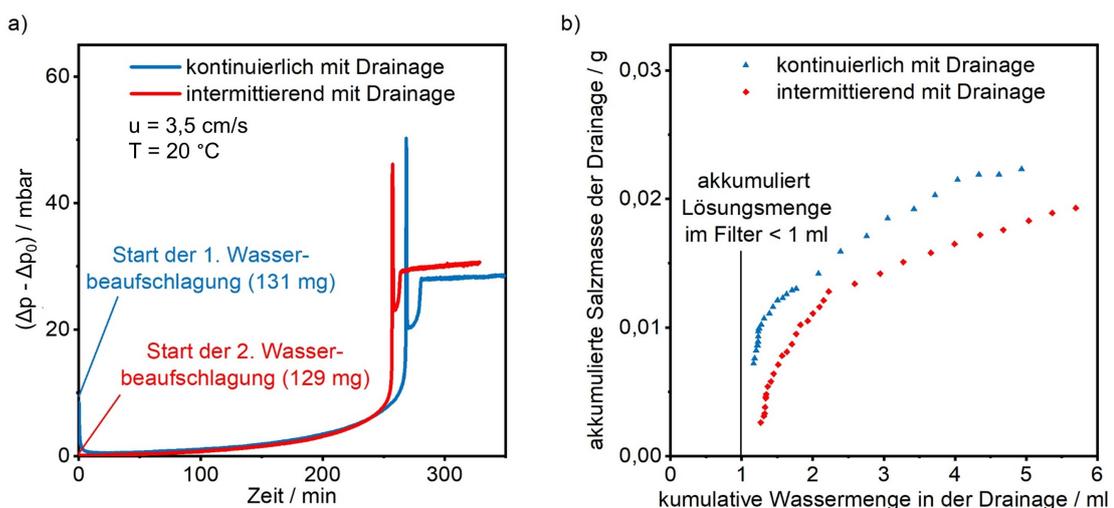


Abbildung 6.17: a) Differenzdruckverlauf von vierlagigen Filtern während der zweiten / finalen Beaufschlagung mit Wassertropfen mit Drainage bei intermittierendem Betrieb im Vergleich zum Verlauf während einmaliger, kontinuierlicher Langzeitbeaufschlagung, wobei die Zeit $t = 0$ den Start der Wasserbeaufschlagung markiert, und b) gravimetrische Analysen der zugehörigen Drainagen.

Im Vergleich zum zuvor beschriebenen und diskutierten Differenzdruckverlauf des vierlagigen Filters bei kontinuierlicher Langzeitbeaufschlagung, zeigt der Verlauf während der letzten Beaufschlagung des intermittierenden Betriebs einen leicht kürzeren Kanalbereich und eine etwas frühere Filmbildung (siehe Abbildung 6.17 a). Die verbleibende Salzmasse von 129 mg im Innern des Mediums zu Beginn des zweiten Zyklus der intermittierenden Beaufschlagung ist aus den Untersuchungen zur mittelfristigen Beaufschlagung bekannt (siehe Abbildung 6.15).

Die Analyse der Drainage zeigt, dass bei kontinuierlichem und intermittierendem Betrieb knapp über 1 ml an Lösungsmenge im Filter akkumuliert, die in der ersten Drainageprobe aufgefangen wird (siehe Abbildung 6.17 b). In der Drainage des intermittierend beaufschlagten Filters ist in diesem Einzelversuch weniger Salz nachgewiesen worden als nach kontinuierlicher Langzeitbeaufschlagung.

Für einen direkten Vergleich der durchschnittlichen finalen Salzverteilungen im Filter nach den unterschiedlichen Filtrationsbetrieben zeigt Abbildung 6.18 die Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der vierlagigen Filter nach mittelfristiger, kontinuierlicher Langzeit- und intermittierender Beaufschlagung und Durchströmungstrocknung.

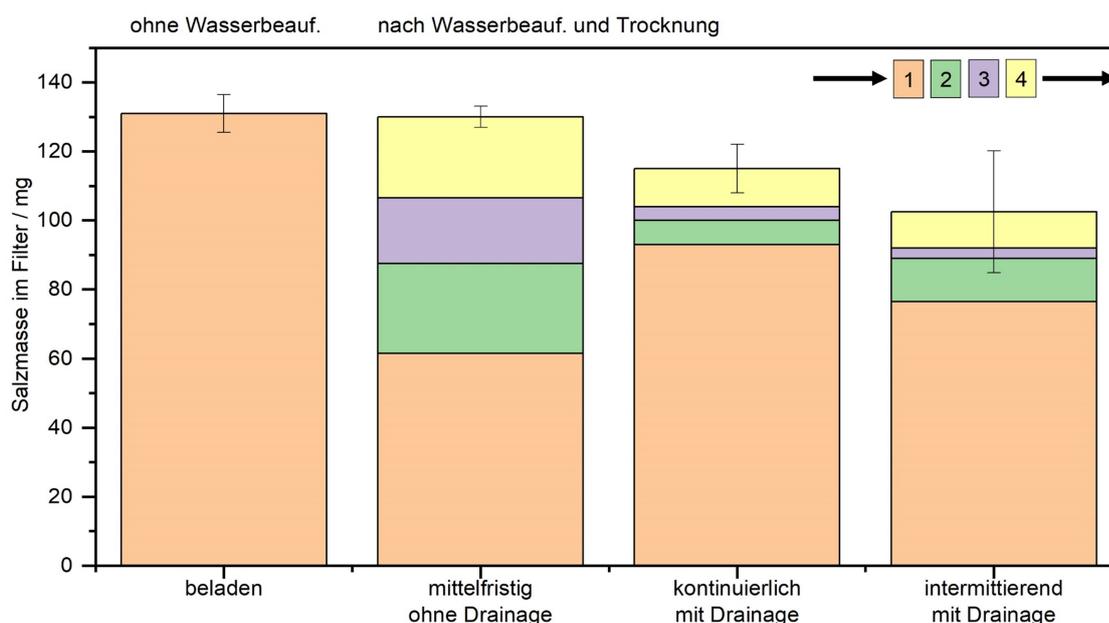


Abbildung 6.18: Salzverteilung innerhalb der mittels Durchströmungstrocknung getrockneten Filter unterteilt in 4 Lagen nach Beladung, nach mittelfristiger Beaufschlagung mit Wassertropfen, nach kontinuierlicher Langzeitbeaufschlagung und nach intermittierender Beaufschlagung.

Abbildung 6.18 zeigt zunächst, dass sich nach der Salzbeladung 131 mg Salz in der bzw. als Filterkuchen auf der anströmseitigen Filterlage 1 befinden. Nach Beaufschlagung mit Wassertropfen ohne Drainage verbleiben etwa 50 % des Salzes in den Filterlagen 2 bis 4. Bei intermittierender Beaufschlagung mit Drainage verlässt nach der 1. Durchströmungstrocknung (Zustand wie nach mittelfristiger Beaufschlagung ohne Drainage) durch erneute Beaufschlagung mit Wassertropfen

ein Teil des Salzes das Filtermedium in der abströmseitigen Drainageflüssigkeit. Das Salz im Filter verbleibt, trotz längerer Beaufschlagungsdauer, abschließend nach der Durchströmungstrocknung überwiegend in Filterlage 1 (> 70%). Absolut verbleibt nach intermittierender Beaufschlagung mit Durchströmungstrocknung mehr Salz in Filterlage 1 als nach Beaufschlagung ohne Drainage mit Durchströmungstrocknung. Lagen 2 bis 4 enthalten entsprechend weniger Salz. Auch nach einer kontinuierlichen Beaufschlagung mit Drainage verbleibt das Salz, das nicht in der Drainagelösung ausgetragen wurde, nach Durchströmungstrocknung überwiegend in Filterlage 1. Die Salzverteilung im Filter nach kontinuierlicher und intermittierender Beaufschlagung und Durchströmungstrocknung unterscheidet sich zwar quantitativ, die Charakteristik (kleiner Anteil, der über die Drainage das Medium verlässt, wenig Salz in Filterlage 2 bis 4 und mehr Salz in Filterlage 1 als nach Beaufschlagung ohne Drainage) bleibt jedoch gleich. Dieses Ergebnis der gravimetrischen Analyse der Filterlagen ist überraschend, da der Filter, der einer intermittierenden Beaufschlagung ausgesetzt wurde, nach dem ersten Zyklus analog zur mittelfristigen Beaufschlagung substantielle Mengen an Salz im Filterinneren (Filterlagen 2 bis 4) hat. Die Verteilung nach der mittelfristigen Beaufschlagung ist als Zwischenschritt der intermittierenden Beaufschlagung aus den Salzverteilungen im Filter nach abschließender Durchströmungstrocknung nicht mehr ersichtlich und hat insgesamt keinen wesentlichen Einfluss auf die Salzverteilung nach abschließender Durchströmungstrocknung. Es folgt eine Untersuchung zum Einfluss der Durchströmungstrocknung, die Erklärungsansätze liefert.

6.3.3 Einfluss des Trocknungsprozesses auf die Salzverteilung im Filter

In dieser Arbeit wurde wiederholt gezeigt, dass die Beladung mit löslichen, aber auch unlöslichen Partikeln mit einer anschließenden Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung zum Auskristallisieren des Salzes überwiegend auf der Anströmseite des Filters führt. Untersuchungen zur Verdunstung von Wasser aus Schüttungen zeigen, dass die bei der Durchströmungstrocknung in das Filtermedium eindringende trockene Luft das Wasser in den großen Poren verdrängt und es zu Kapillarströmungen in kleinen Poren entgegen der Trocknungsrichtung kommt, sodass das Salz an der Anströmseite während der Trocknung auskristallisiert [85]. Diese Untersuchungen zum Trocknen von porösen Strukturen aus anderen Forschungsbereichen (siehe Kapitel 2.4) stützen die Hypothese, dass die Trocknungsrichtung die Position des auskristallisierten Salzes bestimmt. Um diese Hypothese experimentell zu überprüfen und die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Publikationen zu Trocknung poröser Strukturen auf Filter zu zeigen, wurde ein Filter wie bisher mit Salz beladen und mit Wassertropfen beaufschlagt (siehe Kapitel 4.4), aber aus entgegengesetzter Richtung getrocknet, sodass die Trocknungsanströmseite nicht der Anströmseite während Beladung oder Beaufschlagung entspricht. Abbildung 6.19 zeigt die zwei sich in ihrer Richtung unterscheidenden Trocknungsprozesse schematisch und die Salzverteilung in zwei vierlagigen Filtern nach identischer Salzbeladung und Beaufschlagung mit Wassertropfen, und Trocknung aus unterschiedlichen Richtungen, wobei die Filterlage 1 immer die Lage in Anströmrichtung und Filterlage 4 in Abströmrichtung während der Beladung bezeichnet.

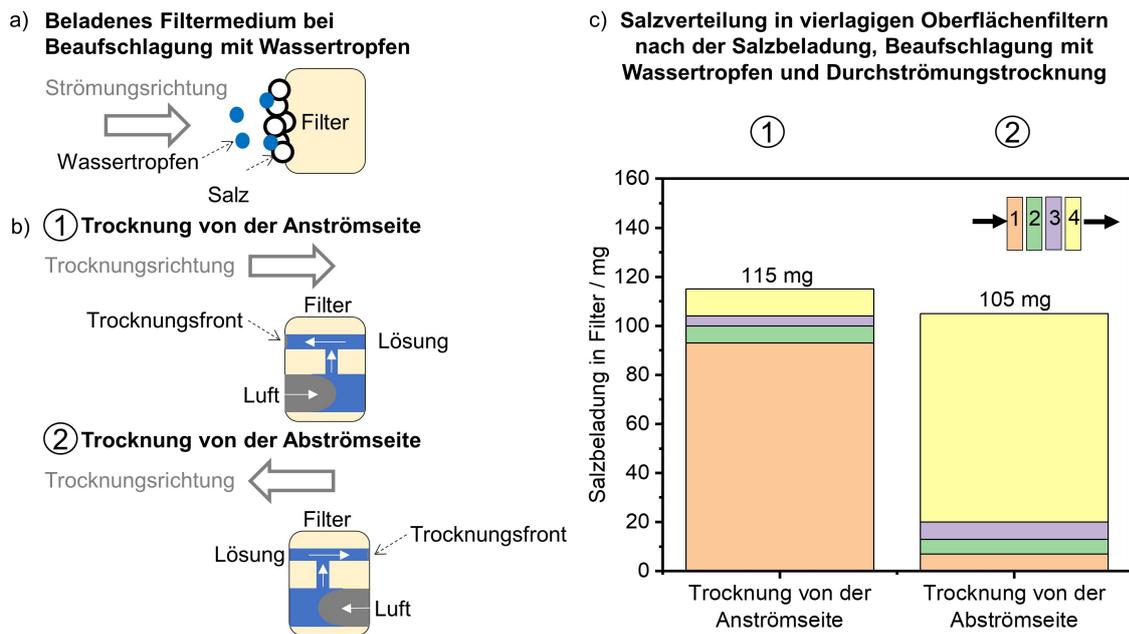


Abbildung 6.19: a) Schematische Darstellung der Wasserbeaufschlagung eines Salzbeladenen Filters mit Beaufschlagungs-Anströmseite, b) schematische Darstellung der Momentaufnahme des Filters bei beginnender mechanischer Entfeuchtung und c) Massenverteilung von Salz in vierlagigen Filtern nach Salzbeladung, Beaufschlagung mit Wassertropfen mit (1) Durchströmungstrocknung von der Beaufschlagungs-Anströmseite (aus der gleichen Richtung wie bei der Beladung) und (2) Durchströmungstrocknung aus der entgegengesetzten Richtung bzw. von der Beaufschlagungs-Abströmseite.

Abbildung 6.19 bestätigt, dass die Trocknungsrichtung einen großen Einfluss auf die Position des Salzes im Filter nach Versuchsende hat. Im Falle der anströmseitigen Trocknung befindet sich der Großteil des Salzes in Filterlage 1 und im Falle der abströmseitigen Trocknung befindet sich der Großteil des Salzes in Filterlage 4. Die Umkehrung des verbleibenden Salzprofils im Filter nach Umkehrung der Strömungsrichtung während der Durchströmungstrocknung wird insbesondere aus Abbildung 6.20 ersichtlich.

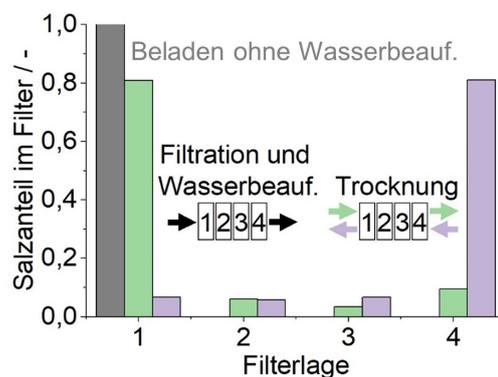


Abbildung 6.20: Vergleich der Salzmasse in zwei Filtern bestehend aus vier Lagen nach gleicher Beladung und Beaufschlagung mit Wassertropfen, aber Durchströmungstrocknung in und gegen Beladungsrichtung betrachtet für jede einzelne Lage aus Trocknungsrichtung.

Abbildung 6.20 zeigt, dass über 80 % des Salzes in der Filterlage verbleibt, die an der Anströmseite während der Durchströmungstrocknung liegt. Unterschiede von unter 5 % sind zwischen den zwei mittleren Lagen zu sehen. Es ist folglich festzuhalten, dass die Strömungsrichtung bei der Durchströmungstrocknung von Oberflächenfiltern einen erheblichen Einfluss auf den abschließenden Salzverbleib im Filter hat und die gesamte Verteilung im Filter dominiert. Die Hypothese, dass die Trocknungsrichtung einen großen Einfluss auf die Position des auskristallisierten Salzes im Filtermedium hat, wurde also bestätigt. Die Beobachtungen von Shokri et al. [85] in Bezug auf die Trocknung von teilgesättigten porösen Strukturen mit Lösung stützen die Aussage, dass die bei der Durchströmungstrocknung in das Filtermedium eindringende Luft das Wasser in den großen Poren verdrängt und damit Kapillarströmungen in kleinen Poren entgegen der Trocknungsrichtung induziert. Dadurch kristallisiert das Salz überwiegend an der Trocknungsfront, der Anströmseite während der Durchströmungstrocknung. Folglich ist anzunehmen, dass Kristallisation von Salz im Inneren des Filters nur dann auftritt, wenn die Kapillaren im Filter nicht vollständig mit Flüssigkeit gefüllt sind, die Trocknung des Filters also, wie beispielsweise bei der mittelfristigen Beaufschlagung, vor der Filmbildung erfolgt.

Da, wie oben beschrieben wurde, die relative Ausrichtung der Trocknungsströmung zum Filter offensichtlich Einfluss auf die zu erwartende Verteilung des Salzes im Filter hat, könnte sich die Gefriertrocknung als alternatives Verfahren zur Durchströmungstrocknung anbieten, um die Salzverteilung im Filtermedium unabhängig von der Trocknung betrachten zu können. Bei der Gefriertrocknung kristallisiert nicht das Salz, sondern das Lösungsmittel, in diesem Fall das Wasser. Bei niedrigem Druck sublimieren die Eiskristalle anschließend direkt in den gasförmigen Zustand [72, 73]. Bei diesem Trocknungsprozess ist durch Vermeidung der flüssigen Phase des Wassers während der Trocknung und Kristallisation des Wassers ohne Strömung im Filtermedium der geringste Einfluss auf den lokalen Verbleib des Salzes zu erwarten. Allerdings ist diese Art der Trocknung, wegen des damit verbundenen apparativen und finanziellen Aufwandes, bzw. der damit erzeugten außergewöhnlichen Betriebsbedingungen, nicht unter realen Betriebsbedingungen in Filtrationsprozessen zu erwarten. Vielmehr ist hier eine Trocknung durch Diffusion bei sinkendem Wassergehalt im Prozessgas oder, weitaus zeitintensiver, bei Abstellen des Prozessgases in trockener Umgebung aufgrund von aufgetretenem Fehlbetrieb realistisch. Daher spiegelt die Durchströmungstrocknung durch Beaufschlagung mit Gasstrom einen realistischen Trocknungsprozess wider, der den Verbleib des Salzes im Filter in einem im Filtrationsbetrieb relevanten Maß beeinflusst. Sollte in zukünftigen Arbeiten der Fokus nicht mehr auf dem verfahrenstechnisch finalen Verbleib des Salzes nach einer Trocknung, sondern der Verteilung des Salzes innerhalb des Filters unmittelbar während der Beaufschlagung mit Wassertropfen unabhängig vom verfahrenstechnischen Prozess liegen, so könnte das Gefriertrocknen für experimentelle Untersuchungen eine relevante Methode werden. Es ist allerdings immer noch zu bedenken, dass die Volumenänderung des Wassers beim Gefrieren die Filter- und Partikelstruktur beeinflussen könnte.

6.4 Zusammenfassung

Ziel der Untersuchungen war es zu prüfen, ob mittels Filtern abgeschiedene lösliche und unlösliche Partikeln durch Beaufschlagung der Filter mit Wassertropfen in das Filtermedium hinein und durch das Filtermedium hindurch penetrieren können. Dazu wurden Versuche mit hydrophilen Oberflächenfiltern durchgeführt, die mit unterschiedlichen Verhältnissen aus Salzpartikeln und Glaskugeln beladen wurden. Die beladenen Filter wurden daraufhin einer Langzeitbeaufschlagung ausgesetzt mit anschließender Durchströmungstrocknung. In diesem Rahmen konnte ein charakteristischer Differenzdruckverlauf für die Penetration von Flüssigkeit durch die gesamte Tiefe hydrophiler Oberflächenfilter identifiziert werden. Der Einfluss der Beaufschlagung mit Wassertropfen auf den Fraktionsabscheidegrad wurde analysiert. Ferner ist die Identifikation einer geeigneten Methode zum Nachweis von Kristallisation im Inneren eines Filters und der Einfluss der Betriebsweise während der Beaufschlagung mit Wassertropfen, kontinuierlich oder diskontinuierlich, auf die Penetration Bestandteil der Untersuchungen gewesen.

Am Beispiel von hydrophilen Oberflächenfiltern wurde erstmals die Penetration von anströmseitig abgeschiedenem löslichem Material durch die gesamte Tiefe von Oberflächenfiltern nachgewiesen. Die Penetration wird durch die Beaufschlagung mit Wassertropfen ausgelöst, wodurch sich das Salz löst. Die Lösung penetriert in das Filtermedium und drainiert auf der Reingasseite des Filters. Die Analyse der Drainage ergab, dass lösliches Material durch das Filtermedium penetriert, während bei den vorliegenden Betriebsparametern unlösliche Partikeln nicht durch das Filtermedium penetrieren.

Der in Kapitel 5 identifizierte charakteristische Differenzdruckverlauf bei Kurzzeitbeaufschlagung mit Wassertropfen wird erweitert. Die Analyse des Differenzdrucks zeigt, dass auf den initialen Differenzdruckabfall, bei andauernder Beaufschlagung mit Wassertropfen, ein flacher Differenzdruckanstieg mit anschließend steilem Anstieg folgt. Der Differenzdruck verläuft nach Einsetzen der Drainage quasi-stationär. Eine Analogie zu Koaleszenzfiltern, beschrieben durch das Kanal-Film-Modell, wurde festgestellt. Die Flüssigkeit penetriert durch das hydrophile Medium und bildet einen Film auf der Abströmseite des Filters. Dies führt zu dem steilen Anstieg des Differenzdrucks.

Ein Vergleich des Differenzdrucks eines unbeladenen, eines salzbeladenen, eines salz- und glasbeladenen und eines glasbeladenen Filters zeigt, dass mit zunehmender Partikelbeladung die Penetration der Flüssigkeit bis zum Austritt auf der Abströmseite verlangsamt wird, während die Filmbildungskinetik unverändert bleibt. Es konnte gezeigt werden, dass die Filterbeladung nicht als starrer Wasserspeicher betrachtet werden kann und die Verzögerung der Penetration von Flüssigkeit auf die Abströmseite daher nicht durch das Kanal-Film-Modell und einem Vergleich zu mehrlagigen Filtern erklärt werden kann.

Nach dem Trocknen zeigt die REM-Analyse, dass das zurückbleibende Salz Krusten um die hydrophilen Faserbündel auf der Reingasseite des Filters und um die auf dem Filter abgeschiedenen Glaskugeln bildet. Weitere REM- und EDX-Analysen zeigen, dass das ursprünglich gleichmäßig

abgetrennte Material auf der Oberfläche des Filters nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen ungleichmäßig verteilt ist.

Die Beaufschlagung eines beladenen Oberflächenfilters mit Wassertropfen führt zu einer Verringerung des Fraktionsabscheidegrads im Vergleich zum beladenen Oberflächenfilter ohne Kontakt zu Wasser. Bei Filtern, die mit einem hohen Salzanteil und wenig Glas beladen sind, ist der Fraktionsabscheidegrad ähnlich zu dem des unbeladenen Filters. Mit zunehmendem Anteil an Glaskugeln, also unlöslichem Material, bewegte sich die MPPS zu einer kleineren Partikelgröße. Eine Analogie zu Untersuchungen von unvollständiger Abreinigung [16] zeigt, dass eine inhomogene Struktur des verbleibenden löslichen oder unlöslichen Materials nach der Durchströmungstrocknung der Filter, die mit REM-Aufnahmen gezeigt wurde, zur Durchströmung insbesondere der unbeladenen Bereiche mit höherer, lokaler Anströmgeschwindigkeit durch Reduktion der bevorzugt durchströmten Fläche führt. Dadurch nimmt die Abscheidung im Diffusionsbereich ab und die Trägheitsabscheidung verbessert sich, woraus die Verschiebung der MPPS zu einer kleineren Partikelgröße resultiert.

REM- und μ -CT-Scans bestätigen, dass nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung das Salz und die Glaskugeln an der Anströmseite des Filters verbleiben, wo sie ursprünglich abgeschieden wurden. Weiterhin ist die Kristallisation im Inneren der Filter mit mehrlagigen Filtern, also Filtern mit mehreren Lagen desselben Filtermediums, die als eins betrachtet werden können, überprüft worden. Es wurde durch einen Vergleich von Differenzdruckverläufen und Drainageanalysen gezeigt, dass an mehrlagigen Filtern gewonnene Ergebnisse auf einlagige Filter übertragbar sind. Zu überwiegender Kristallisation im Inneren des Filters, also in den mittleren Filterlagen eines mehrlagigen Filters, kommt es nur bei mittelfristiger Beaufschlagung, die vor der Filmbildung gestoppt wird. Bei intermittierender Beaufschlagung mit zwei Zyklen, bestehend aus Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung, dem ersten ohne Filmbildung, dem zweiten mit Filmbildung und Drainage, verbleibt trotz Salz im Inneren nach dem ersten Zyklus, nach dem zweiten Zyklus das Salz überwiegend in der anströmseitigen Filterlage, analog zu einer Langzeitbeaufschlagung mit Drainage. Eine Erklärung dafür liefern Untersuchungen zum Einfluss der Durchströmungstrocknung. Die Ergebnisse zeigen, dass die Trocknungsrichtung nach der Drainage darüber entscheidet, wo das Salz im Filter auskristallisiert. Die in der Literatur beschriebene Theorie zur Trocknung von porösen Strukturen geht davon aus, dass die trockene Luft in die großen Poren des Filters dringt, während die Salzlösung die kleinen Kapillaren füllt und das Salz zur Trocknungsfront transportiert. Schlussfolgernd ist anzunehmen, dass eine Kristallisation im Inneren des Filtermediums nur zu erwarten ist, wenn die Kapillaren im Filter nicht durchgehend mit Flüssigkeit gefüllt sind, die Trocknung des Filters also vor der Filmbildung erfolgt.

7 Einfluss der Benetzbarkeit des Filtermediums auf die Penetration

Die Untersuchung des Differenzdrucks beladener hydrophiler Filter während der Beaufschlagung mit Wassertropfen hat Analogien zum Betriebsverhalten oleophiler Ölnebelfilter gezeigt, welche durch das Kanal-Film-Modell beschrieben werden können (siehe Kapitel 6). Da die Benetzbarkeit des Filtermediums bei der Abscheidung von Ölnebel einen großen Einfluss auf das Betriebsverhalten des Filters hat, ist zu erwarten, dass die Benetzbarkeit des Filtermediums auch bei der Abscheidung von Wassertropfen einen großen Einfluss auf das Betriebsverhalten des Filters hat. In diesem Kapitel wird untersucht, ob die Aussagen des Kanal-Film-Modells über oleophobe Medien während der kontinuierlichen Beaufschlagung mit Ölnebel (siehe Kapitel 2.2.1) auch auf hydrophobe Medien während der kontinuierlichen Beaufschlagung mit Wassertropfen übertragbar sind. Dazu wird zunächst der Einfluss der Benetzbarkeit auf die Penetration löslicher Filterkuchenbestandteile analysiert. Zur Illustration dient ein Vergleich der zuvor diskutierten Langzeitbeaufschlagung salzbeladener hydrophiler Filtermedien mit einer Langzeitbeaufschlagung von salzbeladenen hydrophoben Filtermedien. Es folgt eine Untersuchung unbeladener, salz-, glas- und sowohl salz- als auch glasbeladener hydrophober Filtermedien für eine Betrachtung des Einflusses der Beladung auf die Szenarien für hydrophobe Filtermedien.

Wie in Kapitel 2.2 erläutert, hängt die Benetzbarkeit eines Filtermediums nicht nur vom Material der Oberfläche allein, sondern auch von seiner Struktur ab. Für eine eindeutige, von Strukturparametern unabhängige Untersuchung des Einflusses der Benetzbarkeit auf das Betriebsverhalten während der Beaufschlagung mit Wassertropfen und der resultierenden Szenarien (siehe Kapitel 3), ist es nötig, Filtermedien mit gleicher Struktur in hydrophiler und hydrophober Ausführung zu vergleichen. Diese wichtige Voraussetzung konnte in dieser Arbeit umgesetzt werden. Der bereits in Kapitel 6 verwendete hydrophile Oberflächenfilter (Tabelle 4.3 Nr. 2) wurde extern einer Niederdruck-Plasmabehandlung mit einem F-C-Präkursorgas (CF_4 oder C_3F_6) unterzogen, um ihn wasserabweisend auszurüsten. Diese Methode hat beispielsweise gegenüber herkömmlichen Tauchbeschichtungen den Vorteil einer permanenten Hydrophobierung bei Schichtdicken von nur 5-20 nm. Damit ist ein minimaler Einfluss auf relevante Strukturparameter, wie Porengrößenverteilung, Fasergrößenverteilung und Medienhomogenität bezweckt.

Die Benetzbarkeit des hydrophobierten Filtermediums wurde mit einer Kontaktwinkelmessung bei 20 °C überprüft. Ein 0,2 ml Wassertropfen wurde auf das Filtermedium gesetzt, fotografiert und

der Kontaktwinkel anschließend anhand des Fotos bestimmt. Es wurden 10 Wiederholungsmessungen mit einem einzigen Betrachter gemacht, weshalb ähnliche Genauigkeiten wie bei einem herkömmlichen Goniometer (ca. $0,1^\circ$) zu erwarten sind. Die in dieser Arbeit miteinander verglichenen Kontaktwinkel haben eine Differenz von über 15° . Messfehler $\ll 15^\circ$ bei der Bestimmung der Kontaktwinkel beeinflussen die Aussagen dieser Arbeit nicht. Der Tropfen wies einen Kontaktwinkel von 154° auf, was für eine starke Unbenetzbarkeit spricht. Ab einem Kontaktwinkel von 140° beginnt die Klassifizierung als superhydrophob oder als Fläche mit effizienter Selbstreinigung [113]. Als Synonym findet sich in der Literatur häufig ein anderer Begriff, der Lotus-Effekt[®], der allerdings als Marke ausschließlich zur Beschreibung von bionischen Produkten verwendet werden sollte [114]. Eine Strukturänderung des Filtermediums durch die Behandlung kann die Abscheidemechanismen im Filter (siehe Kapitel refsec:Abscheidemechanismen) und damit das Betriebsverhalten des Filters beeinflussen, was wiederum nur eingeschränkte Schlussfolgerungen aus einem direkten Vergleich der Betriebsverhalten eines behandelten und eines unbehandelten Filtermediums zulassen würde. Um zu prüfen, dass die Behandlung tatsächlich keinen wesentlichen Einfluss auf die Struktur des Filters hat, ist nach der Hydrophobierung die Porengrößenverteilung als zentraler Strukturparameter des Filtermediums zu überprüfen. Die Porengrößenverteilung des hydrophilen und des hydrophoben Filtermediums wurde durch Kapillarflussporometrie (siehe Kapitel 4.1.2.2) mit einem Silikonöl (AK5, Wacker, Burghausen, DE) bestimmt. Ein Vergleich der Porengrößenverteilung des hydrophilen und hydrophoben Filtermediums zeigt, dass die Verteilung des hydrophobierten Filtermediums der des hydrophilen Filtermediums entspricht (Abbildung 7.1).

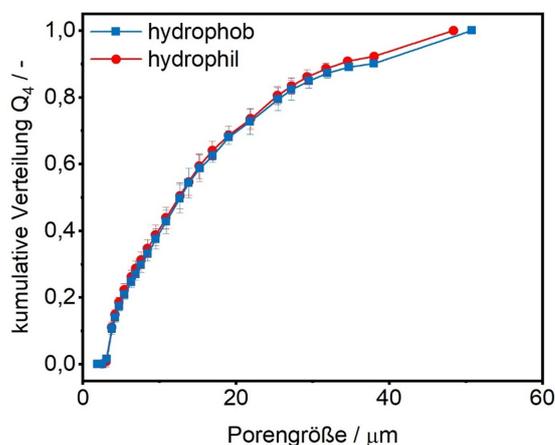


Abbildung 7.1: Mit Silikonöl gemessene Porengrößenverteilung des Oberflächenfilters (Tabelle 4.3 Nr. 2) in seiner hydrophilen und hydrophoben Ausführung.

Dies bestätigt, dass die Hydrophobierung keinen relevanten Einfluss auf die Porengrößenverteilung des Filtermediums hat. Daher sind Unterschiede in den Ergebnissen beim direkten Vergleich des hydrophoben und des hydrophilen (siehe Kapitel 6) Filtermediums auf die Benetzbarkeit zurückzuführen. Aufgrund einer begrenzten Verfügbarkeit des hydrophobierten Filtermediums wurde darauf verzichtet, eine Vorauswahl auf Basis des Δp_0 zu treffen. Auch in diesem Kapitel werden Fotos und

Verläufe einzelner Versuche aus den Versuchsreihen gezeigt, welche die Ergebnisse repräsentativ darstellen.

7.1 Langzeitbeaufschlagung: Vergleich eines hydrophoben mit einem hydrophilen, salzbeladenen Oberflächenfiltermedium

Das Betriebsverhalten des salzbeladenen hydrophoben Filters und resultierende Szenarien (siehe Kapitel 3) werden anhand eines Vergleiches zum salzbeladenen hydrophilen Filter beschrieben und diskutiert. Die Beladung, Beaufschlagung und Durchströmungstrocknung der Filtermedien findet analog zu der Durchführung der Versuche mit hydrophilem Filtermedium in Kapitel 6 statt (siehe Kapitel 4.4 für Details zur Durchführung). Abbildung 7.2 zeigt den Differenzdruckverlauf des hydrophoben Filtermediums während der Beladung mit K_2SO_4 , Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung im Vergleich mit dem zuvor diskutierten Verlauf des hydrophilen Filtermediums (siehe Kapitel 6).

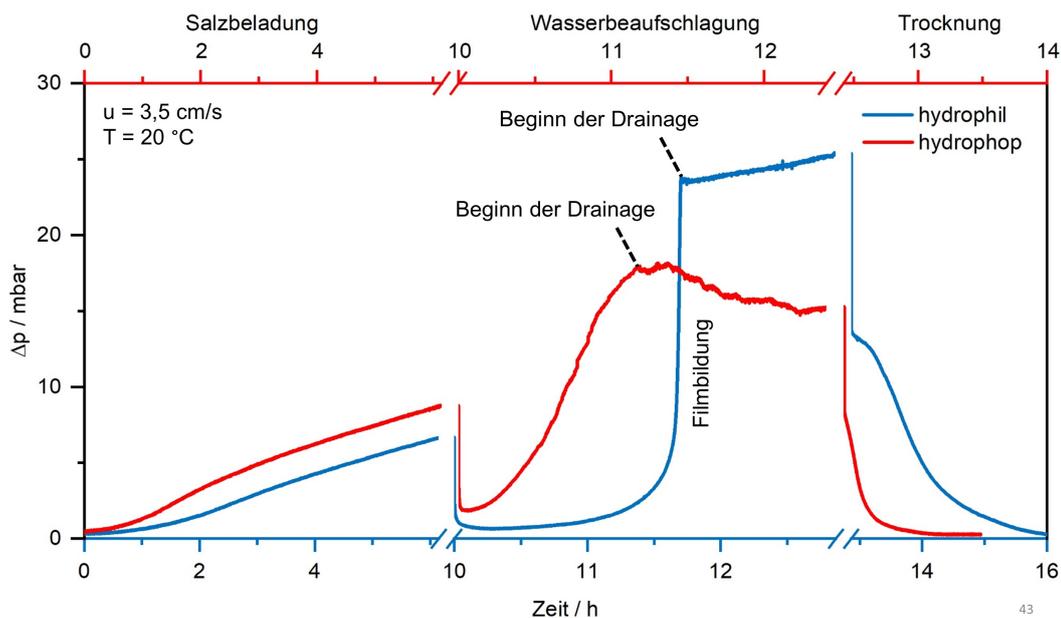


Abbildung 7.2: Differenzdruckverlauf eines hydrophilen und eines hydrophoben Filters während der Beladung, Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung.

Während der Kuchenfiltration ab ca. 2,5 h während der Beladung mit K_2SO_4 -Partikeln verläuft der Differenzdruck des hydrophoben Filtermediums linear, parallel zu dem des hydrophilen Filtermediums, da sich die Abscheidung bei gleichem Partikelmaterial und gleichen Versuchsbedingungen im Filterkuchen nicht unterscheidet. Abweichungen im Differenzdruckverlauf während der Clogging-Phase bis ca. 2,5 h bei der Beladung sind auf Unterschiede zwischen den einzelnen Filterrunden zurückzuführen, die beim hydrophoben Filtermedium größer ausfallen, da keine Vorauswahl von

Filterrunden getroffen werden konnte (siehe Anfang von Kapitel 7). Das führt auch zum Unterschied im maximalen Differenzdruck am Ende der Beladung.

Während der Beaufschlagung mit Wassertropfen unterscheiden sich die Differenzdruckverläufe maßgeblich. Der charakteristische Differenzdruckverlauf des hydrophilen Filters wird in Kapitel 6 ausführlich beschrieben und diskutiert. Der Differenzdruckverlauf des hydrophoben Filters zeigt zu Beginn der Beaufschlagung mit Wassertropfen einen spontanen Abfall. Bei andauernder Beaufschlagung zeigt sich ein Differenzdruckanstieg bis 17 mbar bis zum Start der abströmseitigen Drainage, auf den ein Abfall des Differenzdrucks bis auf 15 mbar folgt. Abschließend sinkt der Differenzdruck während der Durchströmungstrocknung mit trockener Luft mit rel. Luftfeuchtigkeit $< 10\%$. Dabei sinkt er innerhalb einer Trocknungsdauer von 1 h auf einen Wert nahe dem Δp_0 , während das hydrophile Filter nach 2 h Trocknungsdauer noch einen Differenzdruck von über 2 mbar aufweist.

Der initiale Abfall des Differenzdruckverlaufs des hydrophoben Filtermediums bei Start der Beaufschlagung mit Wassertropfen deckt sich mit den Beobachtungen bei der Kurzzeitbeaufschlagung hydrophober Filtermedien und der Langzeitbeaufschlagung hydrophiler Filtermedien und ist auf die Lösung des Salzes und damit des Filterkuchens und dem damit wegfallenden zusätzlichen Differenzdruck durch den Filterkuchen zurückzuführen (siehe Kapitel 5 und Kapitel 6). Das Eintreten einer abströmseitigen Drainage lässt sich sowohl während der Beaufschlagung mit Wassertropfen beim hydrophoben als auch beim hydrophilen Filter beobachten. Aus dem Differenzdruckverlauf des hydrophoben salzbeladenen Filters ist aber, anders als beim hydrophilen Filter, kein steiler Anstieg als Hinweis auf eine Filmbildung und kein quasi-stationärer Zustand abzulesen. Der finale Differenzdruck nahe Δp_0 nach Durchströmungstrocknung beim hydrophoben Filter ist eine Beobachtung, die auch auf das hydrophile Filter zutrifft.

Nach den Ergebnissen der gravimetrischen und optischen Analysen sowie REM-Aufnahmen, erfolgt die Einordnung der Ergebnisse in einen größeren Zusammenhang durch den Vergleich zu bestehenden Modellen.

Ein Vergleich der gravimetrischen Analyseergebnisse (siehe Abbildung 7.3) zeigt, dass das hydrophobe Filtermedium nach der Beaufschlagung nur noch 6 mg K_2SO_4 hält, 90 mg weniger als das hydrophile Filtermedium nach gleicher Drainagedauer.

Bei der Untersuchung des hydrophilen Filters wurde festgestellt, dass das Salz nach der Durchströmungstrocknung überwiegend an der Anströmseite des Filters verbleibt. Abbildung 7.4 zeigt die Anströmseite einlagiger Filter vor der Beaufschlagung mit Wassertropfen und nach Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung.

Abbildung 7.4 a) zeigt, dass der Salzkuchen die Filtermedien vor der Beaufschlagung mit Wassertropfen vollständig bedeckt. Nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und anschließender Durchströmungstrocknung (Abbildung 7.4 b) haben sich Salzkrusten auf einzelnen Faserbündeln

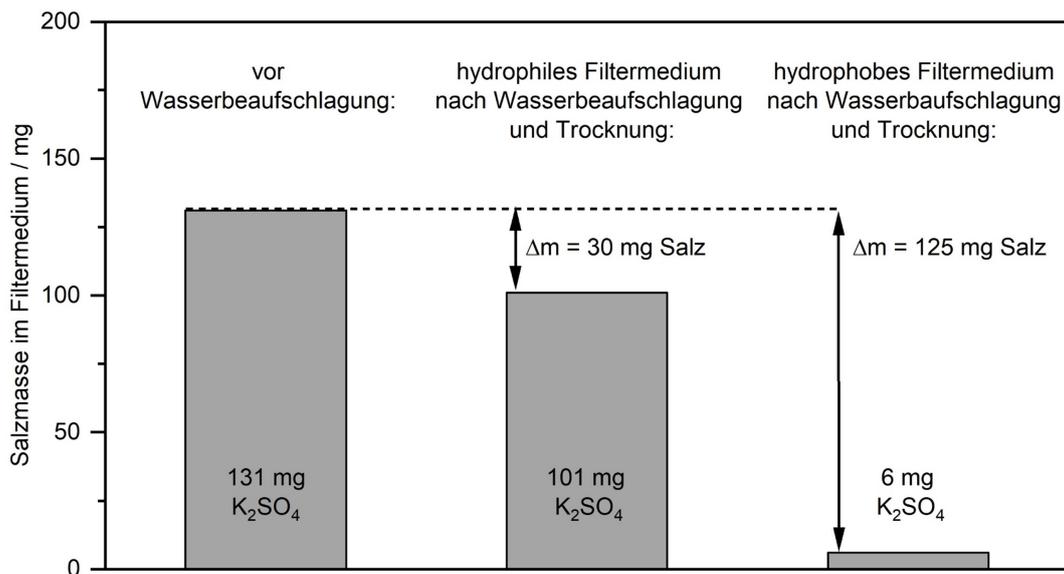


Abbildung 7.3: Ergebnisse der gravimetrischen Analyse eines salzbeladenen hydrophilen und eines salzbeladenen hydrophoben Filtermediums.

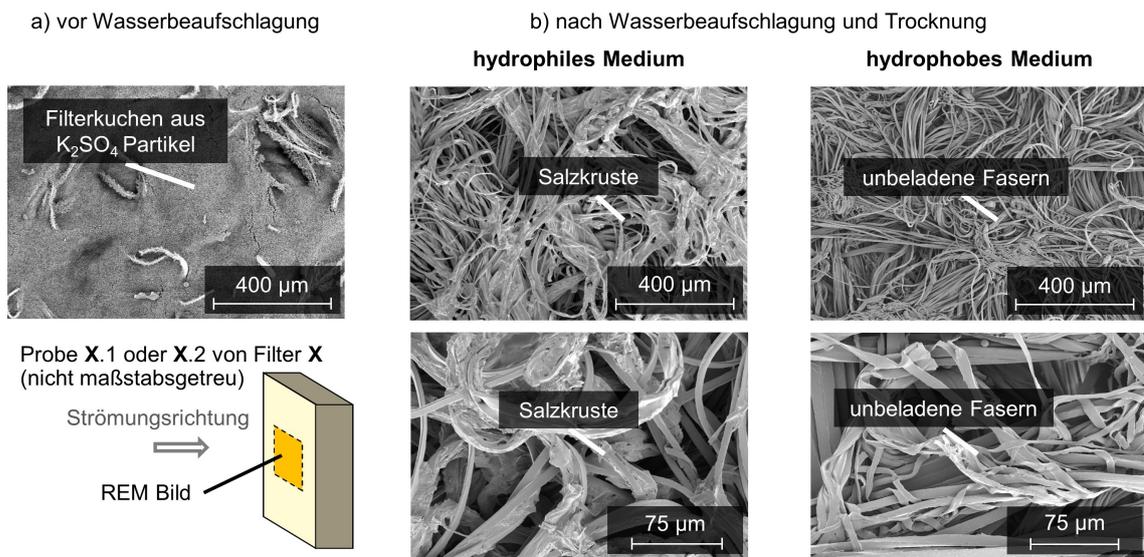


Abbildung 7.4: REM-Aufnahmen der Anströmseite eines salzbeladenen Referenzfilters vor der Wasserbeaufschlagung und eines salzbeladenen hydrophilen und eines salzbeladenen hydrophoben Filters nach anschließender Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung.

des hydrophilen Filtermediums gebildet, während auf der Anströmseite des hydrophoben Filtermediums kein sichtbares Salz zurückbleibt. Zusammen mit den Ergebnissen der gravimetrischen Analyse bestätigt dies, dass der Großteil des löslichen Materials das hydrophobe Filtermedium durch die Beaufschlagung mit Wassertropfen verlassen hat.

Abbildung 7.5 zeigt simultane Endoskopaufnahmen der Anströmseite und Kameraaufnahmen der Abströmseite des salzbeladenen hydrophilen und des salzbeladenen hydrophoben Filters mit dem zugehörigen Differenzdruckverlauf während der Beaufschlagung mit Wassertropfen.

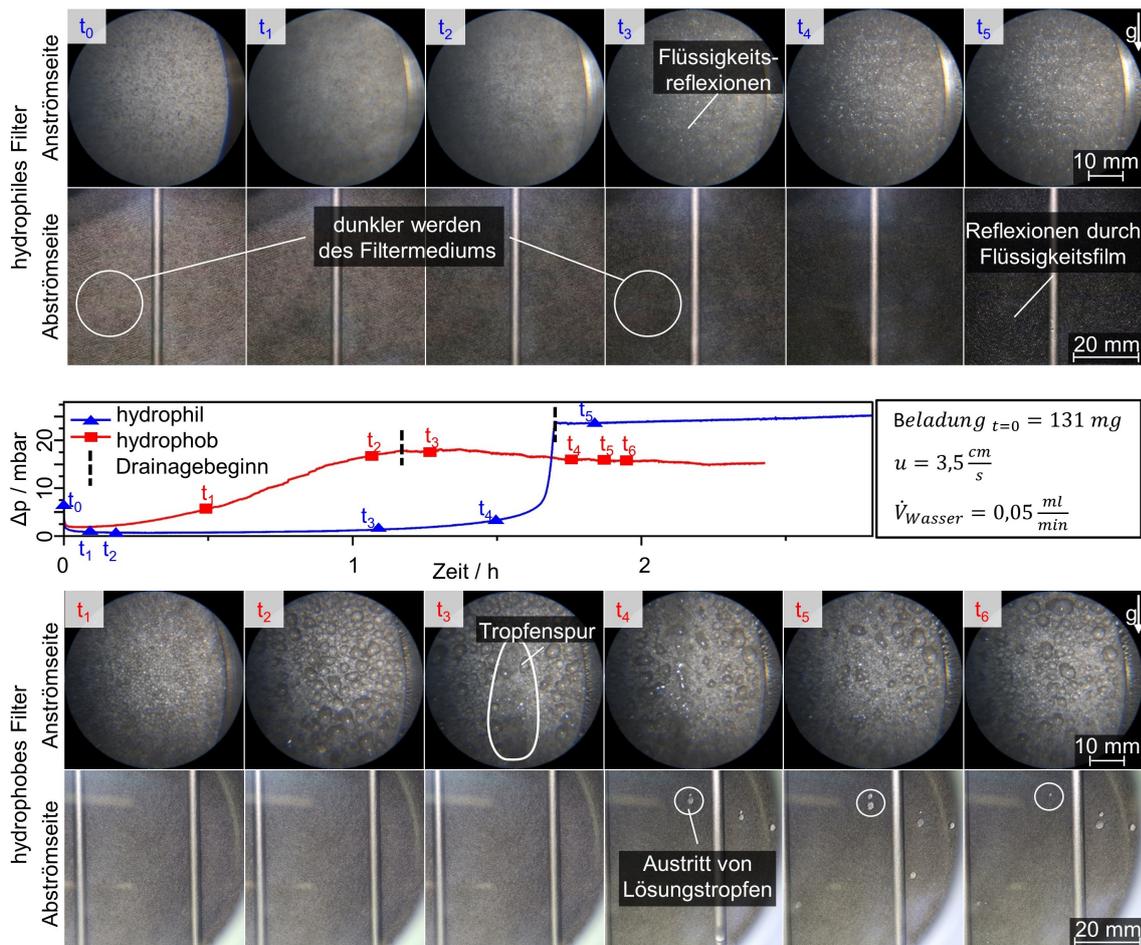


Abbildung 7.5: Differenzdruckverläufe mit simultanen Endoskopaufnahmen der Anströmseite und Kameraaufnahmen der Abströmseite des salzbeladenen hydrophilen (oben) und salzbeladenen hydrophoben (unten) Filters.

Die Anströmseite des hydrophilen Filters wird unmittelbar nach Beaufschlagungsbeginn kaum merklich dunkler. Gleichzeitig löst sich das Salz auf dem Filter (siehe Kapitel 5), sodass eine Lösung entsteht. Der Lösungsprozess ist nicht auf den Endoskopaufnahmen zu sehen. Etwa 1 h nach Beginn der Beaufschlagung sind vermehrt helle Punkte auf der Anströmseite zu sehen, die durch Reflexion an Flüssigkeit entstehen. Während der weiteren Beaufschlagung mit Wassertropfen zeigen die Endoskopaufnahmen keine weiteren Veränderungen der Anströmseite des hydrophilen Filtermediums. Gleichzeitig färbt sich die Abströmseite des hydrophilen Filters dunkel, was für eine Wasseraufnahme und gleichmäßige Durchnässung des Filters spricht. Zum Zeitpunkt des Starts der abströmseitigen Drainage sind punktförmige Lichtreflexionen auf der Abströmseite des hydrophilen Filtermediums zu erkennen, welche die Anwesenheit von ausgetretener Flüssigkeit aus dem Filtermedium bestätigen.

Unmittelbar zu Beginn der Beaufschlagung mit Wassertropfen sind Tropfen auf der Anströmseite des hydrophoben Filtermediums, auf der das Salz zunächst in der vorderen Faserschicht abgeschieden ist, auf den Endoskopaufnahmen sichtbar. Die Tropfen koaleszieren auf dem Filtermedium und fließen schließlich auf der Anströmseite des Filtermediums in die Wandfilmfalle ab. Diese

Flüssigkeit kann also nicht mehr durch das hydrophobe Filtermedium penetrieren und steht nicht für eine Filmbildung am Filtermedium zur Verfügung. Die Abströmseite des hydrophoben Filtermediums bleibt im Gegensatz zum hydrophilen Filtermedium bis zum Start der abströmseitigen Drainage unverändert. Die Aufnahmen zeigen statt einer gleichmäßigen Durchnässung, eine ungleichmäßige Verteilung des Wassers mit Tropfen auf der Anströmseite, während die Abströmseite trocken verbleibt. Bei andauernder Beaufschlagung treten Tropfen aus dem Filter, die abfließen und den Start der abströmseitigen Drainage markieren. Das wiederholte Austreten und Drainieren der Tropfen an derselben Stelle ist aus der Ölnebelfiltration ein bekannter Indikator für ausgebildete Flüssigkeitskanäle im Filtermedium.

An dieser Stelle ist auf den Differenzdruckverlauf während der Durchströmungstrocknung des hydrophilen und hydrophoben Filters zurückzuverweisen (siehe Abbildung 7.12). Er zeigt, dass das hydrophobe Filtermedium nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen schneller seinen Anfangsdifferenzdruck erreicht, also schneller trocknet, als das hydrophile. Die Ursache hierfür liegt in der gleichmäßigen Durchnässung des hydrophilen Filtermediums während der Beaufschlagung mit Wassertropfen einerseits, und des überwiegend trocken verbleibenden hydrophoben Filtermediums andererseits, was durch die Kameraaufnahmen der Filterabströmseiten nachgewiesen werden konnte.

Die Analyse der abströmseitigen Drainage ist in Abbildung 7.6 zusammengefasst.

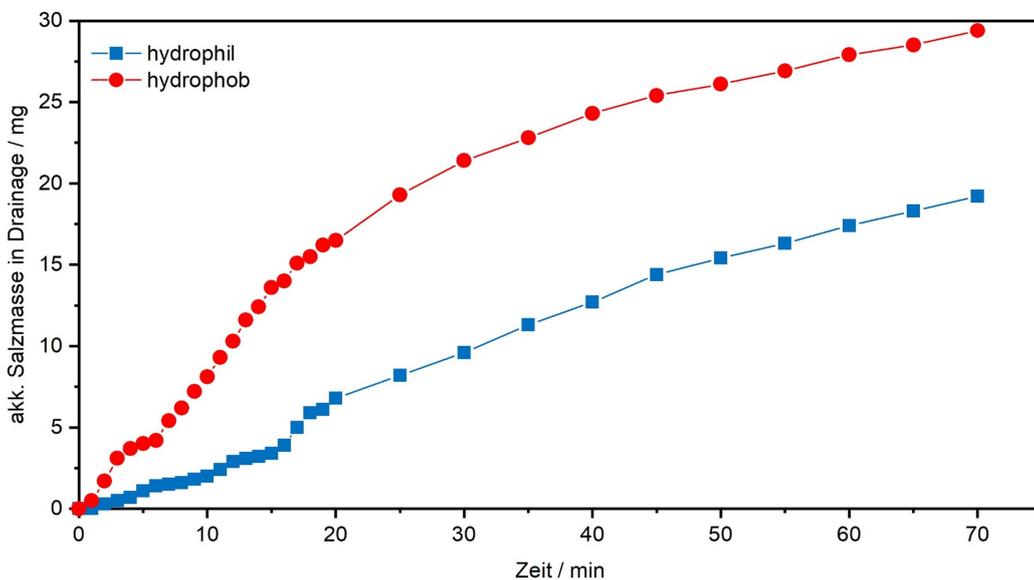


Abbildung 7.6: Ergebnisse der Analyse der abströmseitigen Drainage eines salzbeladenen hydrophilen und eines salzbeladenen hydrophoben Filters ab Einsetzen der Drainage. Die Zeit $t = 0$ markiert den Start der Drainage.

Abbildung 7.6 zeigt die akkumulierte Salzmasse, welche einen hydrophilen und einen hydrophoben Filter in der abströmseitigen Drainage verlässt. Nach den ersten 20 min sind 7 mg Salz in der abströmseitigen Drainage des hydrophilen Filters und 17 mg in der des hydrophoben Filters nachgewiesen worden. Daraufhin verlaufen die Grafen annähernd parallel. Aus dem hydrophoben Filter

treten nach 70 min insgesamt 10 mg mehr Salz mit der abströmseitigen Drainage aus als aus dem hydrophilen Filter. Ablaufende Lösungstropfen auf der Anströmseite des Filtermediums fließen in die Wandfilmfalle. Die Wandfilmfalle ist ein (während des Filterbetriebs geschlossener) Abfluss, der mittig unterhalb und in geringem Abstand zur Rohgasseite des Filters angeordnet ist (siehe Kapitel 4.3). Während des Filterbetriebs fließt das Wasser aus dem Wandfilm in der Filterkammer ohne Kontakt zum Filtermedium ab und mischt sich dort mit der anströmseitigen Drainage. Daher wurde die Flüssigkeit in der Wandfilmfalle auf Salzzrückstände analog der Drainageanalyse (siehe Kapitel 4.4) gravimetrisch analysiert. Sie enthielt nach den Versuchen mit dem hydrophilen Filtermedium kein Salz. Eine Analyse der Flüssigkeit, die auf der Anströmseite des hydrophoben Filters abfloss, im Anschluss an die Versuche ermittelte 95 mg Salz in der anströmseitigen Drainage. Damit ergibt sich eine Massenbilanz für das hydrophobe Filtermedium wie folgt:

$$m_{\text{Filter},1} + m_{\text{Drainage,abströmseitig}} + m_{\text{Drainage,anströmseitig}} = m_{\text{Filter},0} \quad (7.1)$$

$$6 \text{ mg} + 29 \text{ mg} + 95 \text{ mg} = 130 \text{ mg} \quad (7.2)$$

Eine Beladung von 130 mg liegt im Bereich der Ausgangsmasse von K_2SO_4 von $131 \text{ mg} \pm 2 \text{ mg}$ auf den Filtermedien. Die beobachteten Szenarien für salzbeladene hydrophile und hydrophobe Filtermedien sind in Abbildung 7.7 zusammengefasst.

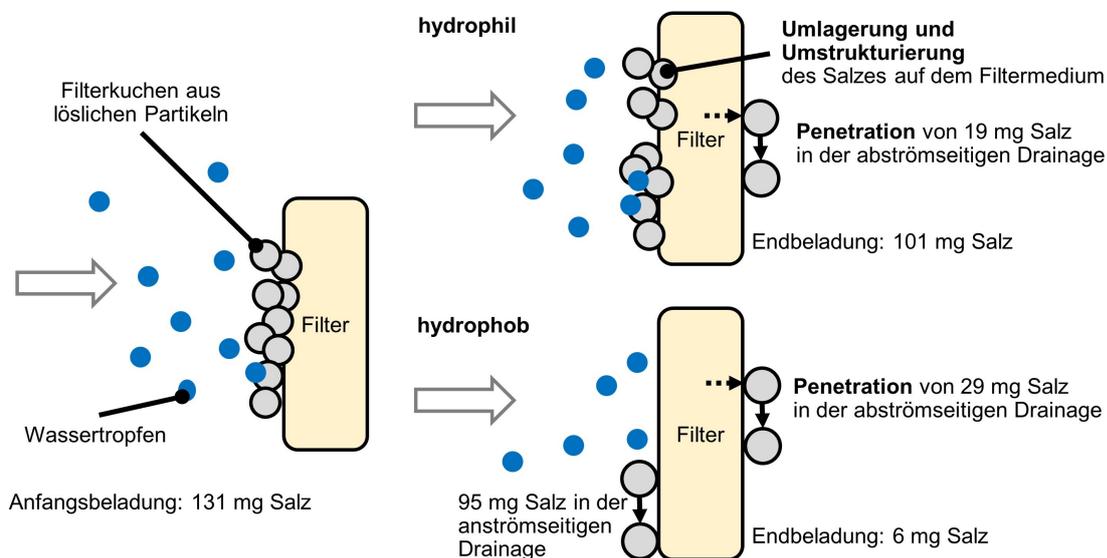


Abbildung 7.7: Schematische Zeichnung der auftretenden Szenarien während der Beaufschlagung mit Wassertropfen salzbeladener Filter in Abhängigkeit ihrer Benetzbarkeit.

Während bei dem hydrophilen Filter durch REM-Bilder eine Umlagerung auf der Anströmseite bestätigt wurde, wurde beim hydrophoben Filter kein Salz auf der Anströmseite nach Versuchsende nachgewiesen. Dieses Ergebnis und der instantane Abfall des Differenzdrucks bei Beginn der Beaufschlagung bestätigen eine Umstrukturierung des Filterkuchens in Form einer vollständigen

Lösung des Salzes und dem Transport der Salzlösung in das Filtermedium hinein oder in die Wandfilmfalle auch beim hydrophoben Filter. Ein großer Unterschied liegt im Verbleib des überwiegenden Anteils an Salz. Beim hydrophilen Filtermedium verbleiben 77 % des abgeschiedenen Salzes auf dem Filter, während eine vergleichbare Masse (73 %) beim hydrophoben Filter in der anströmseitigen Drainage nachgewiesen wurde. Auch im Differenzdruckverlauf zeigen sich im weiteren Verlauf große Unterschiede, die auch auf Basis des Kanal-Film-Modells nicht zu beschreiben bzw. zu deuten sind.

Für eine Gegenüberstellung mit dem Kanal-Film-Modell und eine Prüfung auf eine mögliche Übertragbarkeit zeigt Abbildung 7.8 die Differenzdruckverläufe für oleophile und oleophobe Filter schematisch nach dem Kanal-Film-Modell gegenüber dem salzbeladenen hydrophilen und hydrophoben Filter während der Tropfenbeaufschlagung.

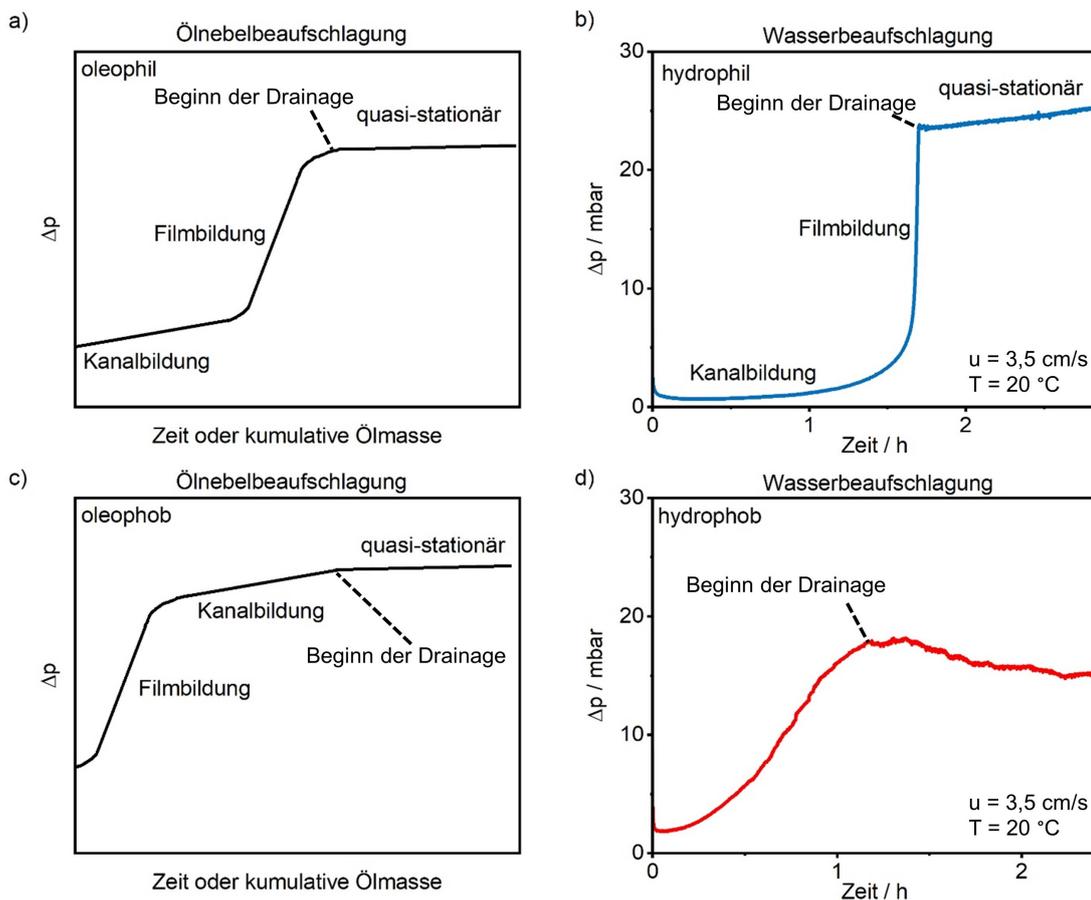


Abbildung 7.8: Vergleich der Differenzdruckverläufe mit eingezeichnetem Einsatz der abströmseitigen Drainage eines a) oleophilen Filters (schematisch nach dem Kanal-Film-Modell) mit einem b) salzbeladenen hydrophilen Filter und eines c) oleophoben Filters (schematisch nach dem Kanal-Film-Modell) mit einem d) salzbeladenen hydrophoben Filter während der Beaufschlagung mit Öl- bzw. Wassertropfen.

Die Ergebnisse mit dem zuvor diskutierten hydrophilen Filtermedium sind hier ebenfalls dargestellt. Wie in Kapitel 6 grundsätzlich herausgearbeitet, ist das Kanal-Film-Modell, mit den Ausnahmen aus Kapitel 6.2.2, auf hydrophile Filter während der Beaufschlagung mit Wassertropfen übertragbar.

Der steile Anstieg im Differenzdruckverlauf tritt bei abströmseitiger Filmbildung auf, woraufhin eine abströmseitige Drainage eintritt und der Differenzdruck einen quasi-stationären Zustand erreicht. Ein ausgeprägter „Kanalbereich“ mit annähernd linearem Anstieg wurde beim hydrophilen Filtermedium nicht beobachtet. Der Differenzdruckverlauf des salzbeladenen hydrophoben Filters während der Tropfenbeaufschlagung zeigt nicht den erwarteten ausgeprägten Filmbildungsverlauf und auch keine erkennbare Kanalphase. Die Steigung des Differenzdruckanstiegs ist weder klein genug für den „Kanalbereich“ noch groß genug für den erwarteten „Filmbereich“. An dieser Stelle ist folglich festzuhalten, dass der Differenzdruckverlauf des salzbeladenen hydrophoben Filters während der Beaufschlagung mit Wassertropfen nicht mit dem Kanal-Film-Modell zu beschreiben oder zu erklären ist. Da eine abströmseitige Drainage auftritt, ist zu erwarten, dass der kapillare Eintrittsdruck des Filtermediums überwunden wird. Allerdings bleibt hier der maximale Differenzdruck von 19 mbar unter dem mit Wasser im Porometer gemessenen Eintrittsdruck von 30 mbar des unbeladenen hydrophoben Filtermediums.

Die anströmseitige Drainage ist ein weiterer Prozess, der durch das Kanal-Film-Modell nicht erfasst wird. Der Vergleich der Differenzdruckverläufe unbenetzbarer Medien zeigt einmal mehr, wie abhängig die Modellbildung von den jeweiligen Stoffparametern ist. Das Kanal-Film-Modell wurde für ein Stoffsystem entwickelt, das sich in wesentlichen Parametern von dem hier vorliegenden unterscheidet. Es wurde für Öle in Ölnebelfiltrationsprozessen entwickelt. Bei 20 °C haben Öle typische Viskositäten zwischen 20-195 mPa s und Oberflächenspannungen von 28 mN/m [59], während Wasser eine Viskosität von 1 mPa s (siehe Tabelle 4.2) und eine Oberflächenspannung von 73 mN/m (oder mehr, wenn es K₂SO₄ enthält) hat. Außerdem weisen Glasfasermidien in der Regel eine feinere Porengrößenverteilung mit maximalen Porengrößen zwischen 25 und 40 µm auf [115]. Dies kann alles dazu beitragen, dass das Kanal-Film-Modell nur teilweise übertragbar ist.

Eine wissenschaftlich begründete Annahme, die qualitative Erklärungen für die vorgestellten Beobachtungen liefert, ist, dass sich - im Gegensatz zum Kanal-Film-Modell - kein vollständiger Flüssigkeitsfilm auf der Rohgasseite des hydrophoben Filtermediums bildet. Ein möglicher Grund hierfür ist die höhere Oberflächenspannung von Wasser, die mit der größeren Tendenz Tropfen zu bilden einhergeht, um die Oberfläche zu reduzieren. Es ist zu vermuten, dass sich auf der Anströmseite des hydrophoben Filtermediums Flüssigkeit ansammelt und teilweise schon bei geringen Differenzdrücken in größere Poren und somit in das Filtermedium eindringt, während sich die restliche Flüssigkeit vor kleineren Poren sammelt und an der Anströmseite des Filtermediums drainiert. Ob und in welcher Weise das Salz den Differenzdruckverlauf während des Experiments beeinflusst, lässt sich aus diesen Daten, auch den Videoaufnahmen der Anströmseite, noch nicht ableiten. Daher wird im Folgenden das hydrophobe Filtermedium genauer untersucht.

7.2 Einfluss der Löslichkeit der Filterkuchenbestandteile auf die Benetzbarkeit eines hydrophoben Oberflächenfiltermediums

Um eine Erklärung für die Unterschiede im Differenzdruckverlauf des salzbeladenen hydrophoben Filters und des Kanal-Film-Modells zu finden und die Hypothese zu prüfen, dass die Salzbeladung einen entscheidenden Einfluss auf den Differenzdruck bzw. auf die Benetzbarkeit des Filtermediums hat, wird das hydrophobe Filtermedium salzbeladen und unbeladen untersucht. Abbildung 7.9 zeigt den Differenzdruckverlauf eines salzbeladenen und eines unbeladenen hydrophoben Filters während der Beaufschlagung mit Wassertropfen.

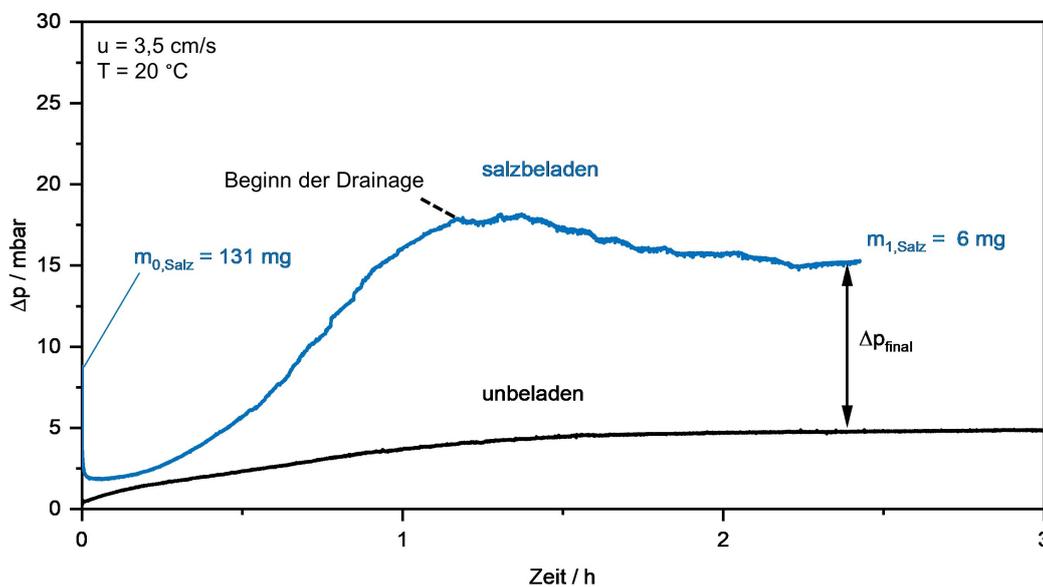


Abbildung 7.9: Differenzdruckverlauf eines salzbeladenen und eines unbeladenen hydrophoben Filters während der Wasserbeaufschlagung mit eingezeichnetem Beginn der abströmseitigen Drainage. Die Zeit $t = 0$ markiert den Start der Wasserbeaufschlagung.

Der unbeladene Filter entwickelt mit einem Differenzdruck < 5 mbar während der Beaufschlagung mit Wassertropfen einen viel niedrigeren maximalen Differenzdruck als der salzbeladene Filter mit 17 mbar. Selbst nach über zwei Stunden Beaufschlagung mit Wassertropfen, nach denen fast kein Salz mehr im ursprünglich beladenen Filter vorhanden ist (siehe Abbildung 7.3), bleibt der Unterschied des Differenzdrucks zwischen dem beladenen und dem unbeladenen Filter bestehen.

Abbildung 7.10 zeigt repräsentative Endoskop- und Kameraaufnahmen vom unbeladenen und salzbeladenen hydrophoben Filtermedium vom Beginn der Beaufschlagung bis zum Beginn der Drainage des salzbeladenen Filters bei $t = 1$ h 16 min. Vom Beginn der Beaufschlagung bis zum Beginn der Drainage des salzbeladenen Filters lassen sich die Endoskop- und Kameraaufnahmen vom unbeladenen und salzbeladenen hydrophoben Filtermedium nicht unterscheiden.

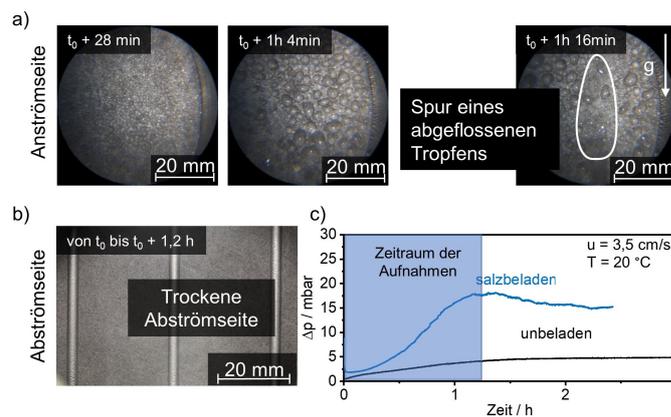


Abbildung 7.10: Ergebnisse der visuellen Beobachtung eines Ausschnittes des Filtermediums während des Betriebs, repräsentativ für hydrophobe beladene und unbeladene Filter: a) Endoskopaufnahmen der Anströmseite und b) Kameraaufnahmen der Abströmseite mit c) Differenzdruckverlauf.

Die Endoskopaufnahmen der Anströmseite des hydrophoben Filters zeigen, dass sich kleine Tropfen bilden, die koaleszieren und schließlich ablaufen, während die Kameraaufnahmen der Abströmseite bis zu 1 h und 16 min nach Beaufschlagungsbeginn ein unverändertes (und daher trockenes Filtermedium) zeigen (siehe Abbildung 7.10).

Abbildung 7.11 zeigt beispielhaft Fotos der Abströmseiten des unbeladenen Filtermediums (Abbildung 7.11 a) und des beladenen hydrophoben Filtermediums ab Start der abströmseitigen Drainage (Abbildung 7.11 b).

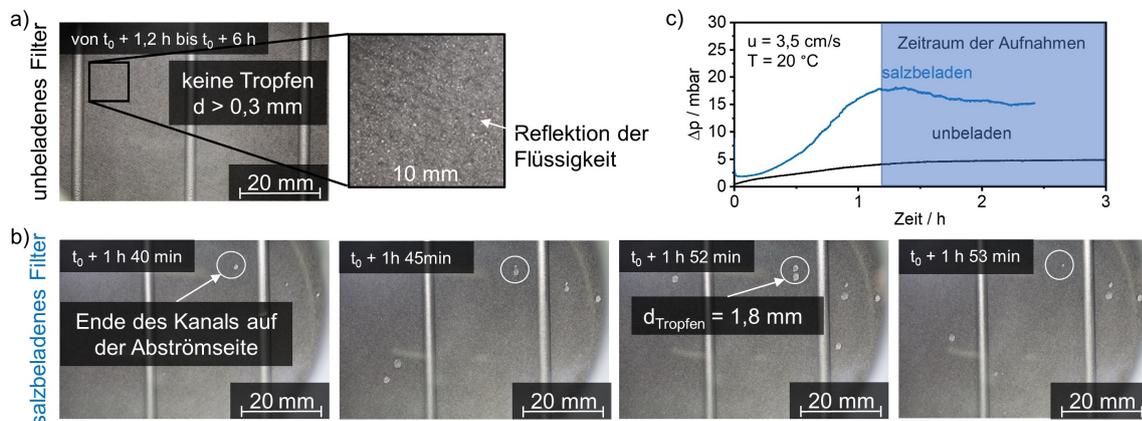


Abbildung 7.11: a) Foto der Abströmseite eines unbeladenen hydrophoben Filters, repräsentativ für eine unveränderte Wasserbeaufschlagung über 6 h und b) Kameraaufnahmen der Abströmseite eines salzbeladenen hydrophoben Filters nach Beginn einer abströmseitigen Drainage mit c) Differenzdruckkurven.

Auf der Abströmseite des unbeladenen Filters sind auch nach Drainagebeginn keine Tropfen sichtbar. Die Lichtreflexionen, die durch Wasser auf dem Filter sowie auf der Stützstruktur sichtbar sind, könnten auf leichte Kondensation im System zurückzuführen sein, die durch geringe Temperaturunterschiede zwischen Luftstromtemperatur und Raumtemperatur unterhalb der Sensibilität der Sensoren aufgetreten sein könnte. Auf dem beladenen Filtermedium bilden sich nach dem Anstieg des Differenzdrucks Tropfen auf der Abströmseite des Filters. Sie wachsen an und laufen ab, bevor

ein weiterer Tropfen an der gleichen Stelle folgt. Dies ist aus der Ölnebelfiltration ein bekanntes Indiz für auf der Abströmseite endende Kanäle in denen Flüssigkeit durch das Filtermedium transportiert wird (siehe Kapitel 2) und wurde bereits in Kapitel 7.1 diskutiert.

Der Differenzdruckverlauf des beladenen und unbeladenen hydrophoben Filters zeigt, dass durch die Beladung grundlegend und anhaltend das Verhalten des Filters beeinflusst wird, die Änderung also durch die Salzbeladung initiiert wird und anhält, auch wenn kein Salz mehr im System ist. Die Salzbeladung führt dazu, dass Wasser durch das Filtermedium penetrieren kann (siehe Abbildung 7.11). Der Nachweis, dass die Lösung nur bei vorhandener Salzbeladung in das Filtermedium eindringt und daraus ein anhaltend erhöhter Differenzdruck entsteht, spricht für einen großen initialen Effekt des Salzes. Ein Test mit einem einzelnen, vergleichsweise großen Wassertropfen von 0,2 ml prüft diese Vermutung.

Zunächst ruht ein einzelner Wassertropfen auf einer Filterrunde vor einer Kamera (iPhone XS, Apple, Cupertino, USA). Das Filtermedium und die Kamera sind auf einem mobilen, sich neigenden Tisch befestigt. Bei ansteigender Neigung geben die Videoaufnahmen Aufschluss darüber, wie sich der Tropfen verformt und auf die sich ändernde Hangabtriebskraft reagiert. Es ist zu erwarten, dass das Salz auf dem hydrophoben Filtermedium schon dabei die Bewegung des Tropfens beeinflusst und die Beobachtungen Rückschlüsse auf das Betriebsverhalten während der Filtrationsversuche zulassen. Abbildung 7.12 zeigt einen Wassertropfen von 0,2 ml auf einem a) unbeladenen und b) mit 131 mg K_2SO_4 beladenen Filtermedium bei steigender Neigung des Filtermediums.

a) unbeladenes Filtermedium



b) beladenes Filtermedium

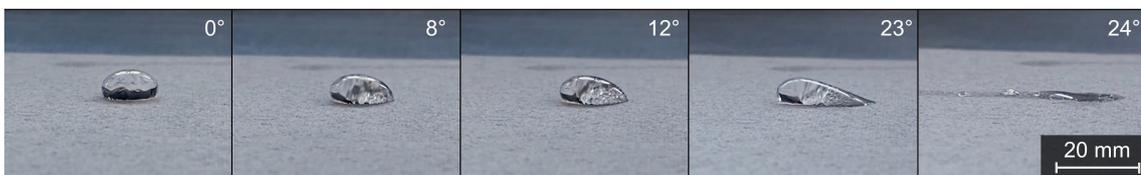


Abbildung 7.12: Fotoreihe von einem Tropfen auf a) einem unbeladenen hydrophoben Filtermedium und b) einem salzbeladenen hydrophoben Filtermedium bei sich ändernder Neigung des Filtermediums.

Auf dem unbeladenen superhydrophoben Filtermedium ändert der Tropfen seine Form bis zum Abgleiten nicht (siehe Abbildung 7.13 a). Beim Abgleiten bei 8° hinterlässt er keine Wasserspur. Bereits bei 0° Neigungswinkel zeigt sich ein Unterschied zwischen den Tropfen auf dem unbeladenen und dem beladenen Filtermedium. Trotz des gleichen Volumens beträgt der Kontaktwinkel des Tropfens auf dem salzbeladenen Filtermedium nur etwa 127°, auf dem unbeladenen Filtermedium

hingegen 154° . Nach Deformierung folgt bei einer Neigung von 24° das Abfließen des Tropfens, das eine Wasserspur hinterlässt.

Einen Erklärungsansatz für dieses unterschiedliche Verhalten illustriert die schematische Skizze in Abbildung 7.13 a) und Abbildung 7.13 b).

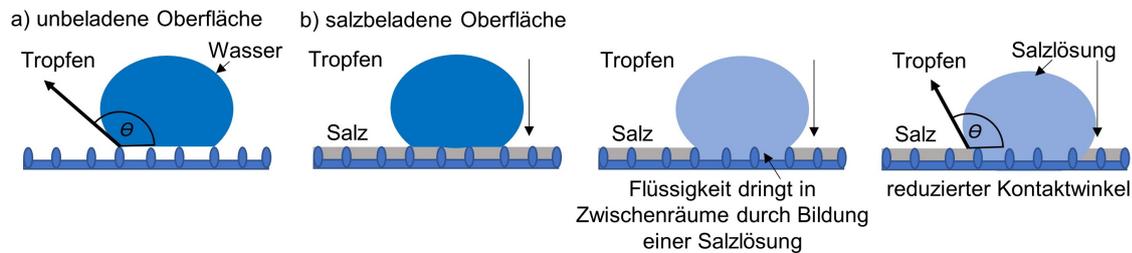


Abbildung 7.13: Schematische Skizze der Beeinflussung der Salzbeladung auf die Benetzbarkeit einer strukturierten Oberfläche durch einen Vergleich eines Tropfen auf einer a) unbeladenen zu b) salzbeladenen strukturierten Oberflächen.

Der große Kontaktwinkel des Tropfens auf dem unbeladenen strukturierten Filtermedium und das spurlose Abgleiten des Tropfens bei niedrigem Neigungswinkel lassen vermuten, dass der Tropfen auf dem unbeladenen Filtermedium den Cassie-Zustand [42, 116, 117], einen thermodynamisch stabilen Zustand eines Tropfens auf strukturierter Oberfläche ohne Kontakt mit den Zwischenräumen (siehe Abbildung 7.13 a) einnimmt. Abbildung 7.13 b) zeigt schematisch, wie sich das Salz bei Kontakt mit dem Wassertropfen löst, was zu Flüssigkeit in den Zwischenräumen der strukturierten Oberfläche führt. Dies würde die Beobachtung aus Abbildung 7.12 erklären und beschreibt zugleich den Übergang vom Cassie- zum Wenzel-Zustand [41, 116, 117]. Der Wenzel-Zustand beschreibt einen Tropfen auf strukturierter Oberfläche, der die Zwischenräume ausfüllt. Dabei ist der Kontaktwinkel des Wenzel-Zustands nur geringfügig kleiner als beim Cassie-Zustand, wie auch für das hier vorliegende Stoffsystem beobachtet wurde. Die Oberfläche verliert aber ihre antiadhäsiven Eigenschaften. Die Vermutung, dass der Tropfen durch die Salzbeladung des Filtermediums den Wenzel-Zustand einnimmt und dadurch irreversibel die Benetzbarkeit der Oberfläche ändert, würde auch erklären, wieso der Tropfen bei steigendem Neigungswinkel seine Form verändert und länger am Filtermedium haftet. Diese Tropfenzustände werden insbesondere in der Forschung zu Pflanzeigenschaften und Herstellung superhydrophober Oberflächen untersucht. In diesem Zusammenhang wurde der Übergang vom Cassie- zum Wenzel-Zustand beispielsweise mit Druck oder durch Kondensation herbeigeführt [113, 118]. Es sind allerdings keine Untersuchungen bekannt, in denen ein Zusammenhang mit löslichen Materialien hergestellt wurde. Dennoch ist der Vorgang vergleichbar, denn das Salz in den Poren des Filtermediums kann durch Wasseraufnahme zur flächendeckenden Benetzung führen, vergleichbar mit Kondensation auf strukturierten Oberflächen. Zusammenfassend zeigt dieses Experiment mit einzelnen Tropfen, dass das Salz das Benetzungsverhalten des Filtermediums verändert, und liefert Erklärungsansätze, warum es bei einem salzbeladenem, hydrophobem Filtermedium zur Penetration von Flüssigkeit durch das Filtermedium kommt und bei einem unbeladenem, hydrophobem Filtermedium nicht.

Mit diesem Erklärungsansatz lässt sich die Hypothese formulieren, dass es zur Penetration kommt, wenn das Filtermedium vor der Beaufschlagung mit Wassertropfen mit löslichem Partikelmaterial beladen ist, also auch bei Beladungen mit Mischungen aus löslichen und unlöslichen Partikeln, und dass es bei Filtern ohne Beladung mit löslichen Partikeln und daher auch unbeladenen oder glasbeladenen Filtern nicht zur Penetration kommt.

Abbildung 7.14 zeigt den Differenzdruckverlauf eines glasbeladenen, eines salz- und glasbeladenen, eines salzbeladenen und eines unbeladenen hydrophoben Filters während der Beaufschlagung mit Wassertropfen.

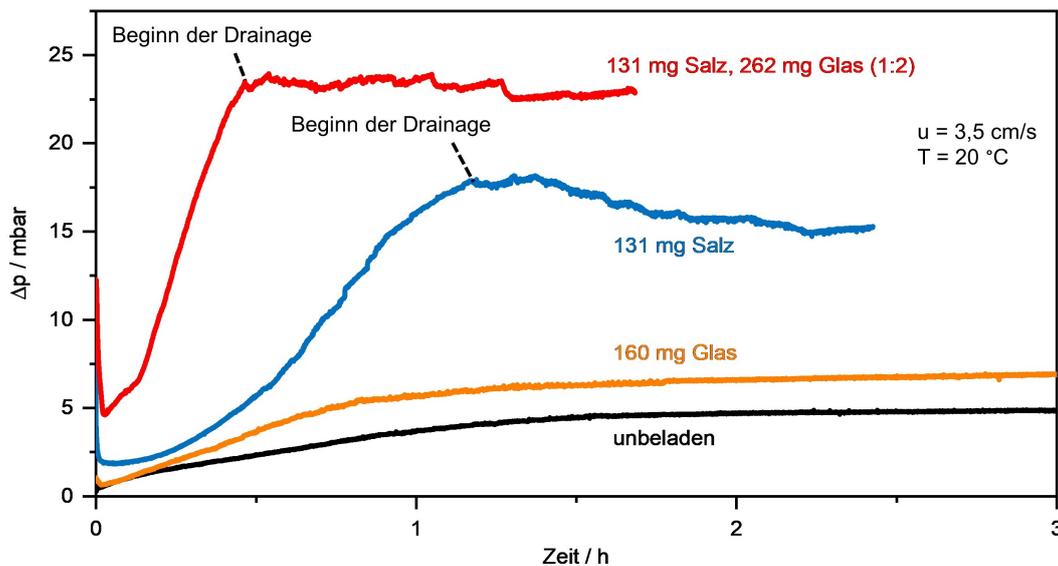


Abbildung 7.14: Differenzdruckverlauf eines salz- und glasbeladenen und eines salzbeladenen Filters mit eingezeichnetem Beginn einer abströmseitigen Drainage während der Beaufschlagung mit Wassertropfen und eines glasbeladenen und eines unbeladenen hydrophoben Filters ohne abströmseitige Drainage während der Beaufschlagung mit Wassertropfen.

Die Differenzdruckverläufe der Filter, deren Filterkuchen Salz enthalten, steigen während der Beaufschlagung mit Wassertropfen bis über 15 mbar an und flachen nach Einsetzen einer Drainage ab, bzw. sinken leicht ab. Die Differenzdruckverläufe des unbeladenen und des glasbeladenen Filters, also ohne Salzbeladung, steigen langsam und erreichen während der gesamten Beaufschlagungsdauer keine Werte über 7 mbar. Erwartungsgemäß kommt es bei dem glasbeladenen und unbeladenen Filtermedium nicht zur Drainage. Bei den Filtern, deren Filterkuchen lösliches Partikelmaterial enthalten, kommt es auf Grund der zuvor erläuterten Beeinflussung der Benetzbarkeit des Filtermediums zur Drainage. Das Filtermedium mit reiner Glasbeladung hat erwartungsgemäß einen höheren Differenzdruck als das unbeladene Filtermedium sowie das Filtermedium mit salz- und glasbeladung einen höheren Differenzdruckanstieg als das Filtermedium mit reiner salzbeladung aufweist. Dies ist auf den hinzukommenden Widerstand durch das zusätzliche Material auf der Anströmseite der Filtermedien zurückzuführen. Glas ist jeweils nur in der Frontdrainage nachweisbar. Von 160 mg Glas wurden 8 mg des rein glasbeladenen Filters in der Frontdrainage nachgewiesen. Die übrigen 152 mg wurden in der gravimetrischen Analyse des Filters nachgewiesen.

7.3 Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen hatten die Prüfung des Einflusses der Benetzbarkeit des Filtermediums auf die Penetration von löslichem und unlöslichem Partikelmaterial durch Filter zum Ziel. Durch hydrophobieren des zuvor untersuchten, benetzbaren Oberflächenfilters wurde zunächst ein direkten Vergleich eines salzbeladenen hydrophilen und salzbeladenen hydrophoben Filters ermöglicht. Dabei wurde eine Niederdruck-Plasmabehandlung mit minimalem Einfluss auf die Porengrößenverteilung zur Hydrophobierung verwendet.

Die Benetzbarkeit des Filtermediums beeinflusst das Betriebsverhalten bei Beaufschlagung mit Wassertropfen maßgeblich. Der Differenzdruckverlauf von hydrophoben salzbeladenen Filtermedien entspricht nicht dem hydrophiler salzbeladener Filtermedien. Stattdessen zeigt er, nach initialem Differenzdruckabfall, der dem charakteristischen Differenzdruckverlauf bei Kurzzeitbeaufschlagung durch Lösung des Salzes bzw. des Filterkuchens entspricht, einen Anstieg des Differenzdrucks bis zum Eintritt einer Drainage, ab dem er sinkt und einen Wert weit über Δp_0 einnimmt. Entgegen den Erwartungen, aufgrund der festgestellten Analogie zu benetzbaren Filtern, ist das Kanal-Film-Modell nicht auf hydrophobe Filtermedien übertragbar. Es gibt bei salzbeladenen hydrophilen Oberflächenfiltern im Differenzdruckverlauf, während der Beaufschlagung mit Wassertropfen, trotz eintretender Drainage keinen Kanalbereich und keinen expliziten Filmbereich. Zusätzlich zur abströmseitigen Drainage, mit der ähnlich viel Salz durch das Filtermedium penetriert wie durch hydrophile Medien, ist beim hydrophoben Filter eine anströmseitige Drainage zu beobachten, in welcher der Großteil des Salzes aus dem Filterkuchen nachgewiesen wurde. Im hydrophoben Filtermedium verbleiben weniger als 5 % des Filterkuchenmaterials nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen. Trotzdem zeigen vergleichende Ergebnisse zwischen Differenzdruckverläufen von salzbeladenen und unbeladenen hydrophoben Filtermedien, dass der Differenzdruck des salzbeladenen Filtermediums abschließend vor Filtertrocknung ca. 10 mbar über dem des unbeladenen Filtermediums verbleibt. Beim unbeladenen Filtermedium kommt es während der Beaufschlagung mit Wassertropfen zudem nicht zur abströmseitigen Drainage, das Wasser fließt vollständig auf der Anströmseite ab.

Durch Experimente mit einzelnen Tropfen auf salzbeladenem und unbeladenem Filtermedium wurde festgestellt, dass das Salz zu einer Reduzierung des Kontaktwinkels, und bei Neigung des Filters zu Verformung und späterem, bzw. langsamerem Abgleiten des Tropfens führt. Im Gegensatz zum Tropfen auf unbeladenem Filtermedium ist beim salzbeladenen Filtermedium ein Flüssigkeitsrückstand auf dem Filtermedium nach Abgleiten des Tropfens zu beobachten. Es ist zu vermuten, dass der Tropfen auf dem unbeladenen hydrophoben Filtermedium nicht in die oberste Faserschicht des Filters eindringen kann und den Cassie-Zustand einnimmt. Salz in der anströmseitigen Faserschicht löst sich hingegen und führt, ähnlich wie Kondensation auf strukturierten Oberflächen, zur Änderung des Tropfens vom Cassie- in den Wenzel-Zustand, bei dem der Tropfen in die Strukturen der Oberfläche eindringt. Dies wiederum würde den kapillaren Eintrittsdruck in das Filtermedium verringern und so die Penetration der Lösung ermöglichen.

Abgeschiedenes lösliches Partikelmaterial auf dem Filtermedium führt zu einer Reduzierung der wasserabweisenden Eigenschaft des Filters. Eine Penetration von Flüssigkeit durch das hydrophobe Filtermedium ist nur möglich, wenn der Filterkuchen lösliche Bestandteile enthält. Das wird durch Experimente mit unlöslichem Partikelmaterial bestätigt. Bei Filterkuchen mit Salz- und Glasanteil kommt es zur abströmseitigen Drainage und Penetration des löslichen Salzes. Bei reiner Glasbeladung mit unlöslichem Partikelmaterial kommt es nicht zur abströmseitigen Drainage und ein Teil des Glases ist in der anströmseitigen Drainage nachweisbar. Es ist zu betonen, dass die Ergebnisse sich in erster Linie auf das hier untersuchte Stoffsystem bei hier untersuchten Betriebsparametern beziehen (siehe Kapitel 4) und, da es sich um erstmalige Betrachtungen dieser Phänomene handelt, eine uneingeschränkte Übertragbarkeit auf andere Stoffsysteme nicht gewährleistet ist.

8 Prüfung der Übertragbarkeit bisheriger Erkenntnisse auf grobporige Medienstrukturen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden in experimentellen Untersuchungen mit Oberflächenfiltern im Wesentlichen folgende Erkenntnisse erlangt:

- Eine Kurzzeitbeaufschlagung mit Wassertropfen führt zu einem charakteristischen, abrupten Abfall des Differenzdrucks durch die Umstrukturierung und Umlagerung des zuvor abgeschiedenen festen Partikelmaterials.
- Eine Langzeitbeaufschlagung salzbeladener Filtermedien mit Wassertropfen führt zu einer abströmseitigen Drainage und der Penetration von Salz durch die gesamte Tiefe des Filtermediums.
- Eine Langzeitbeaufschlagung mit Wassertropfen führt bei benetzbaren Oberflächenfiltern ferner zu einem charakteristischen Differenzdruckverlauf, der mit dem Kanal-Film-Modell, mit einer abströmseitigen Filmbildung vor Einsatz der Drainage, beschrieben werden kann.
- Nach einer Wasserbeaufschlagung mit abströmseitiger Drainage und Trocknung von der Anströmseite verbleibt im Filter abgeschiedenes Material ungleichmäßig auf der Anströmseite des Filters verteilt.
- Bei hydrophoben Oberflächenfiltern kommt es bei dem untersuchten Stoffsystem nicht zu einer Filmbildung und die entsprechenden Differenzdruckverläufe sind nicht mit dem Kanal-Film-Modell zu beschreiben.
- Salzbeladung erhöht bei unbenetzbaren Oberflächenfiltern die Benetzbarkeit und führt zur Penetration von Salzlösung durch das Filtermedium.
- Wasserbeaufschlagung führt bei beladenen Oberflächenfiltern zu einer Reduktion des Fraktionsabscheidegrads.

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit dieser neuen Erkenntnisse auf Stoffsysteme mit anderem strukturellem Aufbau des Filtermediums werden experimentelle Untersuchungen mit grobporigen hydrophilen Tiefenfiltern durchgeführt. Dazu werden zunächst Tiefenfilter mit Oberflächenfiltern verglichen und mit Bezug auf die bisherigen Erkenntnisse Hypothesen für deren Übertragbarkeit aufgestellt.

8.1 Theoretischer Vergleich von Tiefenfiltern mit Oberflächenfiltern: Abgeleitete Hypothesen

Die Partikelabscheidung findet bei Tiefenfiltern im Gegensatz zu Oberflächenfiltern im Innern der porösen Filterstruktur statt. Mit einer Porosität von 95 % bis 99 % sind Tiefenfilter in der Regel grobporig, während Oberflächenfilter Porositäten zwischen 70 % und 90 % aufweisen. Tiefenfilter werden bei Anströmgeschwindigkeiten zwischen 0,05 m/s und 2 m/s betrieben. Sie sind nicht abzureinigen und werden daher in der Regel bei Erreichen eines maximalen Enddifferenzdrucks entsorgt.

Da sich Partikeln in Tiefenfiltern überwiegend im Innern des Filters abscheiden, ist insbesondere bei Beladung mit löslichen Partikeln durch Beaufschlagung mit einer hohen rel. Luftfeuchtigkeit und Kontakt zu Wassertropfen in der gesamten Tiefe des Filters eine Umlagerung und Umstrukturierung inklusive Lösung von löslichen Partikeln und Kristallisation bei Trocknung zu erwarten. Auf Basis der vorangehenden Versuche kann auch hier ein Einfluss auf den Differenzdruck angenommen werden, da bei Umstrukturierung von Partikeln im Filtermedium in der Regel ein Abfall des Differenzdrucks zu beobachten ist. Es gibt kein Indiz zur Annahme eines Anstiegs des Differenzdrucks, beispielsweise durch Krustenbildung und Verschließen von Poren. Da in grobporigen Systemen die Kapillarwirkung stark reduziert oder gar nicht auftritt, sind die assoziierten Phänomene, wie der Einfluss der Trocknungsrichtung und daraus resultierend auskristallisiertes Salz an der Anströmseite nach der Trocknung, nicht zu erwarten, dafür könnte allerdings interne Drainage eintreten.

Aus den Unterschieden zwischen Tiefen- und Oberflächenfiltern ergeben sich also folgende Hypothesen für Untersuchungen mit hydrophilem Tiefenfiltermedium:

1. Eine Umlagerung und Umstrukturierung in der gesamten Tiefe des Filters und damit assoziierter Differenzdruckabfall und Sinken des Fraktionsabscheidegrads sind zu erwarten.
2. Eine Penetration der Flüssigkeit mit darin gelöstem Salz ist zu erwarten.
3. Aufgrund der Benetzbarkeit ist eine abströmseitige Drainage und kein Widerstand auf der Anströmseite, daher keine anströmseitige Drainage, zu erwarten.
4. Eine abströmseitige Filmbildung ist nicht zu erwarten.
5. Kapillarfluss zur Trocknungsfront und damit Rückstand von Salz überwiegend an der Anströmseite ist nicht zu erwarten.
6. Ein wesentlicher Einfluss der Strömungsrichtung während einer Durchströmungstrocknung auf den Salzverbleib bzw. das Salzprofil im Filter ist nicht zu erwarten.
7. Das Auftreten einer internen Drainage ist zu erwarten.

8.2 Langzeitbeaufschlagung von salzbeladenen Tiefenfiltern mit Wassertropfen

Zur Evaluierung der Hypothesen werden experimentelle Untersuchungen mit grobporigen hydrophilen Tiefenfiltern (Tabelle 4.3, Nr. 3) durchgeführt. Dabei werden, in Anlehnung an die Versuche mit mehrlagigen Oberflächenfiltern, dreilagige Tiefenfilter einer Langzeitbeaufschlagung analog Kapitel 6 bei medieneigneter Anströmgeschwindigkeit von $u = 25 \text{ cm/s}$ unterzogen (siehe Kapitel 4.4 für Details zur Durchführung). Die Filter werden für den Vergleich mit den bisher untersuchten Oberflächenfiltern mit einer Salzmasse in der gleichen Größenordnung beladen (148 mg). Es werden Verläufe und Aufnahmen einzelner Versuche aus den Versuchsreihen gezeigt, die die Ergebnisse repräsentativ darstellen.

8.2.1 Differenzdruckverläufe

Eine genaue Analyse des Differenzdruckverlaufs des Tiefenfilters während der Beladung mit K_2SO_4 , der Beaufschlagung mit $0,050 \text{ ml/min}$ Wassertropfen in gesättigter Luft und der Durchströmungstrocknung ist durchzuführen, um zu überprüfen, ob es zu einem mit Umlagerung assoziierten Abfall des Differenzdrucks kommt (siehe Kapitel 8.1 Hypothese 1), Flüssigkeit durch die gesamte Tiefe des Filters penetriert (siehe Kapitel 8.1 Hypothese 2), es lediglich zur Drainage auf der Abströmseite des Filters kommt (siehe Kapitel 8.1 Hypothese 3) und Filmbildung auf der Abströmseite auftritt (siehe Kapitel 8.1 Hypothese 4).

Abbildung 8.1 zeigt den Differenzdruckverlauf eines Tiefenfilters während der Beladung mit K_2SO_4 , der Wasserbeaufschlagung mit $0,050 \text{ ml/min}$ und der Durchströmungstrocknung.

Der Verlauf in Abbildung 8.1 zeigt, dass der Differenzdruck während der Beladung mit K_2SO_4 bis $1,30 \text{ mbar}$ ansteigt. Mit Beginn der Wasserbeaufschlagung sinkt der Differenzdruck abrupt auf $0,42 \text{ mbar}$. Bei anhaltender Wasserbeaufschlagung steigt der Differenzdruck bis $0,68 \text{ mbar}$ an. Eine Drainage tritt ein, deren Start nicht im Differenzdruckverlauf erkennbar ist. Der Differenzdruck steigt weiter linear bis $0,82 \text{ mbar}$ an, bis das Abbruchkriterium der Beaufschlagung, eine abströmseitige Drainage über einen Zeitraum von 70 min , erreicht ist. Bei anschließender Durchströmungstrocknung sinkt der Differenzdruck auf den Δp_0 von $0,33 \text{ mbar}$.

Der Differenzdruckanstieg während der Beladung mit K_2SO_4 bestätigt den erwarteten nicht-linearen Verlauf bei Tiefenfiltern (siehe Kapitel 2). Der abrupte Abfall zu Beginn der Wasserbeaufschlagung entspricht den Beobachtungen bei Kurzzeit- und Langzeitbeaufschlagung von Oberflächenfiltern. Der folgende Anstieg des Differenzdrucks bei anhaltender Wasserbeaufschlagung entspricht nicht dem vom Kanal-Film-Model für benetzbare Ölnebelfilter beschriebenen Verlauf, da kein mit einer Filmbildung assoziierter, steiler Differenzdruckanstieg vor Drainagebeginn zu erkennen ist. Nach abschließender Trocknung sinkt der Differenzdruck wie bei Oberflächenfiltern beobachtet auf den Δp_0 . Der Abfall des Differenzdrucks zu Beginn der Beaufschlagung mit Wassertropfen

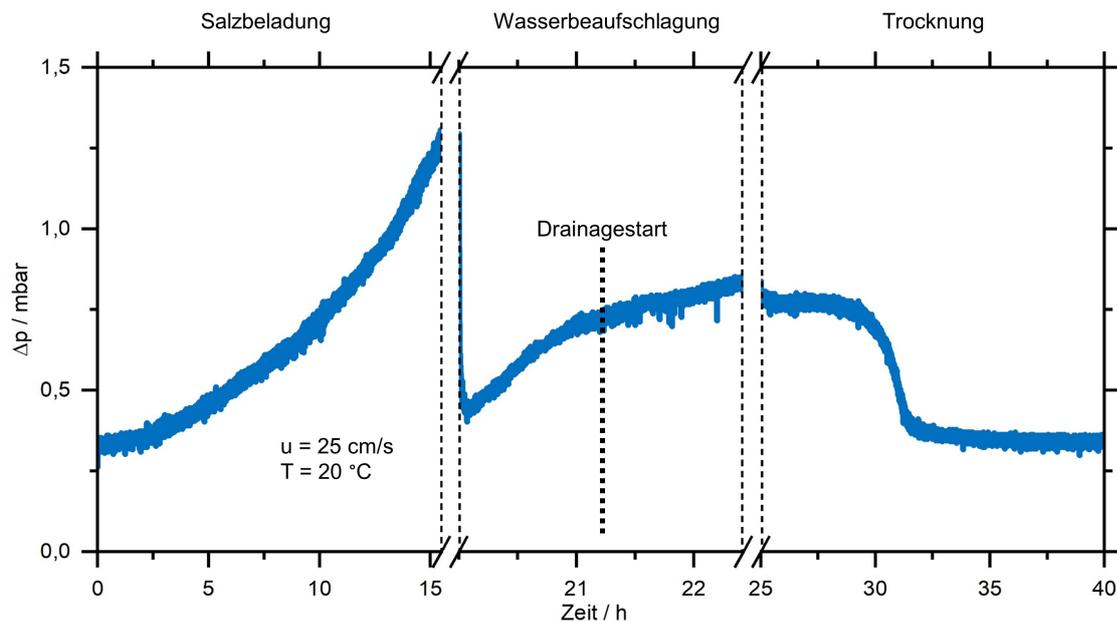


Abbildung 8.1: Differenzdruckverlauf während der Beladung eines Tiefenfilters mit löslichem Salz, der Beaufschlagung mit Wassertropfen und der Durchströmungstrocknung.

lässt auf eine Materialumlagerung im Filter schließen. Lee et al. [119] zeigt mit μ -CT-Analysen, dass in Tiefenfiltern abgeschiedenes NaCl, wenn es 50 % rel. Luftfeuchtigkeit ausgesetzt ist, bereits tiefer in das Filtermedium penetriert und bei 100 % rel. Luftfeuchtigkeit, also als Lösungstropfen noch tiefer in das Filtermedium penetriert und bei Trocknung zu größeren Kristallen anwächst. Dass mit einer Wasserbeaufschlagung salzbeladener Tiefenfilter durch die daraus resultierende Umlagerung des Salzes auch der Fraktionsabscheidegrad abnimmt, wird durch Ergebnisse aus einem, im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten, Projekt zur Untersuchung des Einflusses von Feuchte auf salzbeladene Tiefenfilter in der Zuluft von Turbinen bestätigt [120]. In dem Projekt wurde der Fraktionsabscheidegrad von Tiefenfiltern vor und nach einer Salzbeladung und nach einer anschließenden Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit $>$ Deliqueszenzfeuchte mit Durchströmungstrocknung gemessen. Es konnte gezeigt werden, dass Beaufschlagung mit hoher rel. Luftfeuchtigkeit zu einem Abfall des Differenzdrucks salzbeladener Tiefenfilter und zu einer Reduktion des Fraktionsabscheidegrads für alle vermessenen Partikelgrößen führte.

Insgesamt bestätigt der Differenzdruckverlauf mit Einsatz der Drainage also die Hypothesen, dass es zu einem mit Umlagerung assoziierten Abfall des Differenzdrucks kommt (siehe Kapitel 8.1 Hypothese 1) und Flüssigkeit durch die gesamte Tiefe des Filters penetriert (siehe Kapitel 8.1 Hypothese 2), es keinen Widerstand auf der Anströmseite gibt und es lediglich zur Drainage auf der Abströmseite des Filters kommt (siehe Kapitel 8.1 Hypothese 3) sowie keine Filmbildung auf der Abströmseite auftritt (siehe Kapitel 8.1 Hypothese 4).

8.2.2 Gravimetrische und optische Analysen

Ergänzend zur Analyse des Differenzdruckverlaufs des Tiefenfilters während der Beladung mit K_2SO_4 , der Beaufschlagung mit Wassertropfen und der Durchströmungstrocknung ermöglichen gravimetrische und optische Analysen der Versuche die Überprüfung der bisher nicht adressierten Hypothesen (siehe Kapitel 8.1 Hypothesen 5-7)

Abbildung 8.2 zeigt die Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der abströmseitigen Drainage.

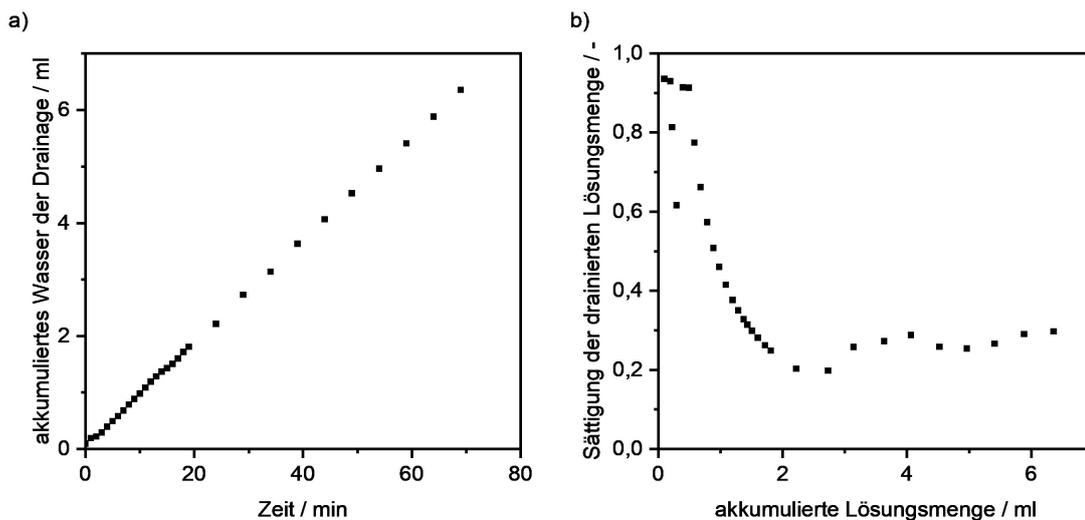


Abbildung 8.2: Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der abströmseitigen Drainage eines salzbeladenen Tiefenfilters a) drainierte Wassermenge pro Zeit und b) Sättigung der Drainage pro akkumulierter Drainagemenge. Die Zeit $t = 0$ markiert den Beginn der Drainage.

Mit anhaltender Wasserbeaufschlagung steigt die akkumulierte Wassermenge in der abströmseitigen Drainage linear an (siehe Abbildung 8.2 a). Die Sättigung der abströmseitigen Drainage nimmt mit zunehmender Drainagemenge ab und schwankt ab einer akkumulierten Lösungsmenge von 3 ml um 28 %. Qualitativ entsprechen diese Beobachtungen denen, die bei Oberflächenfiltern gemacht wurden. Bei einem quantitativen Vergleich ist auffällig, dass die Sättigung der abströmseitigen Drainage mit zu Beginn über 90 % wesentlich höher liegt als bei dem Oberflächenfiltermedium mit unter 20 % (vgl. Abbildung 8.2 und Abbildung 6.10).

Abbildung 8.3 zeigt die Salzbeladung der einzelnen Filterlagen vor und nach Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung in absoluten Werten einerseits und als Anteil der verbleibenden Gesamtmasse im Filter andererseits.

Die gravimetrische Analyse der Filterlagen zeigt, dass nach Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung 53 mg Salz das Filtermedium verlassen haben (siehe Abbildung 8.3 a). In jeder Filterlage verbleibt nach Wasserbeaufschlagung und Trocknung absolut weniger Salz als nach der Salzbeladung. Die anströmseitige Filterlage 1 weist eine Reduzierung in der Salzbeladung von über 50 % auf. Die Salzbeladung in Filterlage 2 hat um 30 % gegenüber ihrer Ursprungsbeladung

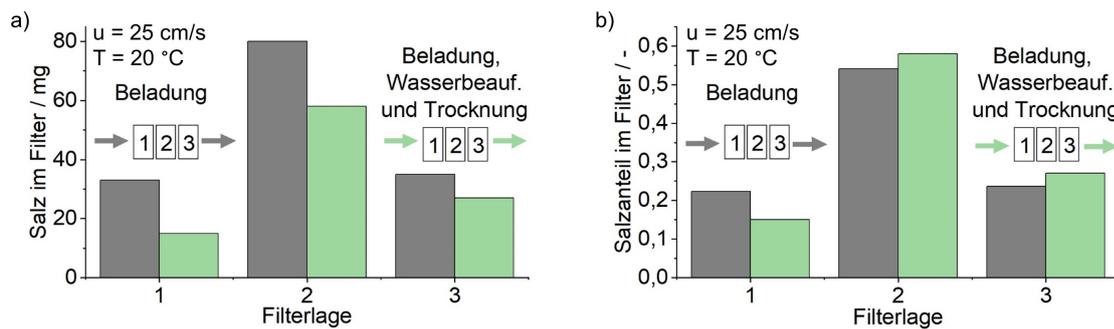


Abbildung 8.3: Ergebnisse der gravimetrischen Analyse von salzbeladenen Tiefenfiltern vor und nach Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung a) in absoluten Werten und b) als Anteil der abschließenden Gesamtbelastung.

abgenommen und die der abströmseitigen Filterlage 3 um 29 %. Auch die Verteilung des Salzes über die drei Filterlagen hat sich durch die Wasserbeaufschlagung und anschließende Durchströmungstrocknung verändert (siehe Abbildung 8.3 b). Während der größte Salzanteil weiterhin in Filterlage 2 verbleibt, hat Filterlage 1 anteilig an Masse verloren, während die Anteile in Filterlagen 2 und 3 gestiegen sind. Damit verbleibt das Salz nach der Trocknung von Tiefenfiltern, anders als bei Oberflächenfiltern, nach der Langzeitbeaufschlagung mit Wassertropfen nicht überwiegend in der anströmseitigen ersten Filterlage. Aus der anströmseitigen Filterlage 1 penetriert anteilig am meisten Salz. Das spricht dafür, dass das Salz nicht durch Kapillarfluss an die Trocknungsfront transportiert wird und bestätigt die Hypothese, dass durch ausbleibende Kapillarwirkung das Salz nicht überwiegend anströmseitig verbleibt (siehe Kapitel 8.1 Hypothese 5).

Lichtmikroskopaufnahmen der Filterlagen bestätigen diesen Effekt. Abbildung 8.4 zeigt den Differenzdruckverlauf eines dreilagigen Tiefenfilters während der Salzbeladung, Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung und Lichtmikroskopaufnahmen von der Anströmseite der drei Filterlagen eines Tiefenfilters nach der Salzbeladung und eines salzbeladenen Tiefenfilters nach Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung.

Die Lichtmikroskopaufnahmen der Anströmseite der Filterlagen nach der Salzbeladung (siehe Abbildung 8.4 1, Filterlage 1-3) zeigen, dass das Salz die Fasern aller Filterlagen umschließt und über die gesamte Tiefe des Filters abgeschieden wird. Dies entspricht der erwarteten Partikelverteilung in Tiefenfiltern. Nach Wasserbeaufschlagung und Trocknung sind nur vereinzelt individuellen Salzkristalle identifizierbar. Salzkrusten sind nicht zu sehen (siehe Abbildung 8.4 2 Filterlage 1-3), was auf die geringe Auflösung zurückzuführen sein könnte.

Eine umgekehrte Strömungsrichtung während der Durchströmungstrocknung führt zu dem in Abbildung 8.5 gezeigten Profil. Abbildung 8.5 zeigt den Salzanteil der im Filter befindlichen Salzmasse von einem Filter nach Beladung und von zwei Filtern nach Beladung, Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung mit unterschiedlicher Strömungsrichtung während der Durchströmungstrocknung.

Eine gravimetrische Analyse zeigt, dass die Beaufschlagung mit Wassertropfen unabhängig von der Strömungsrichtung während der Durchströmungstrocknung zur Penetration des Salzes in das

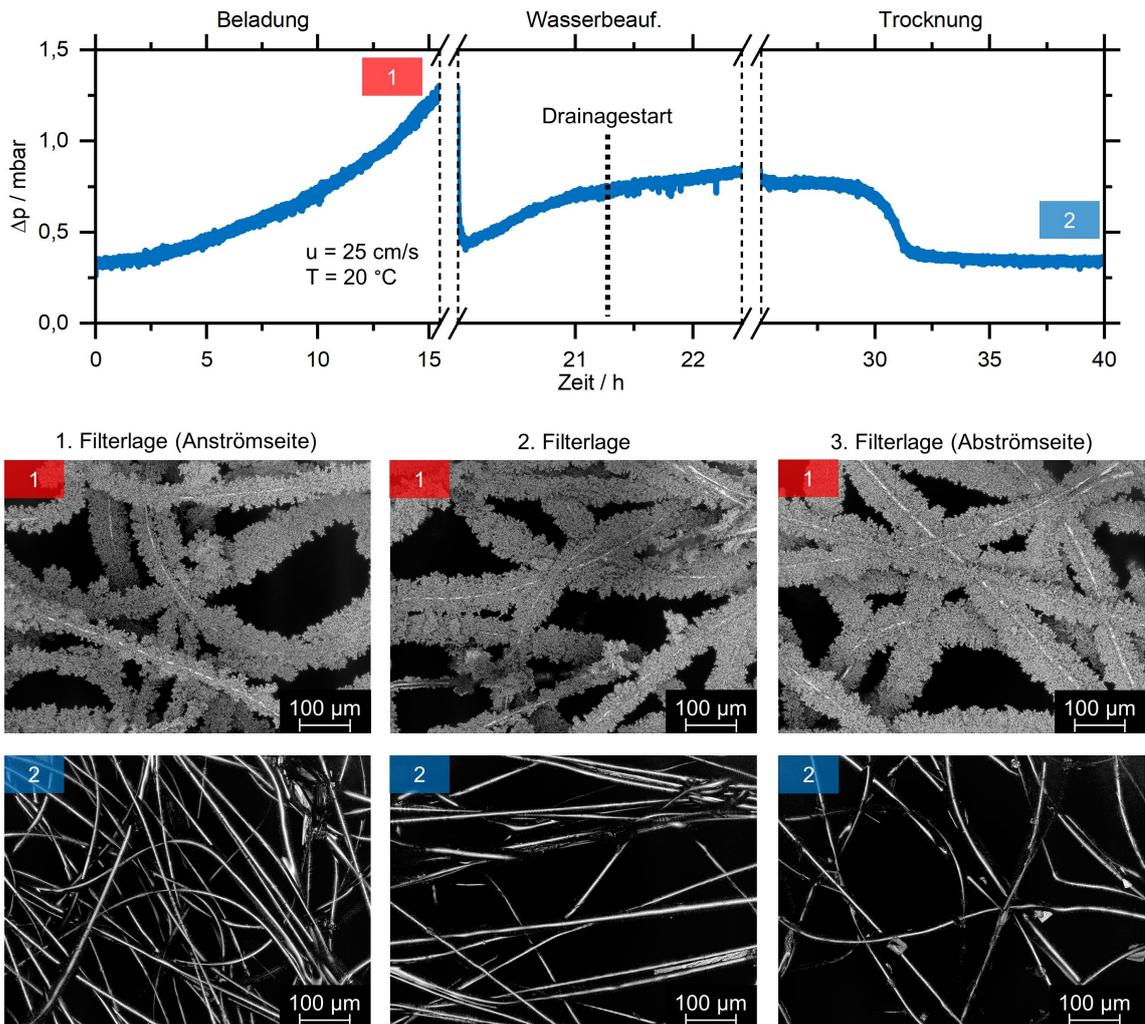


Abbildung 8.4: Differenzdruckverlauf während der Beladung mit K_2SO_4 , der Wasserbeaufschlagung und der Durchströmungstrocknung der dreilagigen Tiefenfilter mit Mikroskopaufnahmen der Anströmseiten der Filterlagen eines mit K_2SO_4 -beladenen Tiefenfilters 1) vor Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung und 2) nach Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung.

Filtermedium mit Kristallisation im Filterinnern führt. Dies ist auch auf eine reduzierte Kapillarwirkung durch eine gröbere Porenstruktur des Filtermediums zurückzuführen und bestätigt die anfangs aufgestellte Hypothese 6 (siehe Kapitel 8.1).

Abbildung 8.6 zeigt Kameraaufnahmen der Abströmseite der Tiefenfilter im Betrieb, während der Wasserbeaufschlagung.

Schon bei einer Beaufschlagungsdauer von 55 min, noch vor Drainagestart, ist ein dunkler Bereich, ein Flüssigkeitssumpf im Filtermedium, zu erkennen (siehe Abbildung 8.6). Der Flüssigkeitspegel im Filter steigt, während der darüber liegende überwiegende Anteil des Filtermediums keine Verfärbung oder andere Anzeichen einer Durchnässung aufweist.

Bereits der Differenzdruckverlauf zeigt keine Anzeichen für eine Filmbildung. Das wird durch die Fotos der Abströmseite zusätzlich bestätigt (siehe Kapitel 8.1 Hypothese 4). Die Aufnahmen

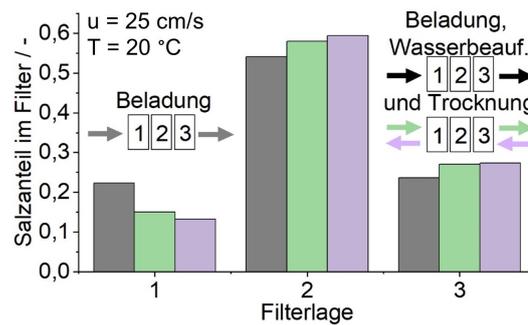


Abbildung 8.5: Salzmassenverteilung in einem dreilagigen Tiefenfilter nach Beladung und nach Beladung und Wasserbeaufschlagung mit entgegengesetzten Strömungsrichtungen während der anschließenden Durchströmungstrocknung.

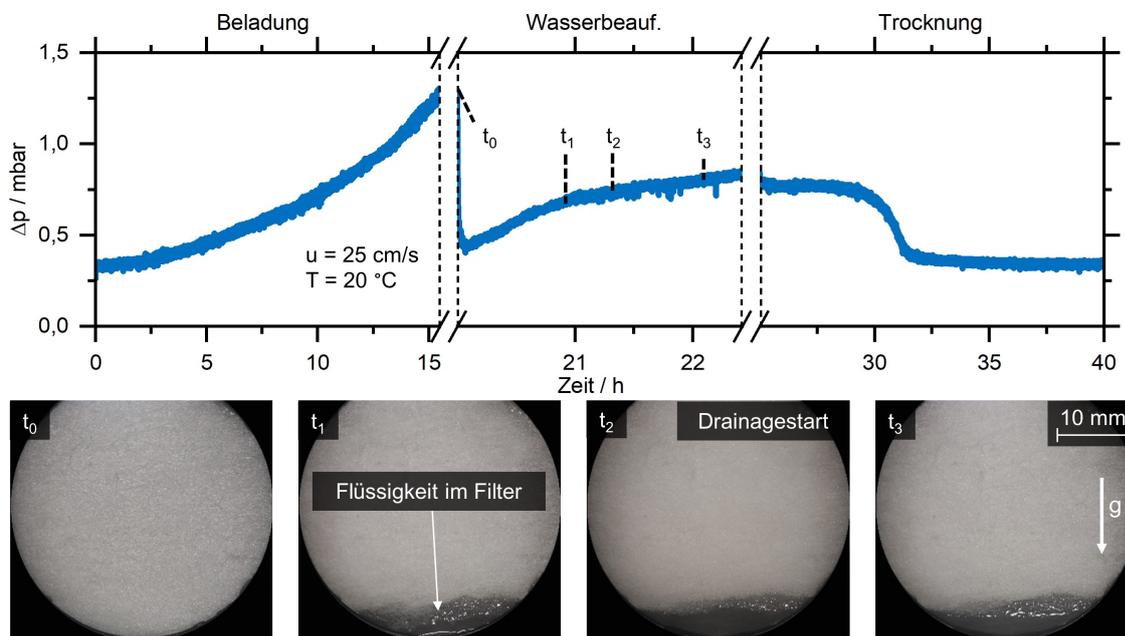


Abbildung 8.6: Fotos der Abströmseite des Tiefenfilters während der Wasserbeaufschlagung.

zeigen, dass sich die Flüssigkeit bereits vor Beginn der abströmseitigen Drainage im unteren Teil des Filtermediums anstaut (dunkle Verfärbung) und bestätigen damit das Auftreten einer internen Drainage, also dem Fließen von Flüssigkeit, die im oberen Teil des Filters abgeschieden wird, durch Schwerkraft entlang der Fasern in den unteren Teil des Filters. Das Drainieren von Flüssigkeit im Inneren von Filtern ist von grobporigen Koaleszenzfiltern bekannt [121]. Dies bestätigt die anfangs aufgestellte Hypothese 7 (siehe Kapitel 8.1). Perspektivisch ist bei Betrachtung der Abströmseite des salzbeladenen Tiefenfilters (siehe Abbildung 8.1) zu erwarten, dass, bei einer Beladung mit löslichen und unlöslichen Partikeln, auch unlösliches Partikelmaterial durch „Spülen“ im unteren Bereich des Filters durch den Filter penetriert und in die Drainage gelangen könnte.

8.3 Zusammenfassung

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben die Prüfung der Übertragbarkeit der bisher auf Oberflächenfiltern basierenden Erkenntnisse auf Filtermedien mit anderem strukturellem Aufbau zum Ziel. Dazu fanden Versuche mit grobporigen Tiefenfiltern mit mediengerechter Anströmgeschwindigkeit von $u = 25 \text{ cm/s}$ analog der Durchführungsschritte während der Langzeitbeaufschlagung von mehrlagigen Oberflächenfiltern statt, um festzustellen, inwieweit die bisher beobachteten Szenarien auch auf grobporige Tiefenfilter zutreffen. Die Experimente erfolgten mit dreilagigen Tiefenfiltern, die mit K_2SO_4 beladen, mit $0,050 \text{ ml/min}$ Wassertropfen in gesättigter Luft beaufschlagt und durch Durchströmungstrocknung getrocknet wurden.

Betrachtungen des Differenzdrucks während der Wasserbeaufschlagung von hydrophilen Tiefenfiltern, unterstützt durch gravimetrische Analysen und Aufnahmen mit Lichtmikroskop, zeigen, dass eine Beaufschlagung von Tiefenfiltern mit Wassertropfen eine Umlagerung und Umstrukturierung in der gesamten Tiefe des Filters verursacht und ein damit assoziierter Differenzdruckabfall zu Beginn der Beaufschlagung, wie auch bei Oberflächenfiltern, auftritt, durch den zu erwarten ist, dass Analog zu Versuchen mit reiner rel. Luftfeuchtigkeit der Fraktionsabscheidegrad sinkt. Beim hydrophilen Tiefenfiltermedium kommt es, wie auch bei hydrophilen Oberflächenfiltern, durch Beaufschlagung mit Wassertropfen zur Penetration von Salzlösung auf die Abströmseite. Eine abströmseitige Drainage tritt auf, in der durch das Filtermedium penetriertes Salz nachgewiesen werden kann.

Aus den Experimenten ergaben sich wesentliche Unterschiede zwischen dem Einfluss einer Wasserbeaufschlagung auf salzbeladene Oberflächenfilter und Tiefenfilter. Es kommt, anders als bei Oberflächenfiltern, nicht zu einer Filmbildung auf der Anström- oder Abströmseite. Die optische Beobachtung der Abströmseite zeigt die Ansammlung von Flüssigkeit im unteren Teil des Filtermediums, bevor eine abströmseitige Drainage einsetzt. Flüssigkeit, mit der das Filtermedium gleichmäßig beaufschlagt wird, fließt in den unteren Bereich des Filtermediums, es tritt also eine interne Drainage auf. Aufgrund der grobporigen Struktur und damit reduzierten Kapillarwirkung treten Effekte, wie beispielsweise überwiegender Salzurückstand an der Trocknungsfront nach der Durchströmungstrocknung, nicht auf. Nach abschließender Durchströmungstrocknung ist das Salz über die gesamte Filtertiefe auskristallisiert und die Strömungsrichtung während der Trocknung hat, anders als bei Oberflächenfiltern, keinen messbaren Einfluss auf die Salzverteilung im Filtermedium. Damit bestätigen sich alle anfangs aufgestellten Hypothesen (siehe Kapitel 8.1).

Die Übertragbarkeit der in Kapitel 5-7 erarbeiteten Ergebnisse auf grobporige Filtermedien ist nach diesen ersten Untersuchungen nur für Erkenntnisse gegeben, die nicht wesentlich von der Kapillarwirkung im Filtermedium beeinflusst sind.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

9.1 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Arbeit untersucht filternde Abscheider in der Gasreinigung mit wasserlöslichen Partikeln und Wassertropfen, in Anlehnung an reale Betriebsbedingungen. Im Fokus der Betrachtungen stehen die durch Beaufschlagung salzbeladener Filtermedien mit Wassertropfen initiierten Szenarien, Umlagerung auf der Anströmseite, Penetration der löslichen Substanz in das Filtermedium, Penetration der löslichen Substanz durch das Filtermedium hindurch auf die Abströmseite und anströmseitige Drainage sowie das jeweils zugehörige Betriebsverhalten.

Ausgehend vom bekannten Kenntnisstand gelten die Untersuchungen zunächst der kurzzeitigen Beaufschlagung von rein löslichen Filterkuchen auf Oberflächenfiltern mit Wasser. Unabhängig vom Aggregatzustand des Wassers (gasförmig, angegeben als rel. Luftfeuchtigkeit, oder flüssig in Form von Wassertropfen) ergibt sich bei kurzzeitiger Wasserbeaufschlagung K_2SO_4 -beladener Filter ein charakteristischer Differenzdruckverlauf, der durch einen abrupten Abfall des Differenzdrucks gekennzeichnet ist. Dieser Differenzdruckabfall ist auf die anströmseitige Lösung des Salzes und Umstrukturierung des Filterkuchens zurückzuführen. Ein größeres Wasservolumen, das zu vollständig gesättigter Luft oder Wassertropfen führt, verstärkt die Auswirkungen und führt zu einer stärkeren Umlagerung des Filterkuchens und einem schnelleren Abfall des Differenzdrucks durch die Zunahme von gelöstem Salz. Wenn der Filter nach dem anfänglichen Abfall des Differenzdrucks weiterhin Wassertropfen ausgesetzt ist, steigt der Differenzdruck über dem Filter aufgrund von Flüssigkeitsansammlung wieder langsam an und sinkt erst, wenn das Filtermedium trocknet. Experimentelle Untersuchungen mit K_2SO_4 , KCl, NaCl zeigen, dass insbesondere bei geringen Wassermengen, wie beispielsweise einer rel. Luftfeuchtigkeit von 45 %, die Ausprägung des Einflusses vom löslichen Material und dessen Eigenschaften, wie Löslichkeit und Deliqueszenzfeuchte, abhängt. Mit zunehmender Deliqueszenzfeuchte des Salzes fällt die Strukturänderung des Filterkuchens kleiner aus. Damit fällt auch der daraus resultierende anfängliche Abfall des Differenzdrucks bei Beginn der Beaufschlagung, auch bei rel. Luftfeuchtigkeit weit unterhalb der Deliqueszenzfeuchte, geringer aus. Es wurde gezeigt, dass bei kurzzeitiger Beaufschlagung kein Massenverlust des beladenen Filters und damit auch kein Penetrieren von Salz durch das Filtermedium hindurch erfolgt. Der ermittelte charakteristische Differenzdruckabfall ist daher ein Indiz für eine Strukturänderung des Filterkuchens, nicht aber für das Penetrieren von Partikeln in das Filtermedium.

Bei der Langzeitbeaufschlagung von hydrophilen Oberflächenfiltern, die mit löslichem Salz und unlöslichem Glas beladen sind, mit Wassertropfen zeigt sich ein charakteristischer Differenzdruckverlauf. Auf den anfänglichen Differenzdruckabfall folgt bei andauernder Wasserbeaufschlagung ein flacher Differenzdruckanstieg, bevor es zu einem steilen Anstieg durch abströmseitige Filmbildung kommt. Danach tritt Drainage ein bei quasi-stationärem weiteren Differenzdruckverlauf. Es konnte gezeigt werden, dass der Differenzdruckverlauf mit dem für benetzbare Ölnebelfilter entwickelten Kanal-Film-Modell beschreibbar ist.

Am Beispiel von hydrophilen Oberflächenfiltern wurde erstmals die Penetration von im Filterkuchen abgeschiedenem löslichem Material durch die gesamte Tiefe von Oberflächenfiltern nachgewiesen. Die Penetration wird durch das Auftreffen von Wassertropfen ausgelöst, wodurch sich das Salz löst, die Salzlösung bei andauernder Beaufschlagung mit Wassertropfen den Filter penetriert und auf der Reingasseite des Filters abläuft. Die Analyse der abströmseitigen Drainage zeigte, dass lösliches Material durch den Filter dringt, während unlösliche Partikel bei den untersuchten Betriebsparametern nicht durch das Filtermedium penetrieren. Ein Vergleich des Differenzdrucks eines unbeladenen, eines salzbeladenen, eines salz- und glasbeladenen und eines glasbeladenen Filtermediums zeigt, dass sich mit zunehmender Partikelbeladung die Penetration der Flüssigkeit durch den Filter verlangsamt, während die Filmbildungskinetik unverändert bleibt. Dabei wurde der Einfluss der Zusammensetzung der Partikelbeladung aus löslichem und unlöslichem Material bisher nicht untersucht. Da der verlängerte Kanalbereich nicht allein durch zusätzliches Speichervolumen im Filterkuchen zu erklären ist, sind das Kanal-Film-Modell und Erkenntnisse aus der Ölnebelfiltration nicht direkt auf dieses Stoffsystem mit löslichen und unlöslichen festen Partikeln übertragbar.

Nach dem Trocknen zeigen REM-Analysen, dass das zurückbleibende Salz Krusten um die hydrophilen Faserbündel auf der Anströmseite der hydrophilen Oberflächenfilter und um die auf dem Filter abgelagerten Glaskugeln bildet. Weitere REM- und EDX-Analysen zeigen, dass das ursprünglich gleichmäßig abgeschiedene Material nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung ungleichmäßig auf der Anströmseite des Filters verteilt ist. REM-Aufnahmen und μ -CT-Scans bestätigen, dass das Salz und die Glaskugeln nach Wasserbeaufschlagung und Trocknung auf der Anströmseite des Filtermediums verbleiben, wo sie ursprünglich abgeschieden wurden.

Die Beaufschlagung mit Wassertropfen mit anschließender Durchströmungstrocknung und die daraus resultierende Umlagerung des Partikelmaterials führt zu einer Verringerung des Fraktionsabscheidegrads im Vergleich zum trockenen beladenen Oberflächenfilter. Bei Oberflächenfiltern, die mit einem hohen Salzgehalt und wenig Glas beladen sind, ist der Fraktionsabscheidegrad mit dem des unbeladenen Filtermediums vergleichbar. Ungleichmäßig verteiltes Partikelmaterial auf der Anströmseite des Filtermediums führt, mit zunehmendem Anteil an unlöslichem Glas, zu einer inhomogenen Durchströmung des Filtermediums, wodurch sich die Anströmgeschwindigkeit lokal in den weniger beladenen Bereichen, die bevorzugt durchströmt werden, erhöht. Dadurch nimmt die Trägheitsabscheidung zu und die MPPS wird kleiner.

Die Strömungsrichtung während der Durchströmungstrocknung nach der Drainage bestimmt, wo im Filter das Salz auskristallisiert. Die in der Literatur beschriebene Trocknung von Flüssigkeit in porösen Strukturen erläutert, dass die trockene Luft in die großen Poren der Struktur (hier: Das Filtermedium) eindringt, während die Salzlösung die kleinen Kapillaren füllt und das Salz zur Trocknungsfront transportiert. Die Verwendung mehrlagiger Filter, also Filter mit mehreren Lagen desselben Filtermediums, die als ein (dickeres) Filtermedium betrachtet werden können, wurde als sinnvolle Methode zur Untersuchung der Salzverteilung in Oberflächenfiltern identifiziert. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse von mehrlagigen auf einlagige Filter wurde bestätigt. Kristallisation im Inneren eines Filtermediums, also in den mittleren Filterlagen eines mehrlagigen Filters, tritt nur bei mittelfristiger Wasserbeaufschlagung auf, die vor der Filmbildung beendet wird. Bei intermittierender Beaufschlagung mit Drainage vor der finalen Durchströmungstrocknung verbleibt das Salz überwiegend in der anströmseitigen Filterlage, analog zur kontinuierlichen Langzeitbeaufschlagung.

Ein Vergleich des Betriebsverhaltens benetzbarer und unbenetzbarer Filtermedien in dieser Arbeit während der Beaufschlagung mit Wassertropfen trägt ferner zu den Erkenntnissen über Oberflächenfilter bei. Dass die Benetzbarkeit des Filtermediums einen Einfluss auf die Abscheidung hat, ist aus dem Kanal-Film-Modell für die Abscheidung von Tropfen bekannt. Versuche in dieser Arbeit mit salzbeladenen Oberflächenfiltern bestätigen dies. Der Differenzdruckverlauf von salzbeladenen hydrophoben Filtern entspricht nicht dem von hydrophilen, sondern zeigt stattdessen einen anderen Verlauf. Nach einem anfänglichen Differenzdruckabfall, der dem charakteristischen Differenzdruckverlauf bei kurzzeitiger Wasserbeaufschlagung aufgrund einer Strukturänderung des Filterkuchens entspricht, steigt der Differenzdruck an. Nach dem Eintritt der abströmseitigen Drainage fällt er und erreicht bei andauernder Beaufschlagung einen Wert deutlich über Δp_0 . Das Kanal-Film-Modell ist somit nicht auf hydrophobe Oberflächenfilter anwendbar. Bei gleicher Beaufschlagungsdauer der salzbeladenen hydrophilen und hydrophoben Filtermedien ab dem Einsetzen einer abströmseitigen Drainage, kann in den abströmseitigen Drainagen dieser Filter eine ähnliche Menge Salz nachgewiesen werden. Anders als beim hydrophilen Filtermedium tritt beim hydrophoben Filtermedium auch eine anströmseitige Drainage auf. In der anströmseitigen Drainage wurde der größte Teil des Salzes aus dem Filterkuchen des hydrophoben Oberflächenfilters nachgewiesen. Es verbleiben weniger als 5 % des Salzes nach Wasserbeaufschlagung im hydrophoben Filtermedium. Zu einer abströmseitigen Drainage kommt es bei dem untersuchten hydrophoben Filtermedium nur, wenn vor der Beaufschlagung eine Salzbeladung stattgefunden hat. Das lösliche Partikelmaterial im Filtermedium reduziert die wasserabweisende Wirkung des Filters. Bei Filterkuchen aus löslichem Material oder löslichen und unlöslichen Partikeln erfolgt die Penetration von Lösung durch das Filtermedium. Bei reiner Beladung mit unlöslichen Partikeln bleibt die abströmseitige Drainage aus.

Die Charakterisierung des Verhaltens von Tiefenfiltern mit löslichem Filterkuchen bei bzw. nach Beaufschlagung mit Wassertropfen und anschließender Durchströmungstrocknung zeigt, inwieweit die Erkenntnisse auf unterschiedliche Stoffsysteme übertragbar sind. Eine Umlagerung und

Penetration von löslichem Material in, beziehungsweise durch das Filtermedium tritt durch Wasserbeaufschlagung auch bei salzbeladenen grobporigen Filtermedien auf. Allerdings kommt es bei dem untersuchten Tiefenfiltermedium nicht wie bei Oberflächenfiltern zur Filmbildung und dem damit assoziierten charakteristischen Merkmal eines steilen Anstiegs im Differenzdruck. Die Trocknung führt beim untersuchten grobporigen Filtermedium mit geringerer Kapillarwirkung nicht zum Salzverbleib an der Trocknungsfront auf der Anströmseite und die Beaufschlagung mit Wassertropfen führt beim Tiefenfilter zum Auftreten einer internen Drainage.

Die Betrachtungen erweitern das bisherige Wissen über grundlegende Vorgänge beim Betrieb von filternden Abscheidern, insbesondere unter Realbedingungen mit Einfluss durch Wassertropfen und Anwesenheit löslicher Partikeln im System. Sie können damit die richtige Auswahl des Filtermediums bei der Prozessauslegung und die Interpretation des Betriebsverhaltens von Filtern unterstützen.

9.2 Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen konzentrieren sich auf die grundlegenden Szenarien, die bei der Beaufschlagung von beladenen Filtern mit Wassertropfen auftreten. Diese Arbeit beschäftigt sich bereits mit unterschiedlichen Filtermedien in Bezug auf deren Benetzbarkeit, hydrophil und hydrophob, und grundlegende Struktur, Oberflächenfilter und Tiefenfilter. Weiterführende Parameterstudien zum Einfluss der Strukturparameter von Filtermedien könnten die Basis für eine Modellentwicklung bilden und dadurch die Vorhersagbarkeit des Betriebsverhaltens von Filtern ermöglichen. Ferner wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass die Trocknung die Partikelmaterialverteilung im Filter maßgeblich beeinflussen kann. Es konnte nicht abschließend geklärt werden, warum sich dieser Einfluss bei Oberflächenfiltern nach einer Wasserbeaufschlagung mit oder ohne Drainage unterscheidet. Dies ist voraussichtlich von Strukturparametern des Filters, wie Porengrößenverteilung, und beeinflussenden Parametern wie beispielsweise der Trocknungsart sowie Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Experimentelle Untersuchungen, gestützt von mathematischen Simulationen, könnten an dieser Stelle das Verständnis grundlegender Mechanismen in Filtern erweitern und bisher nicht betrachtete Vorgänge und deren Auswirkung auf das Betriebsverhalten von Filtern in der Gasreinigung aufdecken. Die resultierenden Erkenntnisse können in die zukünftige Filterauslegung und Betriebsoptimierung einfließen.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Übersicht bisheriger Arbeiten mit ausgewählten Publikationen und Einordnung dieser Arbeit.	4
2.2	Exemplarischer Fraktionsabscheidegrad eines filternden Abscheiders mit diffusionsdominierter Abscheidung unterhalb der MPPS und impaktionsdominierter Abscheidung oberhalb der MPPS (Oberflächenfiltermedium mit Kaliumsulfat bei 3,5 cm/s in der Tiefenfiltrationsphase vermessen).	5
2.3	Exemplarischer Differenzdruckverlauf eines Oberflächenfilters während der Beladung bei konstanter Anströmgeschwindigkeit und konstanter Konzentration mit schnellem Erreichen des linearen Differenzdruckanstieges, der die Kuchenfiltration markiert.	6
2.4	Schematischer Differenzdruckverlauf eines a) oleophilen und b) oleophoben Filters nach dem Kanal-Film-Modell mit eingezeichnetem Start einer abströmseitigen Drainage.	11
2.5	Auf einem Filter aufgefangene, in unterschiedlichen Erscheinungsformen auskristallisierte NaCl-Partikeln (a) durch Trocknung einer zerstäubten Salzlösung im Diffusionstrockner und (b) durch Trocknen einer Lösung auf einem hydrophoben Filter mit einem Gasstrom.	15
3.1	Vier Szenarien könnten potenziell durch die Beaufschlagung eines Oberflächenfilters mit wasserlöslichen Filterkuchenbestandteilen mit Wassertropfen ausgelöst werden.	19
4.1	Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus. Die Zahlen weisen auf die verschiedenen Schritte der Versuchsdurchführung hin; (1) die Filtration von Salz, (2) die Konditionierung und Durchströmungstrocknung mit Luft und (3) die Befeuchtung, die mit verschiedenen Methoden zur Feuchte- und Wassertropfenerzeugung (A-D) durchgeführt werden kann.	28
4.2	Partikelgrößenverteilungen der verwendeten Salze zur Untersuchung der Kurzzeitbeaufschlagung.	28
4.3	Abnahme des Durchmessers eines Tropfens von $x = 3 \mu\text{m}$ aufgrund von Verdunstung bei 80 %, 90 %, 95 %, und 99 % rel. Luftfeuchtigkeit.	30
4.4	Schematische Darstellung und Foto des Versuchsaufbaus zur Langzeitbeaufschlagung.	32
4.5	Partikelgrößenverteilungen von a) K_2SO_4 und b) Glas	33
4.6	Zeichnung der Filterkammer für die experimentelle Untersuchung der Langzeitbeaufschlagung.	34
4.7	Fotos der Anström- und Abströmseite der Filterhalterung für Oberflächenfilter.	35
4.8	Zeichnung des Querschnitts und Fotos der Anström- und Abströmseite der Filterhalterung für Tiefenfilter.	36
4.9	Aufbau zur optischen Beobachtung der Filteranström- und abströmseite.	37

4.10	Differenzdruckverläufe während der Partikelbeladung zum Vergleich von salz- und glasbeladenen Filtern an der Versuchsanlage zur Langzeitbeaufschlagung mit Filter Nr. 2 (siehe Tabelle 4.3), K_2SO_4 und Glas eines salzbeladenen, eines salzglasbeladenen (Verhältnis 1:2) und des glasbeladenen Filters.	39
4.11	Partikelgrößenverteilung von K_2SO_4 für die Fraktionsabscheidegradmessungen.	42
5.1	Δp mit abströmseitig gemessener rel. Luftfeuchtigkeit eines hydrophoben Oberflächenfilters während der Beladung mit K_2SO_4 , der Konditionierung mit partikelfreier Luft, der Beaufschlagung mit 219 g Wassertropfen / m^2 innerhalb 25 min und der Durchströmungstrocknung.	47
5.2	Differenzdruck ($\Delta p - \Delta p_0$) mit abströmseitig gemessener rel. Luftfeuchtigkeit für K_2SO_4 -beladene Filtermedien während der Beaufschlagung mit hoher rel. Luftfeuchtigkeit > 85 %, 219 g Wassertropfen / m^2 und 506 g Wassertropfen / m^2 und anschließender Durchströmungstrocknung. Die Zeit $t = 0$ markiert den Start der Wasserbeaufschlagung.	49
5.3	REM-Aufnahmen der Anströmseite von Filtermedien mit K_2SO_4 (1) nach der Beladung ohne Einfluss von rel. Luftfeuchtigkeit und nach der Beaufschlagung mit (2) rel. Luftfeuchtigkeit > 85 % ohne Wassertropfen, (3) 219 g Wassertropfen / m^2 und (4) 506 g Wassertropfen / m^2 und Durchströmungstrocknung in a) Übersichtformat und b) Detailansicht.	51
5.4	REM-Aufnahmen der Anströmseite und des Querschnitts von K_2SO_4 -beladenen Filtermedien nach der Salzbeladung (oben) und nach der Beaufschlagung mit 506 g Wassertropfen / m^2 und anschließender Durchströmungstrocknung (unten).	53
5.5	Differenzdruck ($\Delta p - \Delta p_0$) mit abströmseitig gemessener rel. Luftfeuchtigkeit während der Beladung mit (1) NaCl, (2) KCl und (3) K_2SO_4 , der Beaufschlagung mit (a) hoher rel. Luftfeuchtigkeit > 85 %, (b) 219 g Wassertropfen / m^2 und (c) 506 g Wassertropfen / m^2 und der anschließenden Durchströmungstrocknung der Filter.	54
5.6	Differenzdruck ($\Delta p - \Delta p_0$) mit abströmseitig gemessener rel. Luftfeuchtigkeit während der Beaufschlagung mit 219 g Wassertropfen / m^2 und anschließender Durchströmungstrocknung für K_2SO_4 , KCl und NaCl	55
5.7	REM-Aufnahmen a) der Anströmseite, der Querschnittsfläche als b) Übersicht und c) Ausschnitt und d) der Abströmseite salzbeladener Filtermedien vor und nach Beaufschlagung mit 506 g Wassertropfen / m^2 und anschließender Durchströmungstrocknung für NaCl (1, 2), KCl (3, 4) und K_2SO_4 (5, 6).	56
5.8	Differenzdruck von Filtern während der Beladung bei rel. Luftfeuchtigkeit < 30 % mit NaCl, KCl oder K_2SO_4 bis ca. 4,5 mbar, der Beaufschlagung mit rel. Luftfeuchtigkeit von 45 % und anschließender Durchströmungstrocknung und schematisch die auf Basis der REM-Aufnahmen (siehe Abbildung 5.3) abgeleiteten Dendritenstrukturen während der Beladung und der Wasserbeaufschlagung.	58
6.1	Differenzdruck mit abströmseitig gemessener rel. Luftfeuchtigkeit während der Beladung mit K_2SO_4 , der Beaufschlagung mit Wassertropfen und der Durchströmungstrocknung mit eingezeichnetem Beginn der abströmseitigen Drainage.	62
6.2	Fotos der Anströmseite des unbeladenen Filtermediums (1), eines salzbeladenen Filtermediums (2) und eines salzbeladenen Filtermediums nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung (3) entsprechend der im Differenzdruckdiagramm angegebenen Zeitpunkte.	63

6.3	REM-Aufnahmen eines Ausschnittes der Anströmseite der Filtermedienproben (a) mit Vergrößerungen (b) und entsprechenden EDX-Scans der Proben (c) von (1) einer Probe vor der Partikelbeladung und (2) zwei Proben nach der Partikelbeladung und (3) zwei Proben nach Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung (3.1, 3.2).	64
6.4	Analyse eines salzbeladenen Filtermediums nach Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung: REM-Aufnahmen der Anströmseite (a), des Querschnitts (b) und der Abströmseite (c), 3D-Ansicht eines μ -CT-Scans der gesamten Tiefe des Filtermediums (d), des Zentrums des Filtermediums (e) und der Volumenanteil von Fasern und Salz über die Tiefe des dargestellten μ -CT-Scans (f). . .	66
6.5	Vergleich zwischen (a) dem schematischen Differenzdruck für benetzbare Filter durch das Kanal-Film-Modell beschrieben, und (b) dem beobachteten Verhalten eines salzbeladenen benetzbaren Filters bei der Beaufschlagung mit Wassertropfen. . .	67
6.6	(a) Differenzdruck des salzbeladenen Filters während der Beaufschlagung mit Wassertropfen mit der in der Drainage nachgewiesenen akkumulierten Salzmasse und (b) die gravimetrischen Analyse des Filters.	68
6.7	Bereich des Differenzdrucks des salzbeladenen Filters mit Standardabweichung während der Beaufschlagung mit Wassertropfen. Die Zeit $t = 0$ markiert den Start der Wasserbeaufschlagung.	69
6.8	Differenzdruckverläufe während Beladung und der Beaufschlagung mit Wassertropfen eines salzbeladenen Filters, eines mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln im Verhältnis 1:2 beladenen Filters und eines glasbeladenen Filters und zusätzlich der Differenzdruckverlauf eines unbeladenen Filters während der Beaufschlagung mit Wassertropfen.	70
6.9	Fotos (a), REM-Aufnahmen (b) und EDX-Scans (c) der Anströmseite des salzbeladenen Filters vor (1) und nach (2) Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung sowie des mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln im Verhältnis 1:2 beladenen Filters vor (3) und nach (4) Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung.	73
6.10	Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der Drainage eines salzbeladenen und eines mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln im Verhältnis 1:2 beladenen Filters. Die Zeit $t = 0$ markiert den Beginn der Drainage.	74
6.11	Fraktionsabscheidegrade vor der Beladung (unbeladen), nach der Beladung (beladen) und nach der Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung eines (a) mit Salz beladenen, (b) mit Glas beladenen, (c) mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln im Verhältnis 1:2 beladenen und (d) mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln im Verhältnis 1:6 beladenen Filters. Die salzhaltigen Filterkuchen enthalten alle die gleiche Salzmasse von 131 mg.	75
6.12	Differenzdruckverläufe während der Beaufschlagung mit Wassertropfen eines unbeladenen Filters, eines salzbeladenen Filters, eines mit einer Mischung aus Salz- und Glaspartikeln beladenen Filters und eines glasbeladenen Filters.	78
6.13	Differenzdruck ($\Delta p - \Delta p_0$) eines salzbeladenen einlagigen Filters und eines salzbeladenen vierlagigen Filters während der Beaufschlagung mit Wassertropfen.	81
6.14	Vergleich der Ergebnisse der gravimetrischen Analyse des einlagigen und vierlagigen Filters von a) Drainage und b) Filterlagen.	82

6.15	Vergleich von zwei vierlagigen Filtern, die mit Salz beladen, 190 und 350 Minuten lang mit Wasser beaufschlagt und durch Durchströmung getrocknet wurden: a) Differenzdruck ($\Delta p - \Delta p_0$) und b) die Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der Filterlagen.	84
6.16	Differenzdruckverlauf von vierlagigen Filtern während der mittelfristigen Beaufschlagung ohne Drainage, der kontinuierlichen Beaufschlagung mit Drainage und der intermittierenden Beaufschlagung mit Drainage. Die Zeit $t = 0$ markiert den Start der Wasserbeaufschlagung.	85
6.17	a) Differenzdruckverlauf von vierlagigen Filtern während der zweiten / finalen Beaufschlagung mit Wassertropfen mit Drainage bei intermittierendem Betrieb im Vergleich zum Verlauf während einmaliger, kontinuierlicher Langzeitbeaufschlagung, wobei die Zeit $t = 0$ den Start der Wasserbeaufschlagung markiert, und b) gravimetrische Analysen der zugehörigen Drainagen.	85
6.18	Salzverteilung innerhalb der mittels Durchströmungstrocknung getrockneten Filter unterteilt in 4 Lagen nach Beladung, nach mittelfristiger Beaufschlagung mit Wassertropfen, nach kontinuierlicher Langzeitbeaufschlagung und nach intermittierender Beaufschlagung.	86
6.19	a) Schematische Darstellung der Wasserbeaufschlagung eines Salzbeladenen Filters mit Beaufschlagungs-Anströmseite, b) schematische Darstellung der Momentaufnahme des Filters bei beginnender mechanischer Entfeuchtung und c) Massenverteilung von Salz in vierlagigen Filtern nach Salzbeladung, Beaufschlagung mit Wassertropfen mit (1) Durchströmungstrocknung von der Beaufschlagungs-Anströmseite (aus der gleichen Richtung wie bei der Beladung) und (2) Durchströmungstrocknung aus der entgegengesetzten Richtung bzw. von der Beaufschlagungs-Abströmseite.	88
6.20	Vergleich der Salzmasse in zwei Filtern bestehend aus vier Lagen nach gleicher Beladung und Beaufschlagung mit Wassertropfen, aber Durchströmungstrocknung in und gegen Beladungsrichtung betrachtet für jede einzelne Lage aus Trocknungsrichtung.	88
7.1	Mit Silikonöl gemessene Porengrößenverteilung des Oberflächenfilters (Tabelle 4.3 Nr. 2) in seiner hydrophilen und hydrophoben Ausführung.	94
7.2	Differenzdruckverlauf eines hydrophilen und eines hydrophoben Filters während der Beladung, Beaufschlagung mit Wassertropfen und Durchströmungstrocknung. . .	95
7.3	Ergebnisse der gravimetrischen Analyse eines salzbeladenen hydrophilen und eines salzbeladenen hydrophoben Filtermediums.	97
7.4	REM-Aufnahmen der Anströmseite eines salzbeladenen Referenzfilters vor der Wasserbeaufschlagung und eines salzbeladenen hydrophilen und eines salzbeladenen hydrophoben Filters nach anschließender Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung.	97
7.5	Differenzdruckverläufe mit simultanen Endoskopaufnahmen der Anströmseite und Kameraaufnahmen der Abströmseite des salzbeladenen hydrophilen (oben) und salzbeladenen hydrophoben (unten) Filters.	98
7.6	Ergebnisse der Analyse der abströmseitigen Drainage eines salzbeladenen hydrophilen und eines salzbeladenen hydrophoben Filters ab Einsetzen der Drainage. Die Zeit $t = 0$ markiert den Start der Drainage.	99

7.7	Schematische Zeichnung der auftretenden Szenarien während der Beaufschlagung mit Wassertropfen salzbeladener Filter in Abhängigkeit ihrer Benetzbarkeit.	100
7.8	Vergleich der Differenzdruckverläufe mit eingezeichnetem Einsatz der abströmseitigen Drainage eines a) oleophilen Filters (schematisch nach dem Kanal-Film-Model) mit einem b) salzbeladenen hydrophilen Filter und eines c) oleophoben Filters (schematisch nach dem Kanal-Film-Modell) mit einem d) salzbeladenen hydrophoben Filter während der Beaufschlagung mit Öl- bzw. Wassertropfen.	101
7.9	Differenzdruckverlauf eines salzbeladenen und eines unbeladenen hydrophoben Filters während der Wasserbeaufschlagung mit eingezeichnetem Beginn der abströmseitigen Drainage. Die Zeit $t = 0$ markiert den Start der Wasserbeaufschlagung.	103
7.10	Ergebnisse der visuellen Beobachtung eines Ausschnittes des Filtermediums während des Betriebs, repräsentativ für hydrophobe beladene und unbeladene Filter: a) Endoskopaufnahmen der Anströmseite und b) Kameraaufnahmen der Abströmseite mit c) Differenzdruckverlauf.	104
7.11	a) Foto der Abströmseite eines unbeladenen hydrophoben Filters, repräsentativ für eine unveränderte Wasserbeaufschlagung über 6 h und b) Kameraaufnahmen der Abströmseite eines salzbeladenen hydrophoben Filters nach Beginn einer abströmseitigen Drainage mit c) Differenzdruckkurven.	104
7.12	Fotoreihe von einem Tropfen auf a) einem unbeladenen hydrophoben Filtermedium und b) einem salzbeladenen hydrophoben Filtermedium bei sich ändernder Neigung des Filtermediums.	105
7.13	Schematische Skizze der Beeinflussung der Salzbeladung auf die Benetzbarkeit einer strukturierten Oberfläche durch einen Vergleich eines Tropfen auf einer a) unbeladenen zu b) salzbeladenen strukturierten Oberflächen.	106
7.14	Differenzdruckverlauf eines salz- und glasbeladenen und eines salzbeladenen Filters mit eingezeichnetem Beginn einer abströmseitigen Drainage während der Beaufschlagung mit Wassertropfen und eines glasbeladenen und eines unbeladenen hydrophoben Filters ohne abströmseitige Drainage während der Beaufschlagung mit Wassertropfen.	107
8.1	Differenzdruckverlauf während der Beladung eines Tiefenfilters mit löslichem Salz, der Beaufschlagung mit Wassertropfen und der Durchströmungstrocknung.	114
8.2	Ergebnisse der gravimetrischen Analyse der abströmseitigen Drainage eines salzbeladenen Tiefenfilters a) drainierte Wassermenge pro Zeit und b) Sättigung der Drainage pro akkumulierter Drainagemenge. Die Zeit $t = 0$ markiert den Beginn der Drainage.	115
8.3	Ergebnisse der gravimetrischen Analyse von salzbeladenen Tiefenfiltern vor und nach Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung a) in absoluten Werten und b) als Anteil der abschließenden Gesamtbeladung.	116
8.4	Differenzdruckverlauf während der Beladung mit K_2SO_4 , der Wasserbeaufschlagung und der Durchströmungstrocknung der dreilagigen Tiefenfilter mit Mikroskopaufnahmen der Anströmseiten der Filterlagen eines mit K_2SO_4 -beladenen Tiefenfilters 1) vor Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung und 2) nach Wasserbeaufschlagung und Durchströmungstrocknung.	117

8.5	Salzmassenverteilung in einem dreilagigen Tiefenfilter nach Beladung und nach Beladung und Wasserbeaufschlagung mit entgegengesetzten Strömungsrichtungen während der anschließenden Durchströmungstrocknung.	118
8.6	Fotos der Abströmseite des Tiefenfilters während der Wasserbeaufschlagung.	118

Tabellenverzeichnis

4.1	Übersicht der verwendeten Salze mit ausgewählten Eigenschaften [88, 89, 90, 91].	24
4.2	Übersicht ausgewählter Stoffdaten von Wasser und relevanten gesättigten wässrigen Salzlösungen [91].	24
4.3	Übersicht der verwendeten Filtermedien mit ausgewählten Herstellerangaben.	25
6.1	Analyse der Drainage in absoluten Werten.	74
6.2	Hohlraumvolumen für Filter mit unterschiedlichen Beladungen.	79

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 16890-4:2020-04: Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Teil 4: Konditionierungsverfahren für die Ermittlung des Fraktionsabscheidegradminimums (2020).
- [2] DIN ISO 11057:2012-05: Emissionen aus stationären Quellen – Prüfverfahren für die Charakterisierung des Filtrationsverhaltens abreinigbarer Filtermedien (2012).
- [3] DIN EN ISO 16890-1:2017-08: Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem, basierend auf dem Feinstaubabscheidegrad (ePM) (2017).
- [4] Wilcox, M., Kurz, R. & Brun, K. Technology review of modern gas turbine inlet filtration systems. *International Journal of Rotating Machinery* 1–15 (2011).
- [5] Wilcox, M., Ransom, D. & Delgado-Garibay, H. Filter failure during high humidity conditions. In *American Society of Mechanical Engineers, Proceedings of ASME Turbo Expo, Glasgow, UK, 14.-18. Juni 2010*, 185–193.
- [6] Davies, C. N. *Air filtration* (Academic Press, London, New York, 1975), 2 edn.
- [7] Brown, R. C. *Air filtration: An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters* (Pergamon, Oxford, 1993), 1 edn.
- [8] Löffler, F. *Staubabscheiden*. Lehrbuchreihe Chemieingenieurwesen / Verfahrenstechnik (Thieme, Stuttgart, 1988).
- [9] Klingel, R. *Untersuchung der Partikelabscheidung aus Gasen an einem Schlauchfilter mit Druckstoßabreinigung* (VDI-Verlag, Düsseldorf, 1983).
- [10] Löffler, F. Die Abscheidung von Partikeln aus Gasen in Faserfiltern. *Chemie Ingenieur Technik* **52**, 312–323 (1980).
- [11] Löffler, F., Dietrich, H. & Flatt, W. *Staubabscheidung mit Schlauchfiltern und Taschenfiltern* (Vieweg+Teubner Verlag, 1991), 2 edn.
- [12] Schmidt, E. *Abscheidung von Partikeln aus Gasen mit Oberflächenfiltern*, vol. 546 of *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 3* (VDI Verlag, Düsseldorf, 1998).
- [13] Saleem, M. & Krammer, G. On the stability of pulse-jet regenerated-bag filter operation. *Chemical Engineering & Technology* **35**, 877–884 (2012).

- [14] Leubner, H. & Riebel, U. Druckstoßabreinigung textiler und starrer Filtermedien: Abreinigungsrelevante Parameter. *Chemie Ingenieur Technik* **75**, 504–514 (2003).
- [15] Duo, W., Kirkby, N. F., Seville, J. & Clift, R. Patchy cleaning of rigid gas filters - I. A probabilistic model. *Chemical Engineering Science* **52**, 141–151 (1997).
- [16] Dittler, A. *et al.* Patchy cleaning of rigid gas filters—transient regeneration phenomenon—a comparison of modelling to experiment. *Powder technology* 55–66 (2001).
- [17] Dittler, A. *Gasreinigung mit starren Oberflächenfiltern - Erscheinungsformen und Auswirkungen unvollständiger Filterregenerierung*. Berichte aus der Verfahrenstechnik (Shaker, Aachen, 2001).
- [18] Binnig, J. *Das Emissionsverhalten von abreinigbaren Filtermedien* (Dr. Hut Verlag, München, 2011).
- [19] Gupta, A., Novick, V. J., Biswas, P. & Monson, P. R. Effect of humidity and particle hygroscopicity on the mass loading capacity of high efficiency particulate air (HEPA) filters. *Aerosol Science and Technology* **19**, 94–107 (1993).
- [20] Joubert, A., Laborde, J. C., Bouilloux, L., Callé-Chazelet, S. & Thomas, D. Influence of humidity on clogging of flat and pleated HEPA filters. *Aerosol Science and Technology* **44**, 1065–1076 (2010).
- [21] Joubert, A., Laborde, J. C., Bouilloux, L., Chazelet, S. & Thomas, D. Modelling the pressure drop across HEPA filters during cake filtration in the presence of humidity. *Chemical Engineering Journal* **166**, 616–623 (2011).
- [22] Montgomery, J. F., Green, S. I. & Rogak, S. N. Impact of relative humidity on HVAC filters loaded with hygroscopic and non-hygroscopic particles. *Aerosol Science and Technology* **49**, 322–331 (2015).
- [23] Miguel, A. Effect of air humidity on the evolution of permeability and performance of a fibrous filter during loading with hygroscopic and non-hygroscopic particles. *Journal of Aerosol Science* **34**, 783–799 (2003).
- [24] Pei, C., Ou, Q. & Pui, D. Y. Effect of relative humidity on loading characteristics of cellulose filter media by submicrometer potassium chloride, ammonium sulfate, and ammonium nitrate particles. *Separation and Purification Technology* **212**, 75–83 (2019).
- [25] Pei, C., Ou, Q. & Pui, D. Y. Effects of temperature and relative humidity on laboratory air filter loading test by hygroscopic salts. *Separation and Purification Technology* **255**, 117679 (2021).
- [26] Horst, D., Zhang, Q. & Schmidt, E. Deliquescence and efflorescence of hygroscopic salt particles in dust cakes on surface filters. *Chemical Engineering & Technology* **42**, 2348–2357 (2019).

- [27] Tang, I. N. & Munkelwitz, H. R. Composition and temperature dependence of the deliquescence properties of hygroscopic aerosols. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics* **27**, 467–473 (1993).
- [28] Tang, I. N. & Munkelwitz, H. R. Aerosol phase transformation and growth in the atmosphere. *Journal of Applied Meteorology* **33**, 791–796 (1994).
- [29] Montgomery, J. F., Rogak, S. N., Green, S. I., You, Y. & Bertram, A. K. Structural change of aerosol particle aggregates with exposure to elevated relative humidity. *Environmental Science & Technology* **49**, 12054–12061 (2015).
- [30] Pei, C., Ou, Q., Yu, T. & Pui, D. Loading characteristics of nanofiber coated air intake filter media by potassium chloride, ammonium sulfate, and ammonium nitrate fine particles and the comparison with conventional cellulose filter media. *Separation and Purification Technology* (2019).
- [31] Butt, H.-J. & Kappl, M. Normal capillary forces. *Advances in colloid and interface science* **146**, 48–60 (2009).
- [32] Ribeyre, Q., Charvet, A., Vallières, C. & Thomas, D. Impact of relative humidity on a nanostructured filter cake - Experimental and modelling approaches. *Chemical Engineering Science* **161**, 109–116 (2017).
- [33] Schmidt, F., Breidenbach, A. & Suhartiningsih, S. Der Druckverlust von Luftfiltern bei hohen relativen Feuchten und bei Beaufschlagung mit Wassertröpfchen. *F&S Filtrieren und Separieren* **27** (2013).
- [34] König, C., Schmidt, F. & Engelke, T. Effizienz von Luftfiltern bei hohen relativen Feuchten und Beaufschlagung mit Wassertröpfchen. *Chemie Ingenieur Technik* **90**, 1005–1010 (2018).
- [35] Zhang, Q. Influence of an added fraction of hygroscopic salt particles on the operating behavior of surface filters for dust separation. *Chemical Engineering & Technology* **41**, 90–95 (2018).
- [36] Horst, D., Zhang, Q. & Schmidt, E. Deliquescenz und Effloreszenz hygroskopischer Salzpartikeln in Partikel-Wand- und Partikel-Partikel-Kontakten. *Chemie Ingenieur Technik* **91**, 46–54 (2018).
- [37] Agranovski, I. E. *et al.* Study of wet porous filtration. *Separation and Purification Technology* **30**, 129–137 (2003).
- [38] Sher, E., Haim, L. F. & Sher, I. Off-centered impact of water droplets on a thin horizontal wire. *International Journal of Multiphase Flow* **54**, 55–60 (2013).
- [39] Agranovski, I. E. & Braddock, R. D. Filtration of liquid aerosols on wettable fibrous filters. *AIChE Journal* **44**, 2775–2783 (1998).

- [40] Agranovski, I. E. & Braddock, R. D. Filtration of liquid aerosols on nonwetable fibrous filters. *AIChE Journal* **44**, 2784–2790 (1998).
- [41] Wenzel, R. N. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry* **28**, 988–994 (1936).
- [42] Cassie, A. B. D. & Baxter, S. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society* **40**, 546 (1944).
- [43] DIN EN ISO 14419:2010-08: Textilien - Oleophobie - Prüfung der Ölbeständigkeit mit Hilfe von Kohlenwasserstoffen (2010).
- [44] Mullins, B. J., Mead-Hunter, R., Pitta, R. N., Kasper, G. & Heikamp, W. Comparative performance of philic and phobic oil-mist filters. *AIChE Journal* **60**, 2976–2984 (2014).
- [45] Kampa, D., Wurster, S., Buzengeiger, J., Meyer, J. & Kasper, G. Pressure drop and liquid transport through coalescence filter media used for oil mist filtration. *International Journal of Multiphase Flow* **58**, 313–324 (2014).
- [46] Kampa, D., Wurster, S., Meyer, J. & Kasper, G. Validation of a new phenomenological “jump-and-channel” model for the wet pressure drop of oil mist filters. *Chemical Engineering Science* **122**, 150–160 (2015).
- [47] Kampa, D. *Filtration von Ölnebel* (Cuvillier, Göttingen, 2014).
- [48] Kolb, E. *Transitional phenomena in oil mist filtration* (Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2022).
- [49] Penner, T., Meyer, J., Kasper, G. & Dittler, A. Impact of operating conditions on the evolution of droplet penetration in oil mist filters. *Separation and Purification Technology* **211**, 697–703 (2019).
- [50] Ranz, W. E. & Katz, E. J. Determining impaction efficiencies of mist collection equipment. *Journal of the Air Pollution Control Association* **8**, 328–332 (1959).
- [51] Calvert, S., Jashnani, I. L. & Yung, S. Entrainment separators for scrubbers. *Journal of the Air Pollution Control Association* **24**, 971–975 (1974).
- [52] Liew, T. P. & Conder, J. R. Fine mist filtration by wet filters - I. Liquid saturation and flow resistance of fibrous filters. *Journal of Aerosol Science* **16**, 497–509 (1985).
- [53] Cooper, E. R., Jankowski, D. F., Neitzel, G. P. & Squire, T. H. Experiments on the onset of instability in unsteady circular Couette flow. *Journal of Fluid Mechanics* **161**, 97 (1985).
- [54] Stone, H. A. Dynamics of drop deformation and breakup in viscous fluids. *Annual Review of Fluid Mechanics* **26**, 65–102 (1994).

- [55] El-Dessouky, H. T., Alatiqi, I. M., Ettouney, H. M. & Al-Deffeeri, N. S. Performance of wire mesh mist eliminator. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* **39**, 129–139 (2000).
- [56] Wurster, S., Meyer, J., Kolb, H. E. & Kasper, G. Bubbling vs. blow-off - On the relevant mechanism(s) of drop entrainment from oil mist filter media. *Separation and Purification Technology* **152**, 70–79 (2015).
- [57] Hotz, C. J. *et al.* Detachment of droplets from cylinders in flow using an experimental analogue. *Journal of Fluid Mechanics* **771**, 327–340 (2015).
- [58] Joseph, A. F. Fibre bed mist eliminators. *Filtration & Separation* 40–42 (1984).
- [59] Wurster, S. *Entrainment von Öltröpfen an der Rückwand eines Faserfilters* (Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017).
- [60] Moore, D. J. & Mason, B. J. The concentration, size distribution and production rate of large salt nuclei over the oceans. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **80**, 583–590 (1954).
- [61] Resch, F. J., Darrozes, J. S. & Afeti, G. M. Marine liquid aerosol production from bursting of air bubbles. *Journal of Geophysical Research* **91**, 1019 (1986).
- [62] Wu, J. Film drops produced by air bubbles bursting at the surface of seawater. *Journal of Geophysical Research* **99**, 16403 (1994).
- [63] Afeti, G. M. & Resch, F. J. Distribution of the liquid aerosol produced from bursting bubbles in sea and distilled water. *Tellus B* **42**, 378–384 (1990).
- [64] Lewis, E. R. & Schwartz, S. E. *Sea salt aerosol production: Mechanisms, methods, measurements and models : a critical review*, vol. 152 of *Geophysical monograph* (American Geophysical Union, Washington, DC, 2004).
- [65] Wurster, S. *et al.* Measurement of oil entrainment rates and drop size spectra from coalescence filter media. *Chemical Engineering Science* **132**, 72–80 (2015).
- [66] Bredin, A., O’Leary, R. A. & Mullins, B. J. Filtration of soot-in-oil aerosols: Why do field and laboratory experiments differ? *Separation and Purification Technology* **96**, 107–116 (2012).
- [67] Li, J., Zhou, F. & Li, S. Experimental study on the dust filtration performance with participation of water mist. *Process Safety and Environmental Protection* **109**, 357–364 (2017).
- [68] Gac, J. M., Jackiewicz, A., Werner, Ł. & Jakubiak, S. Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters. *Separation and Purification Technology* **170**, 234–240 (2016).

- [69] Bermúdez, V., Serrano, J. R., Piqueras, P. & García-Afonso, O. Pre-DPF water injection technique for pressure drop control in loaded wall-flow diesel particulate filters. *Applied Energy* **140**, 234–245 (2015).
- [70] Bakker, H. J. Structural dynamics of aqueous salt solutions. *Chemical reviews* **108**, 1456–1473 (2008).
- [71] Baerns, M. *et al. Technische Chemie* (Wiley-VCH, Weinheim, 2014), 2. auflage edn.
- [72] Hofmann, G. (ed.) *Kristallisation in der industriellen Praxis* (Wiley-VCH, Weinheim, 2005).
- [73] Mersmann, A., Stichlmair, J. & Kind, M. *Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Methoden*. Chemische Technik/Verfahrenstechnik (Springer, Berlin, 2005), 2., wesentlich erweiterte and aktualisierte auflage edn.
- [74] Lacmann, R., Herden, A. & Mayer, C. Kinetics of nucleation and crystal growth. *Chemical Engineering & Technology* **22**, 279–289 (1999).
- [75] Kind, M. Industrielle Kristallisation. *Chemie Ingenieur Technik* **75**, 1487–1490 (2003).
- [76] Brochard, F. Spreading of liquid drops on thin cylinders: The “manchon/droplet” transition. *The Journal of Chemical Physics* **84**, 4664–4672 (1986).
- [77] Shaw, T. M. Drying as an immiscible displacement process with fluid counterflow. *Physical Review Letters* **59**, 1671–1675 (1987).
- [78] van Brakel, J. Pore space models for transport phenomena in porous media review and evaluation with special emphasis on capillary liquid transport. *Powder technology* **11**, 205–236 (1975).
- [79] Scherer, G. W. Theory of drying. *Journal of the American Ceramic Society* **73**, 3–14 (1990).
- [80] Or, D., Lehmann, P., Shahraneeni, E. & Shokri, N. Advances in soil evaporation physics-a review. *Vadose Zone Journal* **12**, vzj2012.0163 (2013).
- [81] Shokri, N. & Sahimi, M. Structure of drying fronts in three-dimensional porous media. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* **85**, 066312 (2012).
- [82] Lehmann, P., Assouline, S. & Or, D. Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* **77**, 056309 (2008).
- [83] Shokri, N., Lehmann, P. & Or, D. Critical evaluation of enhancement factors for vapor transport through unsaturated porous media. *Water Resources Research* **45** (2009).
- [84] Rahimi, A. Discrete modeling of drying induced ion transport and crystallization in porous media.

- [85] Shokri, N., Lehmann, P. & Or, D. Liquid-phase continuity and solute concentration dynamics during evaporation from porous media: pore-scale processes near vaporization surface. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* **81**, 046308 (2010).
- [86] Norouzi Rad, M., Shokri, N. & Sahimi, M. Pore-scale dynamics of salt precipitation in drying porous media. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* **88**, 032404 (2013).
- [87] Rad, M. N., Shokri, N., Keshmiri, A. & Withers, P. J. Effects of grain and pore size on salt precipitation during evaporation from porous media. *Transport in Porous Media* **110**, 281–294 (2015).
- [88] Li, X., Gupta, D., Eom, H.-J., Kim, H. & Ro, C.-U. Deliquescence and efflorescence behavior of individual NaCl and KCl mixture aerosol particles. *Atmospheric Environment* **82**, 36–43 (2014).
- [89] Freney, E. J., Martin, S. T. & Buseck, P. R. Deliquescence and efflorescence of potassium salts relevant to biomass-burning aerosol particles. *Aerosol Science and Technology* **43**, 799–807 (2009).
- [90] Archer, D. G. & Kirklin, D. R. Enthalpies of solution of sodium chloride and potassium sulfate in water. thermodynamic properties of the potassium sulfate + water system. *Journal of Chemical & Engineering Data* **47**, 33–46 (2002).
- [91] Haynes, W. M. (ed.) *CRC handbook of chemistry and physics* (CRC Press, an imprint of Taylor and Francis, Boca Raton, FL, 2014), 95th ed. edn. URL <https://permalink.obvsg.at/>.
- [92] Steiger, M., Charola, A. E. & Sterflinger, K. Weathering and deterioration. In Siegesmund, S. & Snelthage, R. (eds.) *Stone in architecture*, 227–316 (Springer, Berlin and Heidelberg, 2011).
- [93] Davies, J. F., Haddrell, A. E., Miles, R. E. H., Bull, C. R. & Reid, J. P. Bulk, surface, and gas-phase limited water transport in aerosol. *The journal of physical chemistry. A* **116**, 10987–10998 (2012).
- [94] Potter Industries Inc. Datenblatt: Spherglass 5000 Ref: 3-03-006-3-01 (2017).
- [95] Geneva Leopold, H. & Johnston, J. The vapor pressure of the saturated aqueous solutions of certain salts. *Journal of the American Chemical Society* **49**, 1974–1988 (1927).
- [96] Erbe, F. Die Bestimmung der Porenverteilung nach ihrer Größe in Filtern und Ultrafiltern. *Kolloid-Zeitschrift* **63**, 277–285 (1933).
- [97] Penner, T. *Einfluss von Filtermedieneigenschaften auf das Betriebsverhalten von Koaleszenzfiltern* (Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2023).
- [98] Födisch, H., Dietrich, G. & Sauer, A. *Staubmesstechnik: aus: Gasmesstechnik in Theorie und Praxis, Kapitel 13* (Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2016).

- [99] Baehr, H. D. & Kabelac, S. *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*. Springer-Lehrbuch (Springer Vieweg, Berlin and Heidelberg, 2012), 15 edn.
- [100] Hinds, W. C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles* (Wiley-Interscience, New York, 1999), 2 edn.
- [101] Still, M. *Temperaturmessungen und Analyse von Wärme- und Stofftransportvorgängen bei verdunstenden Tropfen* (Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2017).
- [102] Sutter, B., Bémer, D., Appert-Collin, J.-C., Thomas, D. & Midoux, N. Evaporation of liquid semi-volatile aerosols collected on fibrous filters. *Aerosol Science and Technology* **44**, 395–404 (2010).
- [103] Funk, C. S., Winzer, B. & Peukert, W. Correlation between shape, evaporation mode and mobility of small water droplets on nanorough fibres. *Journal of colloid and interface science* **417**, 171–179 (2014).
- [104] Ho, S. T. & Hutmacher, D. W. A comparison of micro CT with other techniques used in the characterization of scaffolds. *Biomaterials* **27**, 1362–1376 (2006). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961205007957>.
- [105] Schwarz, A. D., Meyer, J. & Dittler, A. Interaction of water droplets with soluble filter cakes in gas cleaning applications. *Separation and Purification Technology* **259**, 118–128 (2021).
- [106] Pei, C. *Effects of temperature and relative humidity on filter loading by simulated atmospheric aerosols & COVID-19 related mask and respirator filtration study* (University of Minnesota ProQuest Dissertations Publishing, 2020).
- [107] Thundat, T., Zheng, X.-Y., Chen, G. Y. & Warmack, R. J. Role of relative humidity in atomic force microscopy imaging. *Surface Science* **294**, L939–L943 (1993). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003960289390152A>.
- [108] Schwarz, A. D., Meyer, J. & Dittler, A. Penetration of water-soluble material through gas-cleaning filters. *Membranes* **12**, 776 (2022).
- [109] Schwarz, A. D. *et al.* Auswirkungen eines erhöhten Wassergehalts auf lösliche Staubkuchenbestandteile in der Oberflächenfiltration – Teil 1: Theoretische Betrachtungen. *Chemie Ingenieur Technik* **94**, 1160–1167 (2022).
- [110] Schwarz, A. D. *et al.* Auswirkungen eines erhöhten Wassergehalts auf lösliche Staubkuchenbestandteile in der Oberflächenfiltration – Teil 2: Experimentelle Untersuchungen. *Chemie Ingenieur Technik* **94**, 1168–1176 (2022).
- [111] Kolb, H. E. & Kasper, G. Mist filters: How steady is their “steady state”? *Chemical Engineering Science* 118–127 (2019).

- [112] Schubert, H. *Kapillarität in porösen Feststoffsystemen* (Springer, Berlin, 1982).
URL http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc_library=BVB01&doc_number=001412137&line_number=0002&func_code=DB_RECORDS&service_type=MEDIA.
- [113] Cerman, Z. *Superhydrophobie und Selbstreinigung: Wirkungsweise, Effizienz und Grenzen bei der Abwehr von Mikroorganismen* (Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2007).
- [114] Barthlott, W., Cerman, Z. & Stosch, A. K. Der Lotus-Effekt: Selbstreinigende Oberflächen und ihre Übertragung in die Technik. *Biologie in unserer Zeit* **34**, 290–296 (2004).
- [115] Penner, T., Heikamp, W., Meyer, J. & Dittler, A. Einfluss ausgewählter Medienstrukturparameter auf das Betriebsverhalten von Ölnebelnfiltern. *Chemie Ingenieur Technik* **91**, 1615–1622 (2019).
- [116] Bico, J., Thiele, U. & Quéré, D. Wetting of textured surfaces. *Colloids and Surfaces* **206**, 41–46 (2002).
- [117] Marmur, A. Wetting on hydrophobic rough surfaces: To be heterogeneous or not to be? *Langmuir* **19**, 8343–8348 (2003).
- [118] Ren, S., Yang, S., Zhao, Y.-P., Xiao, X. & Yu, T. Morphology correlation to the superhydrophobicity in an organic thin film on rough al. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation* **3** (2002).
- [119] Lee, K., Jung, S., Lee, J., Seo, D. & Kim, J. Probing the nanoparticle loading characteristics and the filtration performance with the continuous and intermittent use of disposable filtering masks. *ACS Applied Nano Materials* **4**, 2167–2174 (2021).
- [120] Schwarz, A. D. *et al.* Humidity considerations in filter testing based on analysis of filters from gas turbine applications. *Chemical Engineering & Technology* **19**, 94 (2021).
- [121] Patel, S. U. & Chase, G. G. Gravity orientation and woven drainage structures in coalescing filters. *Separation and Purification Technology* **75**, 392–401 (2010).

Veröffentlichungen

Diese Arbeit wurde zum Großteil während der Anstellung der Autorin am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik des KIT angefertigt. In dieser Zeit hat die Autorin eine Reihe von Forschungsergebnissen in Journalen mit Peer-Review veröffentlicht und auf nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt. Diese Beiträge sind im Folgenden aufgelistet.

Journalartikel

1. Schwarz, A. D., Meyer, J., Dittler, A., Penetration of water-soluble material through gas-cleaning filters, *Membranes*, vol. 12, no. 8, p. 776, (2022), <https://doi.org/10.3390/membranes12080776>
2. Lacerda, C. R., Bächler, P., Schwarz, A. D., Sartim, R., Aguiar, M. L., Dittler, A., Impact of seams on the operating behavior of surface filters regarding particle emissions, *Chemical Engineering & Technology*, vol. 45, no. 7, pp. 1354–1362, (2022), <https://doi.org/10.1002/ceat.202200132>
3. Schwarz, A. D., Horst, D., Meyer, J., Zhang, Q., Dittler, A., Schmidt, E., Auswirkungen eines erhöhten Wassergehalts auf lösliche Staubkuchenbestandteile in der Oberflächenfiltration – Teil 2: Experimentelle Untersuchungen, *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 94, no. 8, pp. 1168–1176, (2022), <https://doi.org/10.1002/cite.202100213>
4. Schwarz, A. D., Horst, D., Meyer, J., Zhang, Q., Dittler, A., Schmidt, E., Auswirkungen eines erhöhten Wassergehalts auf lösliche Staubkuchenbestandteile in der Oberflächenfiltration – Teil 1: Theoretische Betrachtungen, *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 94, no. 8, pp. 1160–1167, (2022), <https://doi.org/10.1002/cite.202100158>
5. Schwarz, A. D., Dutzi, J., Weber, P., Sattler, C., Schulz, K., Caesar, T., Meyer, J., Dittler, A., Humidity considerations in filter testing based on analysis of filters from gas turbine applications, *Chemical Engineering & Technology*, vol. 45, no. 1, pp. 43–50, (2022), <https://doi.org/10.1002/ceat.202100344> **Top Downloaded Article**
6. Schwarz, A. D., Meyer, J., Dittler, A., Interaction of water droplets with soluble filter cakes in gas cleaning applications, *Separation and Purification Technology*, vol. 259, p. 118-128, (2021), <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118128>

7. Schwarz, A. D., König, L., Meyer, J., Dittler, A., Impact of water droplet and humidity interaction with soluble particles on the operational performance of surface filters in gas cleaning applications, *Journal of Aerosol Science*, vol. 142, p. 105523, (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105523>
8. Schwarz, A. D., Meyer, J., Dittler, A., Opportunities for low-cost particulate matter sensors in filter emission measurements, *Chemical Engineering & Technology*, vol. 41, no. 9, pp. 1826–1832, (2018), <https://doi.org/10.1002/ceat.201800209>

Konferenzbeiträge

1. Schwarz, A. D., Meyer, J., Dittler, A., Transport mechanisms of water-soluble Particulate matter through gas cleaning filters, 13th World Filtration Congress, 05.-09. Oktober 2022, San Diego, USA (Talk)
2. Schwarz, A. D., Meyer, J., Dittler, A., The influence of wettability on the penetration of soluble particles through gas cleaning filters, 11th International Aerosol Conference IAC 2022, 04.-09. September 2022, Athens, Greece (Talk)
3. Schwarz, A. D., Meyer, J., Dittler, A., Penetration of soluble material through surface filters due to exposure to water mist – Impact of the filter material wettability, FILTECH 2022, 08.-10. März 2022, Köln, Deutschland (Talk)
4. Schwarz, A. D., Meyer, J., Dittler, A., Penetration of water-soluble particulate matter through gas cleaning filters, European Aerosol Conference EAC 2021, 30. August – 03. September 2021, Online (Talk)
5. Schwarz, A. D., Mehlmann, W., Meyer, J., Dittler, A., Materialtransport durch Oberflächenfilter bei der Gasreinigung - Untersuchung der Penetration von löslichen Salzen durch Oberflächenfilter mittels gravimetrischer und optischer Messmethoden, Jahrestreffen der ProcessNet Fachgruppen Gasreinigung und Partikelmesstechnik, 18.-19. Februar 2021, Online (Poster) **Posterpreis**
6. Schwarz, A. D., Meyer, J., Dittler, A., A comparative investigation of soluble filter cakes upon contact with liquid droplets, FILTECH 2019, 22.-24. Oktober 2019, Köln, Deutschland (Poster)
7. Schwarz, A. D., König, L., Meyer, J., Dittler, A., Effects of solubility-behavior of salt particles during surface filtration, PARTEC 2019, 09.-11. April 2019, Nürnberg, Deutschland (Poster)
8. Bächler, P., Schwarz, A. D., Meyer, J., Dittler, A., Innovative Ansätze zur Verwendung von Low-Cost PM-Messtechnik: Neuartige Möglichkeiten der Emissionsbestimmung von Oberflächenfiltern bei der Gasreinigung, Jahrestreffen der ProcessNet Fachgruppen Mechanische Flüssigkeitsabtrennung und Gasreinigung, 14.-15. März 2019, Bamberg, Deutschland

9. Budde, M., Schwarz, A. D., Müller, T., Laquai, B., Streibl, N., Schindler, G., Köpke, M., Riedel, T., Dittler, A., Beigl, M., Potential and limitations of the low-cost SDS011 particle sensor for monitoring urban air quality, 3rd International Conference on Atmospheric Dust – DUST2018, 29.-31. Mai 2018, Bari, Italy
10. Budde, M., Müller, T., Laquai, B., Streibl, N., Schwarz, A. D., Schindler, G., Riedel, T., Beigl, M., Dittler, A., Suitability of the low-cost SDS011 particle sensor for urban PM monitoring, 3rd International Conference on Atmospheric Dust – DUST2018, 29.-31. Mai 2018, Bari, Italy
11. Budde, M., Schwarz, A. D., Müller, T., Laquai, B., Streibl, N., Schindler, G., Köpke, M., Riedel, T., Dittler, A., Beigl, M., Potenzial und Grenzen des kostengünstigen SDS011 Partikelsensors bei der Überwachung urbaner Luftqualität, 48. Jahrestagung der Gesellschaft für Umweltsimulation, 27.-29. März 2019, Stutensee Deutschland

Betreute Abschlussarbeiten

Diese Arbeit wurde zum Großteil während der Anstellung der Autorin am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik des KIT angefertigt. Im Rahmen ihrer Projekte wurden eine Reihe von studentischen Abschlussarbeiten angefertigt, die im Folgenden aufgelistet sind.

1. J. Dutzi, Standzeitabschätzung bei mehrstufigen Tiefenfiltersystemen in der Gasturbinenzuluft. *Bachelorarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2020.
2. S. Glöckle, Identifikation von Anforderungen an einen Filterprüfstand zur Untersuchung der Penetration von Salzpartikeln und Wassertropfen durch Oberflächenfilter. *Bachelorarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2018.
3. K. Golenhofen, Betrachtung des Feuchteinflusses auf die Filtration von Salzen am neuen Prüfstand MFP 3000 HF. *Bachelorarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2020.
4. S. Kochendörfer, Penetrationsmechanismen von löslichen-unlöslichen Partikelmischungen durch Oberflächenfilter in der Gasreinigung. *Masterarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2021.
5. L. König, Gezielte Konditionierung von Filtermedien mit Salzpartikeln und Wasser für eine visuelle Auswertung. *Bachelorarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2019.
6. K. Martin, Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen von Low-Cost PM-Sensoren zur kontinuierlichen Emissionsüberwachung von Oberflächenfiltern. *Masterarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2018.
7. M. Martin, Zum Einfluss der Wechselwirkung von Wassertropfen und Filterkuchen auf den Fraktionsabscheidegrad von Oberflächenfiltern in der Gas-Partikel-Trenntechnik. *Bachelorarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2021.
8. W. Mehlmann, Materialtransport durch Oberflächenfilter bei der Gasreinigung - Untersuchung der Penetration von löslichen Salzen durch Oberflächenfilter mittels gravimetrischer und optischer Messmethoden. *Masterarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2021.
9. V. Reiter, Gezielte Konditionierung von Oberflächenfiltern zur nachweislichen Penetration von Salzpartikeln durch Beaufschlagung mit Wasser. *Masterarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2019.

10. J. Sauer, Inbetriebnahme eines neuen Filterprüfstandes und Prüfung von messmethoden zur Eignung für die Untersuchung der Penetration von löslichen Partikeln durch Filtermedien. *Masterarbeit*, Karlsruher Institut für Technologie, 2018.