

Einfluss von Filtermedieneigenschaften auf das Betriebsverhalten von Koaleszenzfiltern

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

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

genehmigte

DISSERTATION

von

Thomas Penner
aus Bad Friedrichshall

Tag der mündlichen Prüfung: 13.12.2022
Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittler
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung -
Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz
(CC BY-NC-ND 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	2
1.2	Überblick zum bisherigen Wissensstand	5
2	Materialien und experimentelle Vorgehensweise	13
2.1	Herstellung und Modifikation nichtgewebter textiler Filtermedien	14
2.2	Übersicht verwendeter Filtermedien	15
2.3	Versuchsaufbau und -durchführung	17
2.3.1	Aufbau des Filtermedienprüfstands	17
2.3.2	Durchführung und Auswertung der Versuche	22
3	Evaluierung von Charakterisierungsmethoden	25
3.1	Charakterisierungsmethoden für Glasfasermedien	26
3.1.1	Bestimmung mikroskaliger Medienparameter	26
3.1.2	Bestimmung meso- und makroskaliger Medienparameter	34
4	Einfluss von Medienstruktur und -benetzbarkeit auf das Betriebsverhalten	45
4.1	Einfluss mikroskaliger Strukturgrößen auf das Betriebsverhalten	46
4.1.1	Feinstfaseranteil	46
4.1.2	Porengrößenverteilung	48
4.2	Einfluss meso- und makroskaliger Strukturgrößen auf das Betriebsverhalten	50
4.2.1	Benetzbarkeit	50
4.2.2	Medienhomogenität	54
4.2.3	Lagen mit innerer Strukturphasengrenze	64
5	Einsatz von Medien in der Filterauslegung	67
5.1	Betriebsverhalten beim Einsatz einer einzigen Lage	68
5.2	Betriebsverhalten beim Einsatz mehrerer Lagen gleicher Medien	71

5.3	Kombination mehrerer Lagen unterschiedlicher Struktur und Benetzbarkeit	76
5.3.1	Einfluss der Kombination von unterschiedlich strukturierten Medien gleicher Benetzbarkeit auf das Betriebsverhalten	76
5.3.2	Einfluss der Kombination von unterschiedlich strukturierten Medien unterschiedlicher Benetzbarkeit auf das Betriebsverhalten	80
5.4	Einfluss abströmseitiger Stützgitter auf das Betriebsverhalten .	88
5.4.1	Einfluss von Stützgittergeometrien bei oleophilen Filtern	90
5.4.2	Einfluss von Stützgittergeometrien bei oleophoben Filtern	96
5.5	Einfluss von Filterangeschwindigkeit und Ölbeladungsrate . .	99
6	Schlussfolgerungen für die Medienauslegung	105
7	Zusammenfassung	111
8	Summary	115
	Literatur	119
	Abbildungsverzeichnis	127

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Abscheidung feinsten Öltröpfchen aus einer Gasphase ist in zahlreichen Anwendungen ein wesentlicher Prozessschritt zur Vermeidung von ungewollten Emissionen und zum Schutz von Bauteilen in technischen Systemen. Öl- und Emulsionsnebel entstehen etwa bei spanenden Metallbearbeitungsverfahren und Umformungsprozessen mit Kühlschmierstoffen, bei welchen sie für beteiligte Personen ein Gesundheitsrisiko darstellen können [52][39][63] und werden dort in der Regel mit grob strukturierten filternden Abscheidern entfernt [47]. Eine weitere gängige, verbreitete Anwendung für Ölnebelabscheider ist die Kurbelgehäuseentlüftung bei Verbrennungsmotoren [44]. Hier gelangen als Folge von Undichtigkeiten am Kolbenring Gasströme aus der Brennkammer in das Kurbelgehäuse. Diese Blow-by-Gase werden in der Regel in die Reinseite der Motorluftansaugung vor dem Turbolader wieder eingeleitet. Werden die darin enthaltenen Öltröpfchen nicht oder nicht vollständig abgeschieden, kann dies zu einer Reihe von Problemen, wie der Verkokung des Verdichters oder der Verschmutzung des Luftmassenansaugmessers führen. Die Tropfen werden daher vor der Einleitung vor dem Turbolader mit Prallplatten, Zyklonen oder filternden Abscheidern mit grob strukturierten synthetischen und metallischen Vliesen oder Drahtgestrieken aus dem Gasstrom entfernt [71].

Eine der am weitesten verbreiteten Anwendungen von Ölnebelabscheidern ist die Abscheidung von Ölnebel mittels filternder Abscheider in der Druckluftentölung. Bei der Druckluftherzeugung mit ölgeschmierten Schraubenkompressoren wird Öl zur Schmierung, Kühlung und zum Dichten des Volumens zwischen den Verdichterschrauben eingespritzt. Ein Teil des eingespritzten Öls wird dabei zu feinsten, gasgetragenen Tröpfchen dispergiert und gelangt so in die Druckluft. Grobe Tropfen werden in der Regel zunächst mit einem Trägheitsvorabscheider abgetrennt, auf welchen ein Koaleszenzfilter folgt. Je nach geforderter Reinheit der Druckluft (festgelegt beispielsweise nach ISO 8573-1:2010 [34]) können weitere Filter nachgeschaltet sein. Die dabei eingesetzten Filterelemente bestehen typischerweise aus mehreren Lagen eines Filtermediums, welche um ein zylindrisches Stützgitter gewickelt werden (siehe Abbildung 1.1). Die eingesetzten Filtermaterialien sind hierbei vorwiegend nichtgewebte Faservliese aus Glasfaser, welche deutlich feiner strukturiert sind als die zuvor genannten Filtervliese, welche beispielsweise in der Kurbelgehäuseentlüftung Anwendung finden. Während klassische Tiefen- und Oberflächenfilter heute systematisch und anwendungsbezogen ausgelegt werden, ist in der Koaleszenzfiltration relativ wenig über den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften der eingesetzten

Filtermedien und den Betriebseigenschaften der Filter bekannt. Hierbei sind insbesondere Abscheidegrad und Druckverlust der Filter, bzw. der Differenzdruck über den Filtermedien, von Interesse. Bei der Auslegung von Koaleszenzfiltern greifen die Filterhersteller dementsprechend auf eigene Erfahrungswerte zur Optimierung von Druckverlust und Abscheidegrad zurück.

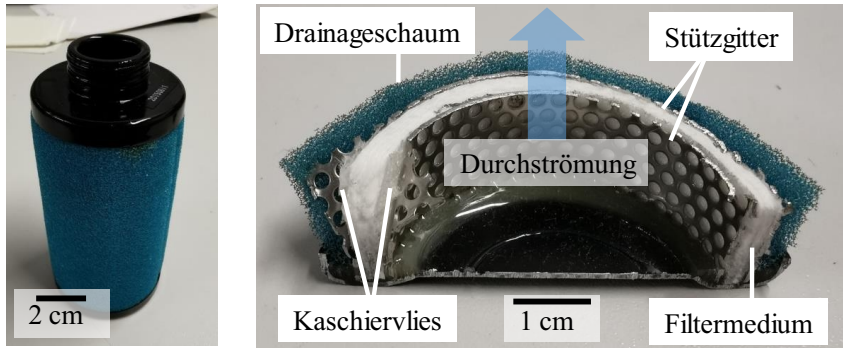


Abbildung 1.1: Aufbau eines Filterelements zur Druckluftentölung (Durchströmung von innen nach außen): Links: Ganzes Element, rechts: Schnitt durch Element. Mehrere Lagen Glasfasermaterial zwischen zwei Lochblechen und Drainageschaum an Außenseite.

Anders als Staubfilter befinden sich Ölnebelfilter nach einer anfänglichen Beladungsphase den größten Teil ihrer Lebenszeit in einer Art stationärem Zustand, in dem sich die Betriebseigenschaften bei weiterer Ölbeladung nicht mehr wesentlich ändern. Die Sättigung und lokale Verteilung des Öls innerhalb des Filtermediums, welche entscheidend für die Betriebseigenschaften der Filter im stationären Zustand sind, werden jedoch im Wesentlichen von den Vorgängen während der anfänglichen Beladungsphase der Filter bestimmt. Das Verständnis, wie die Abscheidung und der Transport des Öls von den Struktureigenschaften der Filtermedien und von der Kombination von Lagen unterschiedlicher Eigenschaften in der Filterauslegung beeinflusst werden, ist also essentiell für eine gezielte Optimierung der Filter hinsichtlich ihrer Betriebseigenschaften.

Verantwortlich für den Transport von abgeschiedenem Öl im Filtermedium sind Mechanismen auf Mikro-, Meso- und Makroskala, wie die Koaleszenz einzelner Tropfen auf Fasern und die Bildung größerer Ölstrukturen. Diese können wiederum von Medieneigenschaften auf unterschiedlichen Größenskalen beeinflusst sein. Zunächst gilt es also mögliche Einflussgrößen unter den Medieneigenschaften zu identifizieren und geeignete Charakterisierungsme-

thoden für ebendiese Größen zu finden oder neu zu entwickeln. Anschließend sind diese Einflüsse experimentell zu validieren.

Zunächst wird in dieser Arbeit ein Literaturüberblick zu relevanten Forschungsarbeiten auf dem Gebiet gegeben. Im nachfolgenden Kapitel wird ein Überblick über die verwendeten Medien sowie deren Herstellung und Modifikation gegeben. Anschließend werden die angewendeten Methoden zur Charakterisierung von Medienstruktureigenschaften beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung als Charakterisierungsmethode von Glasfaservliesen evaluiert. Von besonderem Interesse waren dabei in dieser Arbeit die Faserdurchmesser sowie deren räumliche Orientierung. Da Kapillarphänomene eine bedeutende Rolle in der Ölnebel filtration spielen, wurden zudem die Porendurchmesserverteilungen der Medien analysiert. Ebenfalls analysiert wurden Methoden zur Charakterisierung von Benetzbarkeit und Strukturhomogenität der Medien. Zudem wird der Versuchsaufbau zur Bestimmung des Betriebsverhaltens der Filter beschrieben. Daran schließen sich die Ergebnisse der Filtrationsversuche an. Dabei wird unterschieden zwischen:

- Dem Einfluss von der zuvor charakterisierten Medienstruktur und Benetzbarkeit auf Druckverlust und Abscheidegrad. Mikro- und mesoskalige Größen werden separat betrachtet.
- Dem Einfluss der Medien in der Filterauslegung. Konkret wird der Medieneinfluss bei Verwendung einer Lage sowie der Kombination mehrerer Lagen gleicher sowie unterschiedlicher Struktur und Benetzbarkeit betrachtet. Der Einfluss der Geometrie der verwendeten Stützstruktur in Kombination mit verschiedenen Medien ist ebenfalls ein wichtiger Aspekt in der Filterauslegung und ist ebenso Bestandteil dieses Kapitels.

Die gezeigten Zusammenhänge sollen die Entwicklung von hocheffizienten Filtermedien speziell für die Anwendung in Ölnebel filtern ermöglichen sowie eine Auslegungssystematik für den gezielten Einsatz und der Kombination von Filtermedien zur Optimierung des Betriebsverhaltens hinsichtlich Differenzdruck und Abscheidegrad der Filter bieten.

1.2 Überblick zum bisherigen Wissensstand

Für eine anwendungsbezogene, systematische Auslegung von Ölnebelfiltern und Ölnebelfiltermedien ist ein grundlegendes Verständnis über die Mechanismen der Abscheidung und des Transports des Öls innerhalb der Medien und der daraus resultierende Einfluss auf das Betriebsverhalten der Filter essentiell. Betrachtet man lediglich die Abscheidung der Partikeln in dem Medium, so lassen sich Erkenntnisse aus der Staubfiltration [19][8] auf Koaleszenzfilter übertragen. Die Abscheidemechanismen von Tröpfchen in Filtern sind ebenso wie für feste Partikeln:

- Diffusionsabscheidung
- Sperreffekt
- Trägheitsabscheidung/Impaktion
- Elektrostatische Abscheidung
- Sedimentation

Bei der Diffusionsabscheidung weichen Tropfen aufgrund der Brown'schen Molekularbewegung von ihrer um die Faser herumführenden Stromlinie ab und kommen infolgedessen mit der Faser in Berührung und werden abgeschieden. Die Diffusionsabscheidung dominiert insbesondere für sehr kleine Tropfen. Der Sperreffekt beschreibt die Abscheidung durch den Kontakt zwischen Faser und Tropfen aufgrund der geometrischen Ausdehnung des Tropfens und ist für größere Tropfen von Bedeutung. Bei der Trägheitsabscheidung weicht der Tropfen durch seine Trägheit von der Stromkennlinie ab und impaktiert auf der Filterfaser. Auch dieser Mechanismus ist für größere und massereiche Tropfen von Bedeutung. Im Fraktionsabscheidegrad, welcher den abgeschiedenen Anteil an Partikeln in Abhängigkeit von deren Größe beschreibt, zeigen sich deutlich die Auswirkungen dieser Abscheidemechanismen. Diese für Filter charakteristische Trennkurve zeigt für kleine Tropfengrößen einen Diffusionsast auf dem der Fraktionsabscheidegrad zu kleineren Partikeln hin zunimmt. Im rechten Ast der Trennkurve dominieren Sperreffekt und Impaktion, so dass hier der Fraktionsabscheidegrad zu größeren Partikeln hin ebenfalls zunimmt. Zwischen diesen beiden Ästen befindet sich ein ausgeprägtes Minimum, welches die am häufigsten penetrierende Partikelgröße (most penetrating particle size, MPPS) darstellt. Die elektrostatische Abscheidung spielt in der Ölnebelfiltration nur eine untergeordnete Rolle, da Ölaerosole typischerweise über eine geringe

elektrostatische Aufladung verfügen. Da Schmierstoffe in der Regel Additive enthalten, welche die elektrische Leitfähigkeit des Öls erhöhen, werden elektrostatisch aufgeladene Filterfasern bei Benetzung mit dem Öl zudem entladen [57]. Bei den in Druckluftentölelementen vorherrschenden Luftgeschwindigkeiten und Tropfengrößen ist die Abscheidung durch Sedimentation innerhalb des Mediums ebenso vernachlässigbar.

Nach der Abscheidung auf Fasern verhalten sich Tropfen gänzlich anders als feste Partikeln, welche in der Regel nach der Abscheidung am Abscheideort bleiben. Öltropfen hingegen können mit bereits abgeschiedenen Tropfen koaleszieren [6][26] und von der Strömung und durch Gravitation entlang der Fasern transportiert werden. Die Morphologie des abgeschiedenen Öls auf einzelnen Fasern ist im Wesentlichen von deren Benetzbarkeit der mit dem Öl bestimmt. Benetzbare Fasern werden durch abgeschiedene Öltröpfchen zunächst gleichmäßig benetzt, so dass sich ein Ölfilm von einigen Nanometern Dicke auf diesen ausbildet [7]. Bei weiterer Beladung bricht dieser Film aufgrund der Plateau-Rayleigh-Instabilität in einzelne Tropfen auf [64][67], welche weiterhin durch einen dünnen Film verbunden bleiben. Diese Tropfen umschließen die Fasern fassförmig und die Form der Tropfen kann analytisch berechnet werden [9]. Auf nicht-benetzbaren Fasern bilden Tropfen bei Abscheidung keinen Film aus, sondern verbleiben zunächst als einzelne Tropfen auf den Fasern [1], wo sie mit weiteren abgeschiedenen Tropfen koaleszieren können. Da der Kontaktwinkel von der Tropfengröße abhängt [32][31][48], treten auf nicht-benetzbaren Fasern sowohl fassförmige (im Falle kleiner Tropfendurchmesser) als auch muschelförmige (für große Tropfendurchmesser) Tropfen auf. Der Übergang von fassförmigen zu muschelförmigen Tropfen lässt sich ebenfalls theoretisch bestimmen [10]. Diese entstehenden Tropfenstrukturen können von der Strömung entlang der Fasern bewegt werden [59][22][21][20], mit weiteren Tropfen koaleszieren, Flüssigkeitsbrücken und Filme zwischen mehreren Fasern bilden und schließlich vollständig gesättigte Bereiche bilden, welche zahlreiche Fasern beinhalten. Die sich hieran anschließenden mesoskopischen Vorgänge innerhalb des Filtermediums sind maßgeblich für das Betriebsverhalten der Filter verantwortlich und werden vom Kanal-Film-Modell von Kampa [38] beschrieben.

Das Kanal-Film-Modell ist ein semiquantitatives mechanistisches Modell, welches den Öltransport innerhalb von Glasfasermedien bei der Ölnebel filtration und die Auswirkungen der einzelnen Öltransportmechanismen auf die Entwicklung des Differenzdrucks im Betrieb beschreibt. Bereits in vorherigen Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich der Druckverlustanstieg von be-

netzbaren Koaleszenzfiltermedien in vier Phasen unterteilen lässt: Zunächst kann ein mäßiger Differenzdruckanstieg beobachtet werden, auf welchen ein langsamer gleichmäßiger Anstieg des Differenzdruckes aufgrund einer Umverteilung des Öls im Medium und dessen Transport durch das Medium folgt. Die dritte Phase ist von einem steilen, sprunghaften Anstieg des Druckverlustes gekennzeichnet, welcher durch die Bildung eines Flüssigkeitsfilms an der Filtergrenzfläche entsteht. In der letzten Phase kommt es zu einem Gleichgewicht aus abgeschiedenem und an der Filterrückseite drainierendem Öl, welches mit einer Stabilisierung des Druckverlustes einhergeht [75][18]. Weitere Arbeiten mit fein strukturierten Glasfasermedien konnten diese Phasen ebenso beobachten [29][13], wobei die erste Phase nicht immer auftrat. Kampa griff diese Beobachtungen auf und erweiterte diese in dem Kanal-Film-Modell [38], welches die oben beschriebenen Phasen mit einer umfassenden mechanistischen Beschreibung der Vorgänge im Filtermedium verknüpft. Die Abfolge der einzelnen Vorgänge ist dabei wesentlich von der Benetzbarkeit des Filtermediums abhängig. Abbildung 1.2 zeigt den Verlauf des Differenzdrucks für ein benetzbares und ein nicht-benetzbares Medium über der aufgegebenen Ölmasse sowie schematisch die im Filtermedium ablaufenden Öltransportvorgänge. Der überwiegend größte Teil des Aerosols wird filteranströmseitig in der ersten Lage abgeschieden, wo es zu der oben beschriebenen Koaleszenz und dem Transport von Tropfen kommt (Abbildung 1.2, 1). Im Falle benetzbarer Medien kommt es bei ausreichender Beladung zur Ausbildung abgegrenzter Ölkanäle (Abbildung 1.2, 2), welche sich durch das gesamte Filterpaket bis an die Filterabströmseite erstrecken. In dieser Phase steigt der Differenzdruck näherungsweise linear an, ebenso kommt es zu einem Anstieg der Penetration [43]. Dieser Differenzdruck ist laut Kampa zur Förderung des Öls durch das Medium erforderlich [38]. Erreichen die Ölkanäle die Filterrückseite bildet sich ein nahezu geschlossener Film (Abbildung 1.2, 3), welcher mit einem sprunghaften Anstieg des Differenzdruckes einhergeht. Die Penetration sinkt zunächst ebenso sprunghaft ab. Die Höhe des Differenzdrucksprungs entspricht dabei etwa dem kapillaren Austrittsdruck des Mediums. Das Öl drainiert anschließend rückseitig in dem Film und es bildet sich ein quasistationärer Zustand aus. Mit dem Erreichen des quasistationären Zustands kommt es bei Ölnebel filtern zur Entstehung von Sekundäremissionen (sog. (Re-)Entrainment), während davor nahezu ausschließlich Primärpenetration von Tropfen durch das Filter für den Restölgehalt im Reingas verantwortlich ist [5]. Dies liegt daran, dass die Sekundäremissionen insbesondere an der Filterrückwand entstehen. Wurster konnte zeigen, dass das Abblasen von Tropfen von Fasern bei der Entstehung von Sekundäremissionen nahezu keine Rolle spielt [82]. Stattdessen besteht

ein Großteil des wiedereingetragenen Öls aus Fragmenten von zerplatzenden Blasen an der Filtrerrückseite. Dies geschieht im Falle von benetzbaren Medien im rückseitigen Film [81][80].

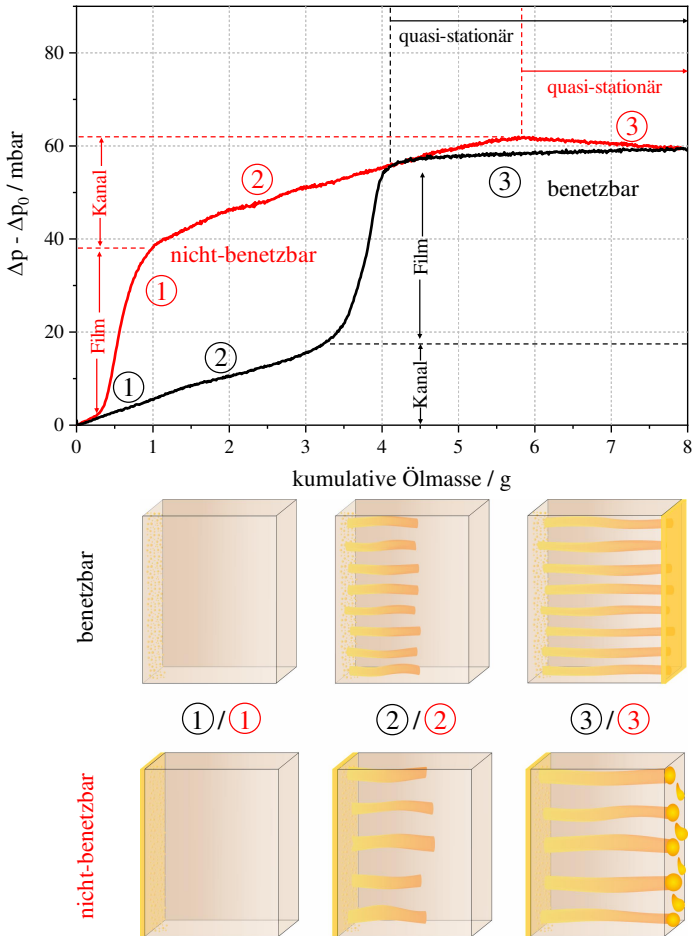


Abbildung 1.2: Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse beispielhaft für ein benetzbares (schwarz) und ein nicht-benetzbares (rot) Medium und schematische Darstellung der im Betrieb ablaufenden Prozesse.

Bei nicht-benetzbaren Medien bildet sich anströmseitig ein Film und dementsprechend steigt der Differenzdruck bereits zu Beginn der Beladung sprunghaft an (Abbildung 1.2, 1). Der dadurch entstehende zusätzliche Differenzdruck wird benötigt, um das Öl in das Medium hineinzufördern und entspricht in etwa dessen kapillarem Eintrittsdruck. Wird dieser überwunden, so bilden sich im Inneren des Mediums Kanäle aus und es kommt zu einem langsamen, linearen Anstieg des Differenzdrucks (Abbildung 1.2, 2). Erreichen diese die Filtrerrückseite, so bilden sich dort einzelne Tropfen, welche so lange mit Öl aus den Kanälen aufgefüllt werden, bis sie aufgrund der Schwerkraft drainieren (Abbildung 1.2, 3). Auch hier wird ein annähernd stationärer Zustand erreicht und es kommt zur Entstehung von Sekundäremissionen aufgrund von zerplatzenden Blasen in den drainierenden Tropfen und der Ölspur, welche sie bei der Drainage hinterlassen [81][80]. Nach Erreichen dieses Zustands kommt es unabhängig von der Benetzbarkeit des Mediums zu einem kriechenden Ansteigen des Differenzdrucks. Kolb und Kasper konnten zeigen, dass das Kriechen durch die langsame Ausbildung zusätzlicher Ölkanäle entsteht [41]. Da jedoch der Differenzdruck bis zum Erreichen dieses quasistationären Zustands im Wesentlichen von den Mechanismen der Kanal- und Filmbildung bestimmt wird, ist die Beeinflussung dieser beiden Öltransportvorgänge bei der Optimierung des Betriebsverhaltens entscheidend.

Bei der Untersuchung möglicher Medieneinflussgrößen auf das Betriebsverhalten der Filter standen in den letzten Jahren weniger Struktureigenschaften im Fokus als etwa die Benetzbarkeit der Medien. Wie oben erläutert, beeinflusst die Benetzbarkeit der Medien sowohl mikroskopische (Tropfen auf Fasern) als auch mesoskopische (Öltransport im Medium) Vorgänge bei der Filtration. Da eine Charakterisierung des Benetzungsverhaltens an einer faserigen Oberfläche sich jenseits der Kriterien "benetzbar" und "nicht-benetzbar", z.B. über die Messung eines Kontaktwinkels, schwierig gestaltet, teilt der überwiegende Teil der Arbeiten verwendete Medien in diese zwei Kategorien ein. Untersuchungen mit Tropfenaerosolen aus Flüssigkeiten unterschiedlicher Oberflächenspannungen zeigen, dass der Kontaktwinkel einen deutlichen Einfluss auf den Sprung des Differenzdrucks durch Filmbildung hat, während der Kanaldruckverlust konstant bleibt [15]. Einige Arbeiten beschreiben "superoleophobe" Filter und ziehen als Kriterium den Kontaktwinkel von Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) auf der Oberfläche des Mediums heran [76][51]. Hier beschreiben die Autoren u.a. einen verbesserten Abscheidegrad gegenüber dem unbehandelten oleophilen Kontrollmedium, welchen sie mit dem Abprallen von Tröpfchen von den Fasern mit anschließender Kollision und Koaleszenz mit weiteren Tröpfchen

in der Gasphase erklären. Allerdings wurden die Abscheidegrade lediglich im quasistationären Zustand gemessen. In diesem können sich die Flüssigkeitsverteilungen innerhalb der Medien stark unterscheiden, worauf Unterschiede im Abscheidegrad ebenfalls zurückzuführen sein können. Jedoch zeigten auch weitere Untersuchungen Vorteile von oleophobisierten Medien gegenüber ihren oleophilen Gegenständen hinsichtlich Druckverlust und Abscheidegrad [14]. Zudem zeigten Medien mit oleophobisierten Teilbereichen ebenfalls ein vorteilhaftes Betriebsverhalten [77][78].

Vorangegangene Studien verwendeten größtenteils unterschiedliche Filtermedien mit dementsprechend unterschiedlichen Struktureigenschaften. Systematische Untersuchungen zum Einfluss der Struktur sind rar auch weil es kaum möglich ist, verschiedene Strukturparameter unabhängig voneinander zu variieren. Die Untersuchung des Einflusses des Faserdurchmessers auf das Betriebsverhalten von Filtern etwa gestaltet sich alleine schon deshalb schwierig, da Glasfasermedien in der Regel Fasern unterschiedlichster nomineller Durchmesser enthalten, welche wiederum normal- oder logarithmisch normal verteilt sind [4]. Der Einfluss des Faserdurchmessers auf den Druckverlust der Filter lässt sich etwa über Gleichungen von Davies [19] oder Liew und Conder [49] abschätzen. Davis schlägt als Modifikation für den quasistationären Zustand einen "nassen" (d.h. mit Öl beladenen) Faserdurchmesser und eine "nasse" Packungsdichte vor, wobei davon ausgegangen wird, dass die Flüssigkeit die Fasern vollständig benetzt und gleichmäßig im Medium verteilt ist. Für unbeladene Faserfilter finden sich diverse Modelle zur Berechnung des Abscheidegrades (u.a. [46][73][50]). Dem gegenüber stehen einige wenige Modelle für beladene Filter, welche ausschließlich auf Filter in einem stationären beladenen Zustand anwendbar sind ([62][33][68]). Sämtliche Modelle haben gemein, dass sich der Abscheidegrad mit sinkendem Faserdurchmesser verbessert und im beladenen Zustand verringert. Demgegenüber stehen jedoch Untersuchungen, bei denen eine Erhöhung des Abscheidegrades bei Beladung beobachtet wurde ([49][17][3]).

Die Kombination verschiedener Medien in einem Filter ist in der Druckluftentölung mittlerweile weit verbreitet. Die Auswahl und Kombination der Medien beruht dabei überwiegend auf Erfahrungswerten der Hersteller. Allerdings existieren auch systematische Untersuchungen, die Betriebseigenschaften von Filtern bestehend aus Kombinationen verschiedener Medien betrachten [37]. Dabei standen Kombinationen von Medien unterschiedlicher Benetzbarkeit im Fokus. Je nach Kombination können sich Flüssigkeitsfilme sowohl An- als auch Abströmseitig oder auch an einer inneren Grenzfläche des Filters bilden [38].

Bilden sich sowohl an An- als auch Abströmseite Filme, so kann das nachteilig für den Druckverlust des Filters sein, da es zu zwei Differenzdrucksprüngen kommt. Andere Untersuchungen kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich vorteilhafter Kombinationen aus benetzbaren und nicht-benetzbaren Medien [2][58][51]. Ein Zusammenhang mit der Struktur der einzelnen Medien wurde dabei bisher nicht betrachtet.

2 Materialien und experimentelle Vorgehensweise

2.1 Herstellung und Modifikation nichtgewebter textiler Filtermedien

Bei Filtermedien, welche in Anwendungen mit hohen Anforderungen an den Abscheidegrad zum Einsatz kommen, handelt es sich zum überwiegend größten Teil um nichtgewebte Faservliese, üblicherweise aus Glaserfasern. Vliesstoffe sind textile Materialien, welche aus mehr oder weniger zufällig angeordneten Fasern bestehen, welche mechanisch, chemisch oder thermisch verfestigt werden. Durch die Auswahl der Fasern und die Art der Vliesbildung, -verfestigung und -ausrüstung lassen sich die Eigenschaften solcher Vliese beeinflussen. Die Vliesbildung kann entweder in einem Trocken- oder in einem Nassprozess erfolgen. Da in Trockenverfahren zur Vliesbildung vergleichsweise lange Fasern benötigt werden, erfolgt die Vliesbildung bei hocheffizienten Filtermedien, welche einen hohen Anteil an feinen, kurzen Fasern enthalten, in der Regel in einem Nassvliesverfahren [30].

Beim Nassvliesverfahren werden die Fasern vor der Vliesbildung zunächst in Wasser dispergiert. Die Güte der Dispergierung ist entscheidend für die spätere Homogenität des entstehenden Vlieses. Schlecht dispergierte Fasern neigen zu Flockenbildung, was sich in den Medien als sichtbare Einschlüsse im Material äußert. Eine weitere Folge von inhomogener Verteilung der Fasern in der Suspension ist die sogenannte Wolkigkeit. Der entstehenden Faser-Wasser-Suspension können Additive zugegeben werden, welche die späteren Eigenschaften des Vlieses beeinflussen, beispielsweise Dispergiermittel oder Binder. Für die anschließende Vliesbildung wird die Suspension auf ein Sieb aufgegeben und überschüssige Flüssigkeit an der Unterseite des Siebs abgesaugt. Sämtliche in dieser Arbeit verwendeten Medien wurden mittels zwei verschiedenen Nasslegeverfahren hergestellt:

- Laborblattbildung in Anlehnung an die DIN EN ISO 5269-2 nach dem Rapid-Köthen-Verfahren [24]. Dabei wird die Suspension in eine zylinderförmige Füllkammer gegeben, mittels eines Luftzufuhrsystems durchmischt, durch ein kreisrundes Siebtuch abgesaugt und anschließend in einem Heizschrank getrocknet. Die Binderzugabe erfolgte hierbei vor dem Trocknen durch Aufbringen des Binders auf das nasse Blatt mit anschließendem Absaugen.
- Großtechnische Vlieslegung auf einer Nassvliesanlage. Die Faser-Wasser-Suspension wird auf ein fortlaufendes Endlossieb geleitet,

Saugvorrichtungen unterhalb des Bandes saugen Wasser ab und reduzieren so den Flüssigkeitsgehalt des Vlieses auf unter 50 Prozent. Die gebildete Vliesbahn wird anschließend verfestigt, getrocknet und aufgerollt. Die Verfestigung der Vliese erfolgte entweder vor der Vliesbildung durch Zugabe des Binders zu der Faserdispersion oder durch Aufsprühen des Binders auf das Vlies. Die Trocknung erfolgte durch Kontakttrocknung, wobei die Vliesbahn über mit Öl beheizte Zylindertrommeln geführt wurde.

Die oleophobe Ausrüstung der nicht-benetzbaren Medien erfolgte durch Zugabe eines Fluorcarbonpolymers mit einem Vernetzer in die wässrige Suspension oder durch Aufsprühen auf das Vlies. Das Fluorcarbonpolymer diente gleichzeitig der Verfestigung der Vliese, so dass bei nicht-benetzbaren Medien das zusätzliche Aufsprühen von Acrylbinder entfiel.

2.2 Übersicht verwendeter Filtermedien

Sämtliche in dieser Arbeit verwendeten Medien waren Mikroglassfasermedien, hergestellt von der Fa. BinNova Microfiltration GmbH und Hollingsworth & Vose. Die auf der Nassvliesanlage hergestellten Medien waren kommerzielle Filtermedien, wie sie hauptsächlich in der Druckluftentölung und -aufbereitung Verwendung finden. Die mit dem Blattbildner hergestellten Muster waren hinsichtlich ihrer Faserzusammensetzung und Struktur an diese kommerziellen Medien angelehnt. Tabelle 2.1 zeigt die wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten Medien mit ihrer jeweiligen Lagendicke, Porosität, dem Oleophobizitätsgrad nach DIN EN ISO 14419 und den mit der Kapillarflussporometrie bestimmten Median der Porendurchmesser-Verteilung der Medien.

Die Lagendicke der Medien wurde durch das Ausmessen der Dicke von 10 Lagen vom jeweiligen Medium bestimmt, welche mit einem Gewicht, das 100 mbar Differenzdruck entspricht, beschwert wurden. Die Porosität wurde aus dem Volumen unter der Annahme berechnet, dass das Medium vollständig aus Glas mit einer Dichte von $2,5 \text{ g/cm}^3$ besteht. Unabhängig von der Herstellungsmethode hatten sämtliche Medien eine Porosität zwischen 0,93 und 0,95. Angesichts der Messgenauigkeit der gravimetrischen Messmethode erscheint die Porosität als differenzierendes Kriterium für die Strukturfeinheit der Medien ungeeignet. Daher wurde anhand des mittleren Porendurchmessers zwischen groben und feinen Medien unterschieden.

Table 2.1: Übersicht der wichtigsten verwendeten Medien mit ausgewählten Eigenschaften.

Bezeichnung	LAGENDICKE / mm	Porosität / -	Oleophobie*	Median Porendurchmesser / μm	Herstellungsmethode
Phil(g)	0,75	0,94	0	13,5	Maschine
Phil(mg)	0,65	0,94	0	10	Maschine
Phil(mf1)	0,6	0,94	0	8,7	Maschine
Phil(mf2)	0,65	0,95	0	7,1	Maschine
Phil(f)	0,6	0,93	0	4,7	Maschine
Phil(inho)	0,54	0,94	0	6,8	Maschine
Phil(SM1)	-	-	-	-	andere
Phil(SM2)	-	-	-	-	andere
Phob(g)	0,8	0,94	6	12,8	Maschine
Phob(mg)	0,7	0,94	5	10,9	Maschine
Phob(mf2)	0,65	0,95	0	7,3	Maschine
Phob(f)	0,5	0,93	4	3,7	Maschine
Phob(inho)	0,83	0,94	5	11,4	Maschine
Medium 1a	0,65	0,95	0	7,1	Maschine
Medium 1b	0,64	0,94	0	6,4	Maschine
Medium 1c	0,47	0,94	0	8,6	Blattbildner
Medium 1d	0,62	0,94	0	7,9	Blattbildner
Medium 2	0,52	0,94	0	8,6	Blattbildner
grob	0,60	0,95	0	11,5	Blattbildner
mittelgrob	0,68	0,95	0	9,5	Blattbildner
mittelfein	0,68	0,95	0	7,9	Blattbildner
fein	0,58	0,95	0	5,1	Blattbildner
Dual(g)	0,9	0,95	0	10	Maschine
Dual(m)	0,83	0,94	0	6	Maschine
Dual(f)	0,9	0,95	8	2	Maschine
FeinPhobM	0,45	0,93	-	5,9	Blattbildner
GrobPhobM	0,5	0,93	-	5,8	Blattbildner

* Oleophobizitätsgrad nach DIN EN ISO 14419

Die Bezeichnung der Medien richtet sich nach ihrer Benetzbarkeit bzw. einem differenzierenden Merkmal. Standardmedien werden, je nachdem ob sie oleophil oder oleophob sind, mit "Phil" oder "Phob" bezeichnet. Die Bezeichnung innerhalb der Klammern bezieht sich auf die mittlere Porengröße der Medien. Grobe Medien werden mit "g" bezeichnet (Median Porendurchmesser $\geq 10 \mu\text{m}$), feine mit "f" (Median Porendurchmesser $\leq 5 \mu\text{m}$). Medien, deren mittlerer Porendurchmesser zwischen dem größten und feinsten Medium liegt, ist zusätzlich ein "m" vorangestellt. Medien mit einer Struktur Grenzfläche innerhalb einzelner Lagen tragen die Bezeichnung "Dual", Medien mit Faseranteilen unterschiedlicher Benetzbarkeit werden, je nachdem ob der Fein- oder Grobanteil der Fasern oleophobisiert worden ist, mit "FeinPhobM" bzw. "GrobphobM" bezeichnet. Die Herstellungsmethode "Maschine" bezeichnet großtechnisch auf einer Nassvliesanlage hergestellte Medien.

2.3 Versuchsaufbau und -durchführung

Bei der Konzeption der Versuchsanlage und deren Ansteuerung konnte u.a. auf Erfahrungen von Kampa [38] und Wurster [82] zurückgegriffen werden. Wie schon in diesen Arbeiten wurden die Experimente bei Umgebungsdruck und -temperatur durchgeführt. Betriebsdruck und -temperatur liegen in den typischen Anwendungen der eingesetzten Medien bei 8 bis 12 bar und 80 bis 120°C. Sämtliche relevante Mechanismen können jedoch auch bei Umgebungsbedingungen beobachtet werden und lassen sich auf höhere Temperaturen und Drücke übertragen.

Da es den apparatetechnischen Aufwand und die Messtechnik deutlich vereinfacht und wesentliche Effekte und Mechanismen ebenso beobachtbar sind, wurden sämtliche Experimente bei Umgebungsbedingungen durchgeführt, zumal der Einfluss der Betriebsbedingungen nicht Fokus dieser Arbeit war. Die Temperatur in dem Laborraum, in dem die Versuche durchgeführt wurden, betrug ganzjährig stabil zwischen 19,5 bis 21,5 °C.

2.3.1 Aufbau des Filtermedienprüfstands

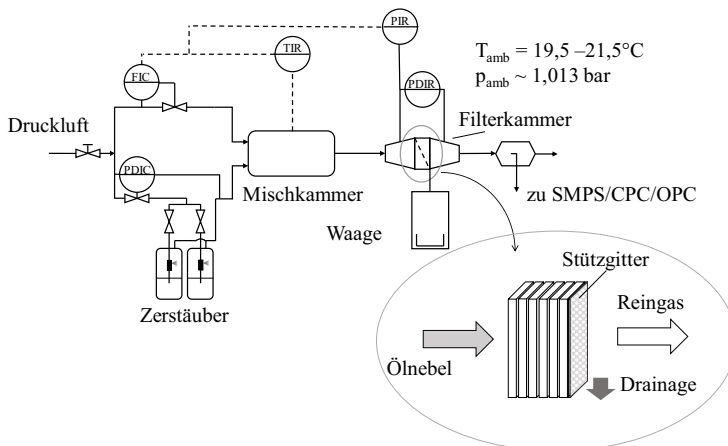


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Aufbau des Filtermedienprüfstands. Dieser besteht im Wesentlichen aus einer Einheit zur Aerosolerzeugung, einer Mischkammer zur Beimischung von trockener, partikelfreier Luft, um die gewünschte Filtrationsgeschwindigkeit einzustellen, sowie der Filterkammer, in welche ein Medienpaket aus bis zu 10 Lagen Filtermedium zusammen mit einem abströmseitigen Stützgitter geklemmt werden kann.

Aerosolerzeugung

Das Aerosol wurde abhängig von der benötigten Ölnebelkonzentration mit einem oder zwei parallel geschalteten Collision-Zerstäubern aus einem handelsüblichen Kompressoröl (Roto Inject Fluid, Atlas Copco Airpower N.V.; Eigenschaften bei Standardbedingungen: Dichte $0,9 \text{ g/cm}^3$, dynamische Viskosität $0,122 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, Oberflächenspannung $0,031 \text{ N/m}$) erzeugt [55]. Bei dem Collision-Zerstäuber handelt es sich um einen Aerosolgenerator nach dem Prinzip der Zweistoffdüse, bzw. pneumatischen Flüssigkeitszerstäubung. Dabei wird Druckluft wie in Abbildung 2.2 dargestellt über eine Engstelle entspannt. Aufgrund des statischen Druckabfalls im Engpass wird über ein Steigröhrchen Öl aus einem Vorratsgefäß angesaugt und beim Kontakt mit der Strömung durch die auftretenden Scherkräfte zerstäubt. Auf einem gegenüber der Düsenöffnung angebrachten Prallblech impaktieren große Öltröpfen aufgrund ihrer Trägheit, während feine Tropfen mit der Zerstäuberluft aus dem Zerstäuber ausgetragen werden.

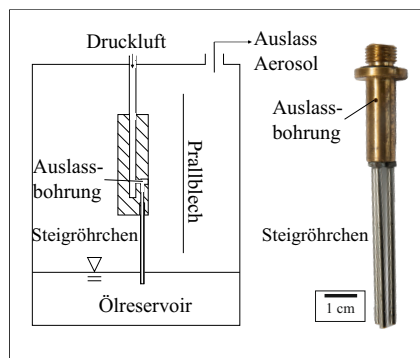


Abbildung 2.2: Prinzip der pneumatischen Flüssigkeitszerstäubung mit einem Collision-Zerstäuber. Rechts: Eingesetzter Zerstäuber.

Der Durchmesser der Druckluftzufuhrbohrung vor der Engstelle betrug 1,6 mm. Ebenso der Öffnungsdurchmesser hinter der Engstelle sowie der Innendurchmesser der Steigröhrchen. Der Durchmesser an der Engstelle betrug 0,35 mm.

Die zerstäubte Ölmenge und Tropfengrößenverteilung des entstehenden Aerosols ist von Ölviskosität und -oberflächenspannung und dem angelegten Differenzdruck über dem Zerstäuber abhängig. Da bei näherungsweise konstanter Labortemperatur die physikalischen Eigenschaften des Öls als konstant angenommen werden können, wurde die Zerstäubung allein über den Differenzdruck gesteuert, eingestellt durch ein elektropneumatisches Druckregelventil (ITV 1030, SMC Pneumatik GmbH). Mittlerer Tropfendurchmesser des Aerosols und zerstäubte Ölmasse korrelierten mit dem eingestellten Differenzdruck. Bei den in dieser Arbeit gewählten Versuchsbedingungen waren die Tropfengrößen des erzeugten Aerosols näherungsweise logarithmisch-normalverteilt mit einem Modalwert von ca. 380 nm und einer geometrischen Standardabweichung von etwa 1,8 (siehe Abbildung 2.3). Die erreichbaren Ölkonzentrationen von ca. 1 g/m³ (je nach Verdünnung und geforderter Anströmgeschwindigkeit) waren deutlich geringer als die in Kompressoren auftretenden Rohgaskonzentrationen von bis zu 10 g pro Normkubikmeter Luft.

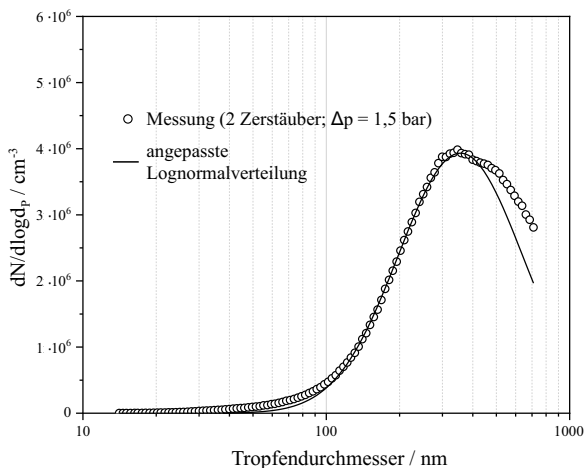


Abbildung 2.3: Gemessene Partikelgrößenverteilung im Rohgas und angepasste Lognormalverteilung.

Filtration

Das erzeugte Aerosol wurde in einer Mischkammer mit einem partikelfreien Luftstrom vermischt, welcher über einen Massendurchflussregler (SLA5853, Brooks Instrument LLC) gesteuert wurde. In die Berechnung des für die jeweils eingestellte Anströmgeschwindigkeit benötigten Volumenstroms gingen die vor dem Filter gemessene Temperatur und der herrschende Absolutdruck ein, um die Anströmgeschwindigkeit auch bei der rohgasseitigen Druckzunahme durch Beladung des Filters und eventuellen Temperaturänderungen konstant zu halten. Das generierte Aerosol gelangte anschließend in die Filterkammer (siehe Abbildung 2.4).

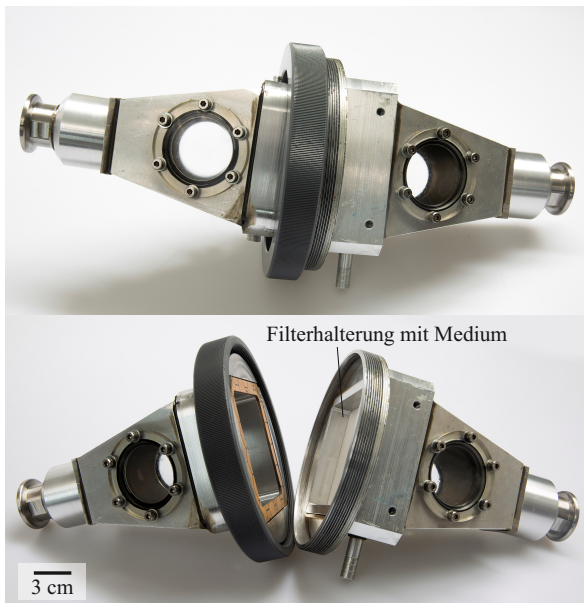


Abbildung 2.4: Filterkammer geschlossen sowie offen mit eingesetzter Filterhalterung.

Die Filterkammer besteht aus zwei mit einem Schraubring zusammengehaltenen Pyramidenstümpfen mit einem rechteckigen Strömungsquerschnitt. Um die Turbulenz innerhalb der Filterkammer bei gleichzeitig gut handhabbarer Bauteilgröße zu verringern, wurde ein Öffnungswinkel von 25° gewählt. Fenster an den Seitenwänden der Kammer erlauben es, Vorgänge im inneren der

Kammer, insbesondere an Filteranström- und -abströmseite, zu beobachten. Unmittelbar vor dem Filter befindet sich ein Sumpf, um zu verhindern, dass das Medium mit dem Wandfilm, welcher sich durch die Abscheidung von Öl an den Wänden bildet, in Kontakt kommt. Insbesondere bei benetzbaren Medien kann der Kontakt mit dem Wandfilm zu einer Verfälschung von Messdaten führen, da das Öl durch die Kapillarwirkung vom Medium aufgesaugt wird. Da durch die Erweiterung des Strömungsquerschnitts innerhalb der Filterkammer die Schwerkraft gegenüber strömungsbedingten Scherkräften dominiert, sammelt sich der Ölwandfilm größtenteils im unteren Teil der Kammer. Der Sumpf ist somit ausreichend zur Entfernung des Wandfilms vor dem Filter. Das Filter besteht aus einer rechteckigen Halterung, in welcher sich ein Stützgitter und das jeweils zu prüfende Filtermedienpaket befindet. Medienpaket und Stützgitter werden mit einem Klemmrahmen fixiert, welcher an den Ecken mit der Halterung verschraubt wird (Abbildung 2.5). Mittels zweier Flachdichtungen wird der Filterhalter gegen die beiden Kammerhälften gedichtet.



Abbildung 2.5: Filterhalterung mit Medium und Stützgitter. Links: Anströmseite, rechts: Abströmseite.

An der Unterseite der abströmseitigen Kammerhälfte befindet sich direkt hinter der Filterhalterung eine Auslassöffnung für das an der Filterrückseite drainierende Öl. Das Öl wird in einem Behälter auf einer Waage (GF 300, A&D Instruments Ltd.) aufgefangen, welche sich zur Vermeidung von Luftströmungen, welche die Gravimetrie stören würden, in einem druckfesten Gehäuse befindet. An der Oberseite beider Kammerhälften befinden sich Bohrungen unmittelbar vor und hinter dem Filter zur Messung des Differenzdrucks über dem

Filtermedium mit einem Differenzdrucksensor (MMDWU2.5V10H3D6T1A3C5, Omega Engineering Inc.).

Einsatz von Partikelmesstechnik

Hinter der Filterkammer ist eine zusätzliche Messkammer mit einer 90° Haken-sonde zur Zuführung eines Teilstroms zu einem Partikelmesssystem angebracht. Das im überwiegenden Teil der Versuche zum Einsatz gebrachte Messsystem war ein Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS). Dabei wird der abgesaugte Teilstrom (1,5 l/min) zunächst mit einem ^{85}Kr Strahler neutralisiert. Das nun Boltzmann-ladungsverteilte Aerosol wird in einem differentiellen Mobilitäts-analysator (DMA, Hauke Vienna Long) klassiert. Die Anzahlkonzentrationen der einzelnen Fraktionen wird nachfolgend mit einem Kondensationskernzähler (CPC, TSI CPC 3775) bestimmt. So konnten Tropfen im Größenbereich zwischen 14 und 710 nm gemessen werden. In einzelnen Versuchen wurde lediglich die Gesamtanzahlkonzentration mittels CPC gemessen. In Versuchen, in denen größere Tropfen detektiert werden sollten kam ein optischer Partikelzähler (OPC, Promo 2000 mit Welas Sensor, Palas GmbH) mit einem Messbereich von 0,2 bis 17 μm zum Einsatz. Da die Tropfen im Rohgas überwiegend kleiner als 1 μm waren und somit mit dem SMPS ausreichend detektiert werden konnten, war die Messung mit OPC lediglich für die Messung von Sekundäraerosolen auf der Filterrückseite relevant.

2.3.2 Durchführung und Auswertung der Versuche

Im Folgenden ist der typische Ablauf der Versuche im Filtermedienprüfstand aufgelistet. Abhängig vom Versuchsziel waren nicht alle Schritte oder zusätzliche Schritte notwendig.

- Betrieb der Anlage mit leerem Filterhalter ohne Medium unter den für den Versuch benötigten Betriebsbedingungen und Messung der Tropfengrößenverteilung. Die gemessene Tropfengrößenverteilung wird für den Versuch als Rohgasverteilung angenommen und bildet somit die Grundlage für die spätere Berechnung des Fraktionsabscheidegrades.
- Zuschneiden und Wiegen der einzelnen trockenen Filterlagen und anschließende Montage mit Stützgitter im Filterhalter. Die Lagen

werden dabei mit der Siebseite abströmseitig eingelegt und anschließend der Klemmrahmen angezogen.

- Start der Anlagensteuerung und Messwerterfassung mit den gewünschten Betriebsbedingungen. Der Differenzdruck über dem Filter wird über die gesamte Versuchszeit erfasst und aufgezeichnet. Die Tropfengrößenverteilung im Reingas wird zu Beginn gemessen.
- Beladung des Filter bis zum quasistationären Zustand. Das Drainieren von Öl an der Filterrückseite zeigt das Erreichen des quasistationären Zustands an. Typischerweise wurde der Versuch fortgesetzt bis etwa 1-2 g Öl im Auffangbehälter gesammelt waren. Anschließend wurde erneut die Tropfengrößenverteilung im Reingas gemessen.
- Abstellen der Aerosolerzeugung unter Beibehaltung der Luftströmung. Anschließend erneute Messung im Reingas zur Erfassung abgeblasener Tropfen (Reentrainment).
- Abstellen der Strömung, Stopp der Messwerterfassung und Ausbau des Filters.
- Fotografieren der einzelnen Lagen im Durchlicht auf einem Leuchtpult. Durch den ähnlichen Brechungsindex von Öl und Glas erscheinen ölgesättigte Bereiche im Durchlicht heller als trockene Bereiche. Dies erlaubt eine Evaluation der lokalen Ölverteilung in den Lagen.
- Abschneiden der Ränder und Wiegen der einzelnen beladenen Filterlagen. An den Rändern werden jeweils ca. 0,5 cm entfernt, um eine Verfälschung der Sättigung auszuschließen. Diese Bereiche wurden bei der Beladung des Filters nicht durchströmt, da die Lagen hier in der Filterhalterung geklemmt waren. Bei nicht-benetzbaren Medien führt das zu einer Verfälschung der Sättigung hin zu niedrigeren Werten, da die Bereiche nicht mit Öl in Kontakt kommen. Bei benetzbaren Medien kann das Verpressen der Lagen zu niedrigeren effektiven Kapillardurchmessern und somit zu einem bevorzugten Aufsaugen von Öl und damit einer erhöhten Sättigung führen.

Die Sättigung S der einzelnen Filterlagen wurde unter der Annahme berechnet, dass das Medium vollständig aus Glas mit einer Dichte von $2,5 \text{ g/cm}^3$ besteht. Mit dem Gewicht der zuvor vermessenen trockenen Lage, der Dichte des Öls und der Lagendicke, konnte die Sättigung als Verhältnis aus Ölvolumen $V_{\text{Öl}}$ und dem Hohlraumvolumen V_{Hohl} der einzelnen Lage, welches die Differenz

aus Gesamtvolumen der Lage V_{ges} und Faservolumen V_{Fasern} ist, berechnet werden:

$$S = \frac{V_{\ddot{O}l}}{V_{Hohl}} = \frac{V_{\ddot{O}l}}{V_{ges} - V_{Fasern}} \quad (2.1)$$

Der Fraktionsabscheidegrad $\eta(d_{p,i})$ wurde aus den mittels SMPS ermittelten Konzentrationen der einzelnen Fraktionen im Rohgas $c_{Roh}(d_{p,i})$ und Reingas $c_{Rein}(d_{p,i})$ mit den Intervallmitten $d_{p,i}$ berechnet nach

$$\eta(d_{p,i}) = 1 - \frac{c_{Rein}(d_{p,i})}{c_{Roh}(d_{p,i})} \quad (2.2)$$

Der Differenzdruck über das Filter wird über die kumulative aufgegebene Ölmasse aufgetragen, welche aus der Öldrainagerate im quasistationären Zustand und der verstrichenen Versuchszeit bestimmt wird.

3 Evaluierung von Charakterisierungsmethoden

3.1 Charakterisierungsmethoden für Glasfasermedien

Die wesentlichen Kenngrößen zur Charakterisierung von Glasfaserfiltermedien sind einerseits die mikroskaligen Größen ihrer Bestandteile, d.h. der Fasern und Filamente. Die Hohlräume im Inneren der Medien, welche als Poren bezeichnet werden, gehören ebenfalls zu deren mikroskaligen Strukturgrößen. Diese Merkmale decken einen Größenbereich von etwa $0,1 \mu\text{m}$ bis zum dreistelligen Mikrometerbereich ab. Andererseits lassen sich Vliese auch durch meso- und makroskalige Größen beschreiben. Zu diesen Größen zählen sowohl globale als auch räumlich verteilte Eigenschaften der Medien ab einer Größe von etwa einem Millimeter. Um Zusammenhänge zwischen diesen Medieneigenschaften und Betriebseigenschaften der Filter, in denen sie eingesetzt werden, zu ermitteln, gilt es zunächst geeignete Charakterisierungsmethoden zu finden und zu validieren.

3.1.1 Bestimmung mikroskaliger Medienparameter

Als mikroskalige Medienparameter werden im Folgenden die Eigenschaften von Strukturen bis zu einer Größe von etwa $100 \mu\text{m}$ bezeichnet. In diesen Größenbereich fallen die einzelnen Fasern sowie die Abmessungen der Hohlräume innerhalb der Medien. Aus der Staubfiltration ist bekannt, dass die Faser- und Porendurchmesser in Filtermedien einen bedeutenden Einfluss auf das Betriebsverhalten von Filtern haben. Arbeiten an Einzelfasern sowie simulative Arbeiten legen zudem einen Einfluss der Faserorientierung in Strömungsrichtung nahe [28]. Zur Erfassung dieser Größen kommen die Bestimmung mittels bildgebender Verfahren oder eine indirekte Bestimmung aus empirisch und theoretisch abgeleiteten Zusammenhängen infrage.

Bildgebende Verfahren

Bei der bildgebenden Ermittlung der Faserdurchmesserverteilungen in Mikroglasfasermedien ist die Lichtmikroskopie aufgrund der geringen Faserdurchmesser von teils deutlich unter $1 \mu\text{m}$ als Charakterisierungsmethode nur bedingt geeignet. Das hohe Auflösungsvermögen der Rasterelektronenmikroskopie (REM) hingegen macht sie zu einem geeigneten Verfahren zur

Abbildung kleinster Strukturen in Glasfasermedien [4] [84]. Es ist dabei entweder möglich, Aufnahmen in der Aufsicht oder im Querschnitt anzufertigen. Um bei der Probenpräparation zur Anfertigung von Querschnittaufnahmen die Medienstruktur nicht zu verändern, wurden Lagen in Acrylharz eingegossen, nach dem Aushärten geschnitten und poliert. Abbildung 3.1 zeigt exemplarisch zwei REM Aufnahmen eines Mediums, die Aufsicht auf das Vlies und den Schnitt des in Acrylharz eingegossenen Mediums.

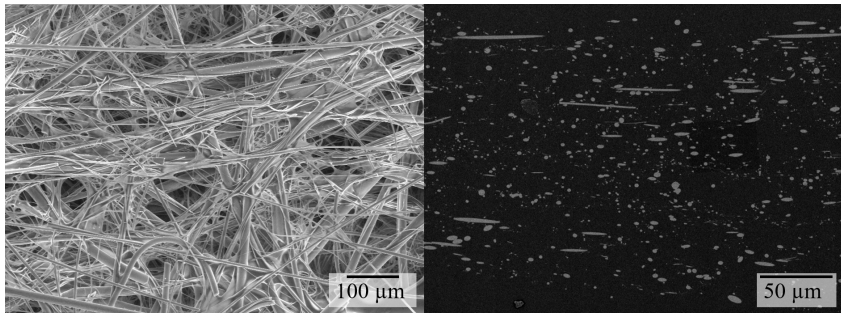


Abbildung 3.1: REM Aufnahmen eines Glasfaserfiltermediums (Phil(mf2)) als Aufsicht (links) und im Querschnitt (rechts).

Bei dem Versuch der Auswertung von REM Aufnahmen zeigten sich im Hinblick auf die Ermittlung der Faserdurchmesserverteilungen große Schwierigkeiten, repräsentative Ergebnisse zu erzielen. Zum einen wiesen die einzelnen Bildausschnitte eines einzelnen Mediums deutliche Unterschiede hinsichtlich der Faserdurchmesserverteilung auf. In der Auswertung der Querschnittaufnahmen fiel zudem auf, dass sehr feine Fasern nicht erkennbar oder nicht von Artefakten unterscheidbar waren. Für die Bestimmung von Porendurchmesserverteilungen wurden aus Aufsichtaufnahmen der Medien die Polygonflächen zwischen sich kreuzenden Fasern ermittelt und schließlich unter der Annahme kreisrunder Poren zu Porendurchmessern umgerechnet. Die hierbei erhaltenen Porendurchmesserverteilungen lagen mit mittleren Porendurchmessern unter 5 µm und sehr wenigen Poren größer als 20 µm teils deutlich unter den Herstellerangaben, welche nach ASTM F316 ermittelt wurden. Diese Diskrepanz ist in den Annahmen begründet, welche bei der Bildanalyse getroffen wurden. Fasern in Tiefenrichtung werden bei der Bestimmung der Polygonflächen fälschlicherweise der gleichen Ebene zugeordnet wie oberflächliche Fasern, was zu einer Verfälschung der Größenverteilung hin zu kleineren Durchmessern führt.

Eine Möglichkeit, kleinste Strukturen auch im Inneren poröser Materialien abzubilden stellt die Mikrocomputertomographie (μ CT) dar. Dabei werden aus einer Vielzahl von Röntgenaufnahmen der zu untersuchenden Probe aus unterschiedlichen Richtungen rechnergestützt Projektionen erstellt, mit welchen eine 3D Rekonstruktion des zu untersuchenden Objektes möglich ist (siehe Abbildung 3.2). Im Falle des hier eingesetzten Tomographen (Zeiss Xradia 520 Versa) wurde eine Probe des jeweils zu untersuchenden Mediums zwischen Röntgenquelle und Detektor rotiert. Damit konnte ein Ausschnitt von $500 \times 500 \times 500 \mu\text{m}$ mit einer Auflösung von ca. $0,4 \mu\text{m}$ betrachtet werden.

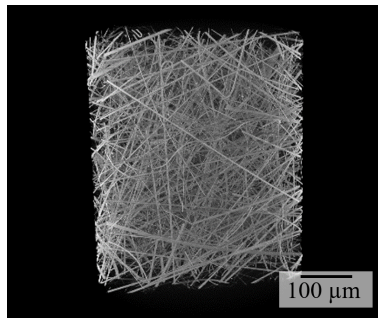


Abbildung 3.2: Aus μ CT-Schnittbildern erstellte 3D Rekonstruktion eines Glasfaserfiltermediums (Phil(mf2)).

Die Auswertung der Aufnahmen erfolgt mit der Java-basierten Bildverarbeitungssoftware ImageJ. Unter der Annahme, dass die Fasern geradlinig und zylinderförmig sind und sämtliche Schnittebenen parallel zur Durchströmungsrichtung (und somit orthogonal zur Filterebene) verlaufen, lassen sich in den einzelnen Schnittbildern die kreisrunden bzw. elliptischen Faserschnitte der Medien hinsichtlich des jeweiligen Faserdurchmessers sowie der Orientierung der Fasern zur Durchströmungsrichtung der Filter auswerten. Die Ellipsenbreite b ist der jeweilige Faserdurchmesser. Zusammen mit der Ellipsenhöhe a lässt sich die Lage der Faser im Raum bestimmen. Zunächst wird der Polarwinkel θ bestimmt nach

$$\theta = \arcsin \frac{b}{a} \quad (3.1)$$

Mit dem Azimutwinkel α lässt sich anschließend der Winkel der Faser zu Strömungsrichtung ϕ bestimmen:

$$\phi = \arccos(\sin \alpha \cdot \sin \theta) \quad (3.2)$$

Abbildung 3.3 veranschaulicht die Berechnung der Faserorientierung zur Strömungsrichtung aus μ CT Schnittbildern anhand einer einzelnen Faser aus einem Schnittbild eines Glasfaserfiltermediums.

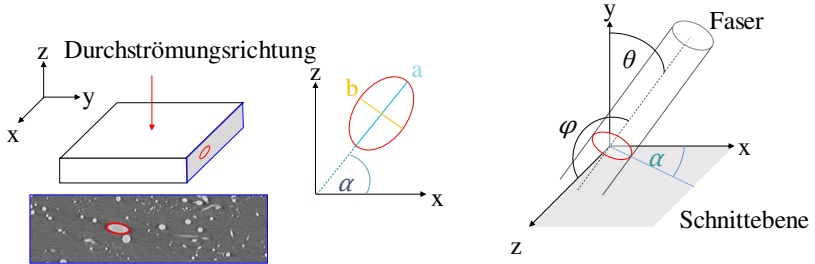


Abbildung 3.3: Bestimmung von Faserdurchmesser und -orientierung aus μ CT-Schnittbildern.

Zur Validierung der Methode wurden fünf Glasfasermedien untersucht, wovon sich vier (Medium 1 a-d) lediglich in der Herstellung, nicht aber in der Fasermischung unterschieden. Das fünfte Medium (Medium 2) bestand nominell aus einer Mischung zweier Faserdurchmesser, mit einem höheren Anteil grober Fasern als die Medien 1 a-d. Abbildung 3.4 zeigt die Dichteverteilungen der Faserdurchmesser und Faserorientierungen der fünf Medien.

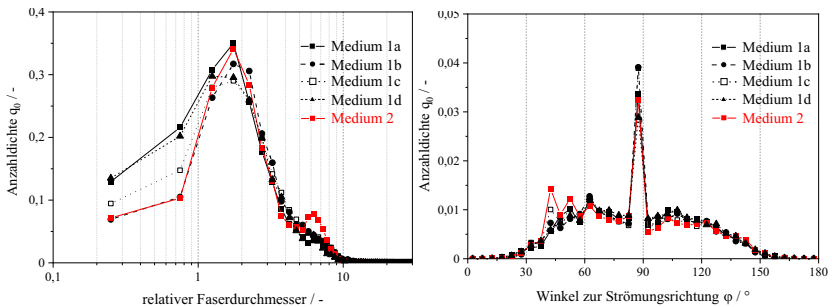


Abbildung 3.4: Mit μ CT bestimmte Faserdurchmesser- (links) und Faserorientierungsverteilungen (rechts) von fünf untersuchten Medien.

Für den Faserdurchmesser wird ein relativer Faserdurchmesser aufgetragen, welcher den tatsächlich bestimmten Faserdurchmesser auf einen arbiträr gewählten Durchmesser bezieht. Die Fasermischungen der Medien gelten unter

Medienherstellern als Betriebsgeheimnis. Da es sich bei zwei der Medien um kommerziell verfügbare Filtermedien handelt, soll an dieser Stelle nicht auf den ermittelten oder nominellen Faserdurchmesser eingegangen werden. Tatsächlich zeigen alle Filtermedien einen ausgeprägten Modus bei einem relativen Faserdurchmesser von etwa 1,5. Medium 2 zeigt einen zusätzlichen Modus bei einem relativen Faserdurchmesser von 6. Im Fall von Medium 2 stimmen die beiden Moden sehr gut mit den beiden nominell enthaltenen Faserdurchmessern überein. Die vier anderen Medien bestehen aus einer Mischung von deutlich mehr Faserdurchmessern, der einzige ermittelte abgegrenzte Modus zeigt jedoch tatsächlich den nominell am häufigsten vertretenen Faserdurchmesser an. Bei relativen Faserdurchmessern < 1 werden die Einschränkungen der Mikrocomputertomographie ersichtlich. Durch die limitierte Auflösung des Tomographen lassen sich hier nur begrenzt Aussagen treffen - daher ist den teils deutlichen Unterschieden in den Ergebnissen zwischen den einzelnen Medien keine hohe Signifikanz beizumessen. Zum Vergleich kann mit der Packungsdichte α und der Dicke des Mediums L , der empirisch bestimmte mittlere Faserdurchmesser nach Davies herangezogen werden [19],

$$d_f = \sqrt{\frac{64\alpha^{1,5}(1 + 56\alpha^3)\mu_{Luft}v_0L}{\Delta p}} \quad (3.3)$$

Der nach Davies bestimmte relative Faserdurchmesser beträgt für die Medien 1 a-d $2,49 \pm 0,13$ und für das Medium 2 2,68, somit liegen diese zumindest in derselben Größenordnung wie die mittels μ CT ermittelten Durchmesser.

Wie bei Vliesstoffen zu erwarten [54], war der überwiegend größte Teil der Fasern unabhängig von Faserzusammensetzung und Medienherstellung orthogonal zur Durchströmungsrichtung orientiert. Da es im Rahmen dieser Arbeit nicht gelungen ist, Medien mit gezielter Orientierung der Fasern in Durchströmungsrichtung herzustellen, wurde auf eine weitere Charakterisierung der Faserorientierung verzichtet.

Da die Anfertigung und Auswertung von μ CT-Aufnahmen mit großem Aufwand verbunden ist, wurden aufgrund der recht guten Übereinstimmung mit μ CT-Ergebnissen die nominell hinzugegebenen Faserdurchmesser der Medien als maßgeblich für die Faserzusammensetzung angenommen (siehe Kapitel 4.1.1).

Für die Bestimmung der Porendurchmesserverteilung aus μ CT Daten wurde die Berechnung der kontinuierlichen Porengrößenverteilung aus 3D Daten

nach Münch und Holzer gewählt [60]. Dazu werden die Grauwertbilder zunächst unter Anwendung eines globalen Schwellenwertes nach Porenraum und Feststoffanteil segmentiert. Für den segmentierten Porenraum wird nun ein euklidisches Distanzfeld berechnet, in welchem die kürzeste Distanz eines jeden Punktes innerhalb des Porenraumes zum angrenzenden Feststoffanteil enthalten ist. Bereiche mit einer Distanz $\leq d_{pore}$ werden mit Kugeln des Durchmessers d_{pore} erweitert. Der Raum, welcher durch die Erweiterung entsteht, ist der Volumenanteil der Poren mit einem Durchmesser d_{pore} . Mit abnehmendem d_{pore} kann so der gesamte Porenraum abgedeckt werden.

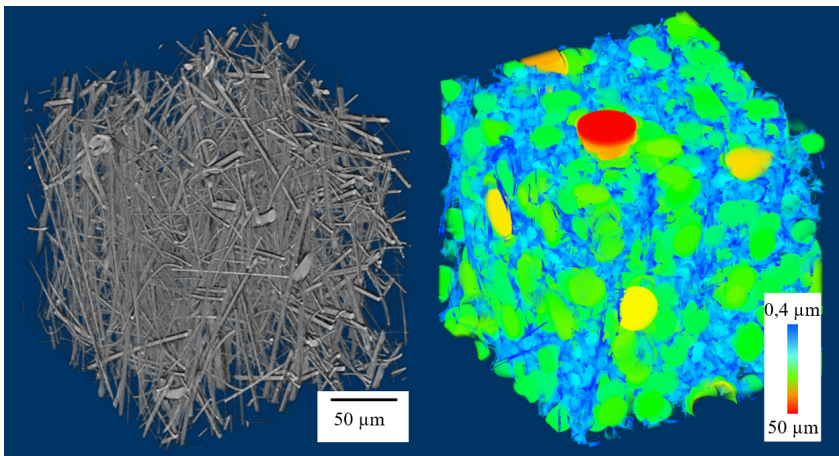


Abbildung 3.5: 3D Rekonstruktion eines Ausschnitts eines Filtermediums aus μ CT Daten (links), errechnete Porendurchmesserverteilung innerhalb des Mediums (rechts).

Kapillarflussporometrie

Eine etablierte Methode zur porometrischen Charakterisierung von Membranen und Filtermedien ist die Kapillarflussporometrie, welche auf der Verdrängung eines Fluids aus den Poren eines porösen Feststoffs unter angelegtem Druck basiert [27]. Die Kapillarflussporometrie ist aufgrund ihres gegenüber Verfahren wie REM und μ CT deutlich geringeren apparatetechnischen Aufwands und schnellen Durchführung und Auswertung in der Industrie als Charakterisierungsmethode für poröse Materialien weit verbreitet. Zudem ist es möglich, eine Probe mit einer repräsentativen Größe zu vermessen, während bei den

zuvor genannten bildgebenden Verfahren je nach benötigter Auflösung die Probenausschnitte auf eine Kantenlänge von deutlich kleiner als 1 mm beschränkt sind. Dabei wird eine Probe eines Medium zunächst vollständig mit einem Benetzungsfluid gesättigt, welches anschließend von einem zweiten Fluid unter steigendem Differenzdruck über der Probe schrittweise aus den Poren verdrängt wird. Durch Messung des Volumenstroms auf jeder Differenzdruckstufe, ist es unter Annahme von zylindrischen, durchgehenden und nicht verzweigten Poren möglich, eine kumulative Porendurchmesser-Verteilung zu berechnen. Der kleinste bei einem Differenzdruck Δp_k entleerte Porendurchmesser d_k ist nach Young-Laplace bestimmbar zu [83][45]:

$$d_k = \frac{4\gamma \cos \Theta}{\Delta p_k} \quad (3.4)$$

Es wird weiterhin angenommen, dass die Oberflächenspannung der Benetzungsflüssigkeit γ und der Benetzungswinkel Θ im gesamten Medium konstant sind. Der Volumenstrom V_i durch alle Poren des Durchmessers d_i und der Porenanzahl n_i lässt sich unter oben genannter Annahme zylindrischer, durchgehender und nicht verzweigter Poren der Länge L bei gegebenem Differenzdruck Δp_k nach Hagen-Poiseuille berechnen zu [66]:

$$\dot{V}_i = n_i \frac{d_i^4 \pi \Delta p_k}{128 \mu L} \quad (3.5)$$

Für den Gesamtvolumenstrom durch das trockene Medium gilt dann:

$$\dot{V}_{trocken}(\Delta p_k) = \sum_{j=1}^{\infty} n_j \frac{d_j^4 \pi \Delta p}{128 \mu L} = \frac{\pi \Delta p}{128 \mu L} \sum_{j=1}^{\infty} n_j d_j^4 \quad (3.6)$$

Mit dem nach Gleichung 3.4 dem Differenzdruck Δp_k entsprechenden Porendurchmesser d_k lässt sich der Volumenstrom durch das gesättigte Medium bei diesem Differenzdruck darstellen zu:

$$\dot{V}_{gesättigt}(\Delta p_k) = \frac{\pi \Delta p_k}{128 \mu L} \sum_{j=k}^{\infty} n_j d_j^4 \quad (3.7)$$

Dann ist es möglich, aus dem Verhältnis der Volumenströme durch das trockene und gesättigte Medium $\dot{V}_{trocken}$ und $\dot{V}_{gesättigt}$ beim jeweiligen Druck Δp_k den Wert für die kumulative Verteilung Q_4 zu berechnen:

$$Q_4(d_k) = \frac{\sum_{j=1}^k n_j d_j^4}{\sum_{j=1}^{\infty} n_j d_j^4} = 1 - \frac{\dot{V}_{gesättigt}(\Delta p_k)}{\dot{V}_{trocken}(\Delta p_k)} \quad (3.8)$$

Das in dieser Arbeit verwendete Kapillarflussporometer ist der von Kolb et al. [40] entwickelte Laborprototyp. Als Benetzungsflüssigkeit wurde aufgrund seiner guten Benetzungseigenschaften und seines niedrigen Dampfdrucks Silikonöl (WACKER®AK 5, Wacker Chemie AG) verwendet. Das Verdrängungsfluid war Luft. Zur Durchführung der Porometrie wurde eine trockene Probe des zu vermessenden Mediums mit einem effektiven Probedurchmesser von 14 mm zunächst unter steigendem Differenzdruck durchströmt und der Volumenstrom aufgezeichnet. Jede Druckstufe wurde dabei zwei Minuten gehalten. Anschließend wurde das Medium mit ca. 200 μl Silikonöl gesättigt, so dass der Flüssigkeitsspiegel ca. 1 mm über dem Medium stand. Anschließend wurde der Druck sehr langsam erhöht bis zur Bildung der ersten Luftblase über dem Medium (Bubble Point), woraufhin der Druck wieder stufenweise erhöht und der Volumenstrom aufgezeichnet wurde. Die kumulative Porendurchmesserverteilung konnte aus den Verhältnissen der Volumenströme nach Gleichung 3.8 berechnet werden.

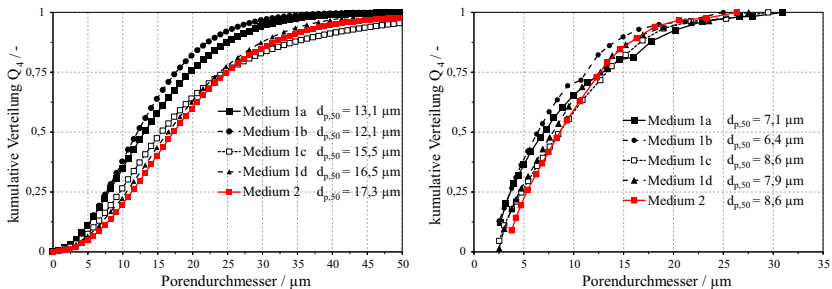


Abbildung 3.6: Kumulative Porendurchmesserverteilung der fünf untersuchten Medien, gewonnen aus μCT Daten (links) und Kapillarflussporometrie (rechts).

Abbildung 3.6 zeigt die kumulativen Porengrößenverteilungen der bereits oben erwähnten Medien 1a-d und Medium 2 gewonnen aus μCT Daten (links) und

der Kapillarflussporometrie (rechts). Da der Berechnung der Porendurchmesser bei beiden Methoden unterschiedliche Auffassungen von der Porengeometrie zugrunde liegen, sind die Unterschiede bezüglich der mittleren Porendurchmesser beider Methoden zu erwarten. Qualitativ verhalten sich allerdings die Mediane der Porendurchmesserverteilungen der Medien untereinander recht ähnlich. Aufgrund der ähnlichen, bzw. im Falle der Medien 1a-d identischen Faserzusammensetzungen, sind recht ähnliche Porengrößenverteilungen der Medien zu erwarten. Insbesondere die Kapillarflussporometrie liefert recht eng beieinander liegende mittlere Porendurchmesser zwischen $6,4 \mu\text{m}$ für Medium 1b und $8,6 \mu\text{m}$ für die Medien 1c und 2. Aufgrund der Verfügbarkeit und einfachen und schnellen Durchführung wurde zur Porendurchmesserbestimmung im Folgenden ausschließlich die Kapillarflussporometrie verwendet.

3.1.2 Bestimmung meso- und makroskaliger Medienparameter

Neben den Eigenschaften ihrer mikroskaligen Bestandteile können Medien auch über diskrete Merkmale im Größenbereich ab etwa 1 mm sowie über globale Eigenschaften charakterisiert werden. Diese Eigenschaften sollen im Folgenden als meso- und makroskalige Medienparameter bezeichnet werden. Dazu gehören einerseits die wichtigsten Medieneigenschaften, welche in der Regel in technischen Datenblättern enthalten sind, wie Flächengewicht, Lagendicke und Porosität, aber auch schwer quantifizierbare Eigenschaften wie die Oleo-/Hydrophobizität oder Medienhomogenität. Die Methoden zur Bestimmung von Porosität und Lagendicke sind in Abschnitt 2.2 erläutert.

Bestimmung der Benetzbarkeit nach ISO 14419

Da die Benetzbarkeit von Medien ein wesentlicher Faktor für die Verteilung von Öl in Koaleszenzfiltern ist, ist eine Charakterisierung der Oleophobizität von Medien über die bloßen Attribute "benetzend" und "nicht-benetzend" hinaus zweckmäßig. Prinzipiell lässt sich für Textiloberflächen ein Kontaktwinkel analog zu glatten, ebenen Oberflächen bestimmen. Die Struktur einer Oberfläche hat jedoch maßgeblichen Einfluss auf den augenscheinlichen Kontaktwinkel einer Flüssigkeit auf dieser Oberfläche [79] [11]. Die Klassifizierung von faserigen Filtermedien als "superoleophob" oder "superoleophil" über den bloßen Kontaktwinkel eines Öltropfens auf der Medienoberfläche, wie sie in einigen Arbeiten verwendet wird [76] [51], ist daher irreführend, da die Benetzbarkeit

der Medienoberfläche nicht getrennt von der Medienstruktur betrachtet werden kann. In der industriellen Anwendung ist die Klassifizierung der Benetzbarkeit von Filtermedien nach Kontaktwinkel nicht üblich. Die Prüfung der Ölbeständigkeit von Textilien mit Hilfe von Kohlenwasserstoffen nach DIN EN ISO 14419 bietet hier eine simple Möglichkeit zur Zuordnung eines Oleophobizitätsgrades [25]. Der eigentliche Anwendungsbereich der Norm ist die Ermittlung der Beständigkeit von Textilien gegen Ölflecken, die Methodik erlaubt aber auch eine einfache und schnelle Abschätzung der Nicht-Benetzbarkeit von Filtermedien. Zur Prüfung werden Tropfen verschiedener Prüflüssigkeiten (siehe Tabelle 3.1) auf die Medienoberfläche aufgebracht und nach 30 Sekunden visuell die Ausbreitung der Tropfen beurteilt. Der Oleophobizitätsgrad leitet sich von der höchsten Nummerierung der Prüflüssigkeit ab, welche nicht vom Medium absorbiert wird. Wird nur ein Teil der Tropfen von dem Material absorbiert, so wird von der Nummerierung 0,5 subtrahiert.

Tabelle 3.1: Prüflüssigkeiten nach DIN EN ISO 14419 mit Eigenschaften.

Prüflüssigkeit	Nummerierung	Oberflächenspannung* / N/m
Keine	0	0
Weißöl	1	0,0315
Weißöl + <i>n</i> -Hexadekan (65:35 Vol-%)	2	0,0296
<i>n</i> -Hexadekan	3	0,0273
<i>n</i> -Tetradekan	4	0,0264
<i>n</i> -Dodekan	5	0,0247
<i>n</i> -Dekan	6	0,0235
<i>n</i> -Oktan	7	0,0214
<i>n</i> -Heptan	8	0,0198

* Bei 25°C

Bildanalyse zur Bestimmung der Vlieshomogenität

Abhängig vom Herstellungsprozess sind Strukturgrößen wie Porosität oder Lagendicke räumlich mal mehr, mal weniger homogen verteilt. Diese strukturelle Inhomogenität äußert sich bei visueller Inspektion der Medien in der sog. Wolkigkeit, d.h. einer ungleichen Verteilung des Fasermaterials, welche in einem inhomogenen Erscheinungsbild oder in sichtbaren Flocken im Material resultiert. Bei der Qualitätskontrolle in der Vliesstoffproduktion sind optische Verfahren zur Prüfung der Homogenität oder zur Erkennung von Materialfehlern bereits Standard. Der Vorteil solcher Verfahren ist ihre zer-

störungsfreie Einsetzbarkeit inline im Herstellungsprozess. In Anlehnung an industrielle Verfahren wurde daher die Medienhomogenität über Bildanalyse von durchleuchteten Medien erfasst. Dazu wurden einzelne Lagen der unbeladenen Medien auf einem Leuchtpult im Durchlicht fotografiert und die Bilder anschließend in ein 8-bit Grauwertformat umgewandelt. Aufgrund der unterschiedlichen Lichtdurchlässigkeit erscheinen etwa Bereiche niedrigerer Porosität oder höherer Dicke dunkler. Das Lambert-Beer'sche Gesetz stellt einen Zusammenhang zwischen Strukturgrößen und Extinktion (und somit der erhaltenen Lichtintensität und damit Grauwert) her, kann jedoch, sofern die Grauwerte einen relativ engen Bereich abdecken, linear approximiert werden. Die Strukturinhomogenität der Medien kann dann über die Verteilung der Grauwerte bewertet werden.

Die einfachste Möglichkeit zur Abschätzung der Medienhomogenität ist die Grauerthistogrammanalyse, welche die relative Häufigkeit des Auftretens einzelner Grauwerte beschreibt. Die Grauwerte von homogenen Texturen liegen innerhalb eines engen Bereiches, während mit zunehmender Inhomogenität die Breite der Verteilung zunimmt. Da jedoch bei der Grauerthistogrammanalyse die räumliche Verteilung der Grauwerte unberücksichtigt bleibt, ist das Verfahren ausschließlich für Medien geeignet, welche über weite Bereiche insgesamt relativ homogen sind. Weiterhin kann keine Aussage über die räumliche Ausdehnung der Inhomogenitäten getroffen werden [61]. Aus diesem Grund wurde eine auf der Fraktalanalyse basierende Methode angewendet.

Die fraktale Geometrie ist ein Teilbereich der Geometrie, welcher sich mit Objekten befasst, deren Hausdorff-Besikowitsch-Dimension höher liegt als ihre topologische Dimension. Diese Objekte zeichnen sich insbesondere durch ihre Skaleninvarianz, bzw. ihre Selbstähnlichkeit aus. Diese Objekte werden als Fraktale bezeichnet und können im Allgemeinen nicht über eine ganzzahlige euklidische Dimension beschrieben werden, sondern über eine gebrochene, bzw. fraktale Dimension [53].

Prinzipiell gibt es unterschiedliche Möglichkeiten eine fraktale Dimension zu definieren. Die wichtigste davon ist die Boxcounting-Dimension, welche mittels einer Überdeckungsmethode, bzw. Boxcounting-Methode bestimmt werden kann. Zur Bestimmung der Boxcounting-Dimension wird das Fraktal, z.B. ein binäres Bild, mit einem Gitter mit einer festen Gitterelementseitenlänge s überdeckt. Es werden jeweils die Anzahl der belegten Gitterelemente/Boxen für

verschiedene Gitterelementseitenlängen s gezählt. Mit der Anzahl an belegten Boxen ergibt sich die Dimension zu:

$$D_{BC} = - \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\log(N_s)}{\log(s)} \quad (3.9)$$

Diese Dimension wird als Minkowski-Bouligand Dimension oder Boxcounting-Dimension bezeichnet. Bei den Gitterelementen können diskrete Boxen oder andere Formen von Überdeckungen, wie etwa sich überschneidende Boxen oder Kreise verwendet werden.

In der Bildanalyse ist eine wesentliche Einschränkung der Boxcounting-Methode, dass sie nicht auf Grauwertbilder angewandt werden kann, da das Zählen nichtleerer Boxen deren Verwendung für binäre Bilder impliziert. Zur Ausweitung der Methode auf Grauwertbilder schlugen Sarkar und Chauhuri die differenzielle Boxcounting-Methode vor [70]. Das Grauwertbild wird bei dieser Methode als 3D Objekt betrachtet, wobei (x, y) die Pixelkoordinate darstellt und (z) den dazugehörigen Grauwert. Auch hier wird das Bild mit einem Gitter überdeckt. Die Gitterelemente/Boxen haben eine quadratische Grundfläche mit der Gitterelementseitenlänge s und die Boxenhöhe s' . Wenn M die Seitenlänge des Bildes in Pixel ist und G ist die Anzahl an verschiedenen Grauwerten im Bild, dann ist der Zusammenhang zwischen s, s', M und G gegeben durch

$$G/s' = M/s \quad (3.10)$$

Die Boxen eines Stapels werden fortlaufend durchnummeriert. Wenn nun der minimale und maximale Grauwert einer Gitterposition (i, j) jeweils in die Boxen mit den Nummern k und l fallen, ist die Anzahl der zu zählenden Boxen für dieses Gitterelement

$$n_s(i, j) = l - k + 1 \quad (3.11)$$

und die Gesamtanzahl an zu zählenden Boxen des Bildes bei einer Gitterelementseitenlänge s

$$N_s = \sum_{i,j} n_s(i, j) \quad (3.12)$$

Eine schematische Darstellung der Methode ist in Abbildung 3.7 gegeben. Als Gitterelementseitenlänge wurde hier $s = 4$ gewählt. Die Nummerierungen der Boxen mit dem maximalen und minimalen Grauwert sind jeweils $l = 3$ und $k = 2$. Über die negative Steigung der Ausgleichsgerade durch die Werte von $\log(N_s)$ über $\log(s)$ lässt sich mit verschiedenen Gitterelementseitenlängen die Boxcounting-Dimension nach Gleichung 3.9 berechnen.

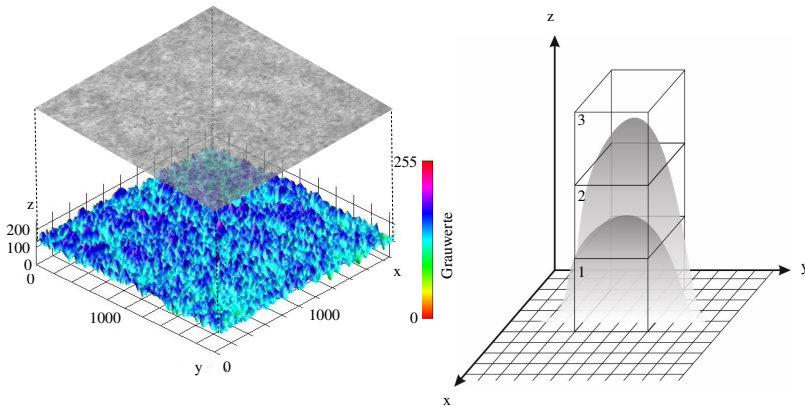


Abbildung 3.7: 3D-Oberflächendiagramm eines Filtermediums mit Grauwerten (links) und schematische Darstellung der differentiellen Boxcounting-Methode anhand eines Gitterelements mit der Seitenlänge $s=4$ (rechts).

Eine weitere Größe, welche ihren Ursprung in der fraktalen Geometrie hat und die räumliche Verteilung von Mustern oder die Textur eines Objektes beschreibt, ist die Lakunarität. Die Lakunarität (aus dem Lateinischen *lacuna* = Lücke, See) ist im Allgemeinen ein Maß für die Translations- und Rotationsinvarianz von Mustern und Objekten. Im Speziellen lässt sich über die Lakunarität die Inhomogenität von Texturen beschreiben. Anwendungen finden sich beispielsweise in Geowissenschaften [65][56], der medizinischen Bildgebung [35], Lebensmittelwissenschaften [74] und Materialwissenschaften [69]. Abbildung 3.8 verdeutlicht die Eignung der Lakunarität zur Beschreibung der Inhomogenität von geometrischen Mustern.

Ähnlich wie die fraktale Dimension kann die Lakunarität mit der Boxcounting-Methode bestimmt werden, im Falle von Grauwertbildern ist dies mit der differentiellen Boxcounting-Methode möglich. Es gibt verschiedene Möglichkeiten zur Berechnung eines Lakunaritätswertes, wobei es keine objektiven Kriterien gibt, welche davon zu bevorzugen ist [72]. Eine einfache Möglichkeit ist, die Lakunarität eines jeden Gitterelements aus der differentiellen Boxcounting-Methode $\lambda_s(i, j)$ als Quadrat des Variationskoeffizienten zu berechnen, welcher

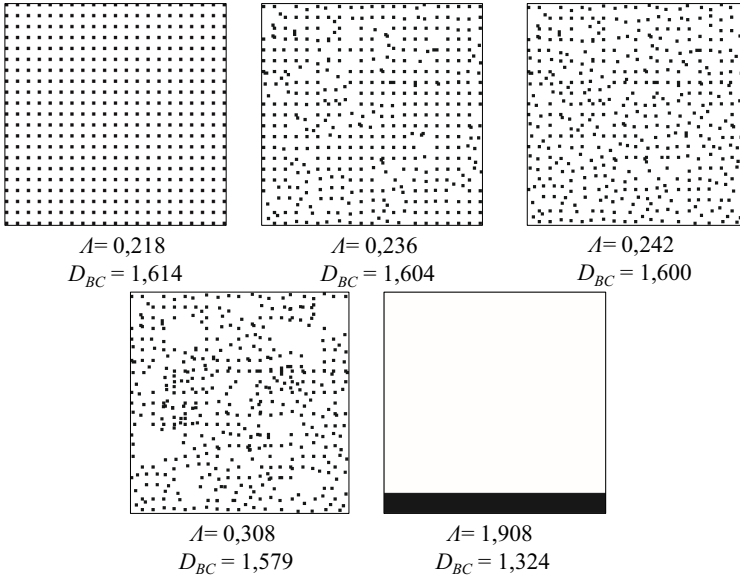


Abbildung 3.8: Lakunarität Λ und fraktale Dimension D_{BC} von Mustern zunehmender Inhomogenität. Die Anzahl an schwarzen und weißen Pixeln ist für sämtliche Muster gleich.

das Verhältnis aus der Standardabweichung $\sigma_s(i, j)$ und dem Mittelwert $\mu_s(i, j)$ ist:

$$\lambda_s(i, j) = \left(\frac{\sigma_s(i, j)}{\mu_s(i, j)} \right)^2 \quad (3.13)$$

Die Lakunarität Λ_s des gesamten Bildes bei einer festgelegten Gitterelementseitenlänge s lässt sich anschließend bei einer Gesamtanzahl an m Gitterelementen als Durchschnitt über alle Gitterelemente berechnen:

$$\Lambda_s = \frac{\sum_{i,j} \lambda_s(i, j)}{m} \quad (3.14)$$

Die Lakunarität Λ lässt sich über eine Anzahl an S betrachteten Gitterelementseitenlängen als Schnitt aller Λ_s berechnen:

$$\Lambda = \frac{\sum_s \Lambda_s}{S} \quad (3.15)$$

Zur Bestimmung der Lakunarität aus Durchlichtbildern der vorliegenden Filtermedien wurde ein differenzieller Boxcounting-Algorithmus mit diskreten Gitterelementen mit quadratischer Grundfläche in MATLAB® implementiert. Die Anzahl an Gitterelementseitenlängen wurde dabei auf insgesamt 12 festgelegt, um zuverlässige Ergebnisse in geringer Rechenzeit zu erhalten. Bei der Wahl der Gitterelementseitenlängen wurden die Größen der Inhomogenitäten (z.B. Flocken/Einschlüsse) und die Größenbereiche, in denen sich Transportmechanismen in Filtermedien abspielen, mit berücksichtigt.

Zur Validierung der Methode wurden zunächst drei oleophile Medien (siehe Tabelle 2.1) ausgesucht, welche sich bei rein visueller Inspektion signifikant in ihrer Homogenität unterschieden. Die Wahl fiel auf die Medien Phil(mf2), Phil(f) und Phil(inho). Zusätzlich wurden zwei weitere Medien, im Folgenden als Phil(SM1) und Phil(SM2) bezeichnet, auf einem Sieb selbst nassgelegt. Da Medien vom Blattbildner und der Nassvliesanlage tendenziell zu einer ausgeprägten Strukturhomogenität, d.h. zu einer räumlich gleichmäßigen Verteilung des Fasermaterials, neigen, wurden zwei stark inhomogene Lagen auf einem Sieb unter geringer Wasserzugabe und ungleichmäßigem Ablegevorgang hergestellt. Für Phil(SM1) und Phil(SM2) wurden jeweils eine Lage Phil(mf2) in einem Mixer zerhäckselt und zusammen mit einer Phil(mf2) nachempfundenen Glasfasermischung in Wasser dispergiert. Für Phil(SM1) wurden einige Flocken Phil(mf2) nachträglich zugegeben, während für Phil(SM2) einige Ausschnitte im Größenbereich von 1-2 mm beigegeben wurden. Da der Herstellungsprozess dieser beiden Medien nicht kontrolliert genug war, um mehrere Lagen mit gleichen Eigenschaften herzustellen, konnten Porosität, Dicke und Porengrößenverteilung dieser Medien nicht bestimmt werden.

Abbildung 3.9 zeigt Durchlichtbilder der drei kommerziellen sowie der beiden selbsthergestellten Medien. Hier sind die Unterschiede zwischen den drei Medien deutlich sichtbar: Phil(mf2) ist äußerst homogen, Phil(f) ist deutlich wolkiger, Phil(inho) hat zusätzlich sichtbare Einschlüsse/Flocken im Material. Die beiden selbsthergestellten Medien weisen eine noch ausgeprägtere Wolkigkeit und größere Flocken/Einschlüsse auf.

Zunächst war für die fünf vorliegenden Medien der Größenbereich der Gitterelementseitenlängen zu bestimmen, bei dem Inhomogenitäten zuverlässig

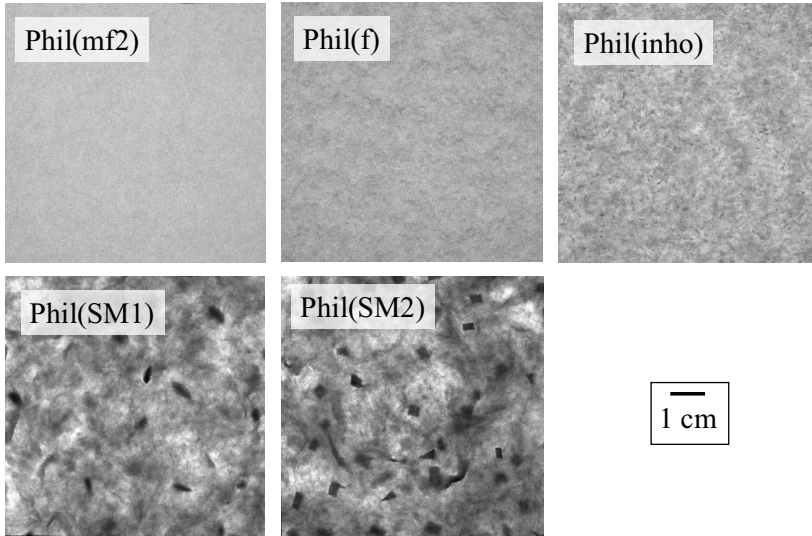


Abbildung 3.9: Durchlichtbilder der Medien Phil(mf2), Phil(f), Phil(inho), Phil(SM1) und Phil(SM2) (je eine Lage).

erfasst werden. Dafür wurde der in Abschnitt 3.1.2 vorgestellte Boxcounting-Algorithmus für die Durchlichtbilder der fünf Medien für Gitterelementseitenlängen zwischen $M/48$ und M bei einer Bildgröße von $M \times M = 1936 \times 1936$ Pixeln verwendet. Abbildung 3.10 zeigt die errechnete Lakunarität über Gitterelementseitenlänge für die fünf betrachteten Medien. Die Medien Phil(mf2) und Phil(f), welche auf größeren Skalen homogen sind, zeigen einen vergleichsweise konstanten Verlauf der Lakunarität über der Gitterelementseitenlänge. Nähern sich die Gitterelementseitenlängen den Größen der Inhomogenitäten an, so nimmt die Lakunarität ab, das wird insbesondere deutlich für Gitterelementseitenlängen < 500 Pixel für die beiden selbsthergestellten Medien Phil(SM1) und Phil(SM2) sowie für Gitterelementseitenlängen < 200 Pixel für das Medium Phil(inho). Für die hier verwendeten Medien war ein Größenbereich von $M/4$ bis $M/2$ ausreichend, um die Medien ausreichend differenzierend zu charakterisieren. Für andere Medien bzw. zur Charakterisierung von Inhomogenitäten anderer Größenbereiche ist gegebenenfalls ein entsprechend angepasster Größenbereich zu wählen.

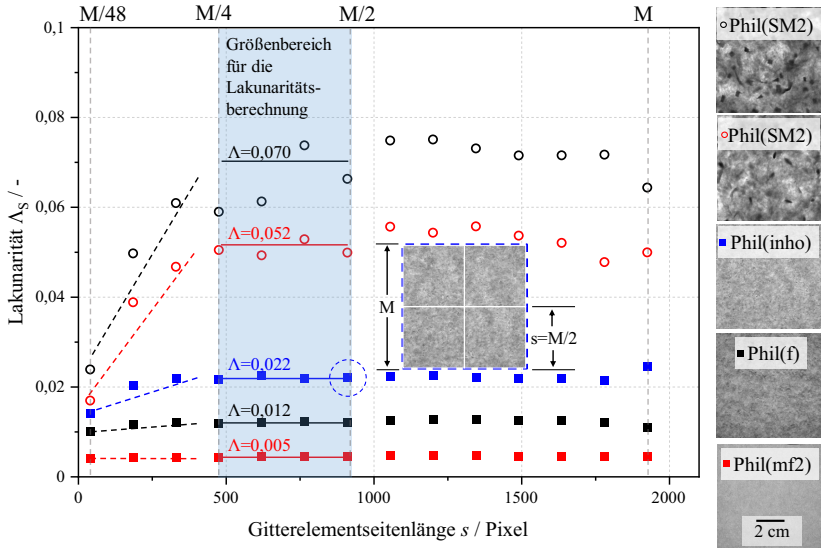


Abbildung 3.10: Lakunarität über Gitterelementseitenlänge für Durchlichtbilder für fünf verschiedene Medien.

Für den Größenbereich von $M/4$ bis $M/2$ enthält Abbildung 3.10 die mit dem Boxcounting-Algorithmus errechneten Lakunaritäten. Das Durchlichtbild des augenscheinlich homogensten Mediums Phil(mf2) weist mit einer Lakunarität von $\Lambda = 0,005$ den niedrigsten Wert auf. Die Lakunarität steigt für Phil(f), welches deutlich wolkiger ist als Phil(mf2) auf $\Lambda = 0,012$ und für Phil(inho), welches zusätzlich zur Wolkigkeit kleine Flocken und Einschlüsse aufweist auf $\Lambda = 0,022$. Die Lakunaritäten der beiden selbsthergestellten Medien liegen mit $\Lambda = 0,052$ und $\Lambda = 0,070$ noch einmal deutlich darüber. Neben einer deutlich erhöhten Wolkigkeit liegt hier die Ursache in den größeren Flocken und Einschlüssen.

Neben der Lakunarität wurde für die fünf Medien zusätzlich die Boxcounting-Dimension mit dem gleichen Gitterelementgrößenbereich von $M/4$ bis $M/2$ bestimmt. Abbildung 3.11 zeigt Durchlichtbilder der fünf charakterisierten Medien mit den zugehörigen Boxcounting-Dimensionen und Lakunaritäten. Zusätzlich ist der Logarithmus der bestimmten Anzahl an Boxen über dem Logarithmus der Gitterelementseitenlängen aufgetragen. Es zeigt sich, dass für

die drei extern bezogenen Medien die fraktale Dimension gut mit der wahrgenommenen Homogenität (bzw. mit der Lakunarität der drei Medien) korreliert. Allerdings fällt hier die bestimmte fraktale Dimension des Mediums Phil(SM1) aus dem Raster, während Phil(SM2) erwartungsgemäß die höchste fraktale Dimension aufweist. Die Ursache für diese Abweichung liegt vermutlich in den unterschiedlichen Größen der Inhomogenitäten begründet. Diese bewegen sich etwa für das Medium Phil(inho) im Größenbereich von ca. 1 mm (Flocken o.ä.), während die Einschlüsse der beiden selbsthergestellten Medien bis ca. 7 mm groß waren.

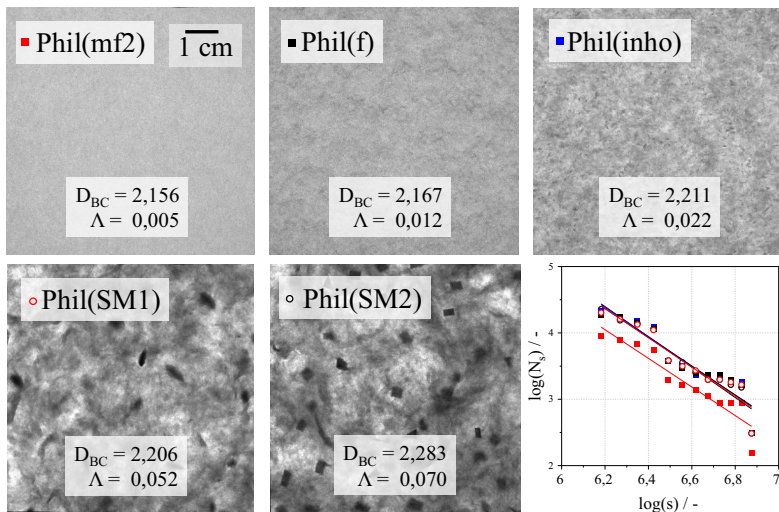


Abbildung 3.11: Durchlichtbilder der Medien Phil(mf2), Phil(f), Phil(inho), Phil(SM1) und Phil(SM2) (je eine Lage) mit berechneter Boxcounting-Dimension und Lakunarität. Die Anzahl der Boxen über dem Logarithmus der Gitterelementseitenlänge ist unten rechts gegeben.

Die Auswertung zeigt, dass die fraktale Dimension alleine nur begrenzt Auskunft über die Inhomogenität von Filtermedien geben kann. Allerdings war eine ausreichende Korrelation zwischen wahrgenommener Inhomogenität und fraktaler Dimension gegeben, wenn kommerzielle und selbstgemachte Medien getrennt betrachtet wurden, möglicherweise aufgrund der unterschiedlichen Größen der betrachteten Inhomogenitäten. Für sämtliche betrachtete Medien, sowohl selbsthergestellt als auch extern bezogen, gab es hingegen einen deutlichen Zusammenhang zwischen wahrgenommener Inhomogenität und dem

Wert für die Lakunarität. Aufgrund des geringen messtechnischen Aufwands, der einfachen Programmierung und der Umsetzbarkeit auch als inline Messverfahren während der Produktion, ist die Bestimmung der Lakunarität aus Durchlichtaufnahmen eine geeignete Methode zur zuverlässigen Bestimmung der Vlieshomogenität.

4 Einfluss von Medienstruktur und -benetzbarkeit auf das Betriebsverhalten

4.1 Einfluss mikroskaliger Strukturgrößen auf das Betriebsverhalten von Ölnebelfiltern

In diesem Kapitel soll der Einfluss der in Kapitel 3.1.1 aufgeführten mikroskaligen Medienstrukturgrößen Faser- und Porendurchmesser (Medien mit Faserorientierung in Strömungsrichtung konnten nicht hergestellt werden) erläutert werden. Ein problematischer Aspekt bei der Betrachtung der Strukturgrößeneinflüsse ist, dass einzelne Strukturgrößen bei der Herstellung nicht unter Beibehaltung aller anderen Größen variiert werden können. Die isolierte Betrachtung des Einflusses einzelner Strukturgrößen ist somit nicht möglich. Wie Porendurchmesser und Feinstfaseranteil in der Herstellung in Zusammenhang stehen, soll ebenfalls erläutert werden.

4.1.1 Feinstfaseranteil

Glasfaserfiltermedien bestehen in der Regel aus Mischungen von Fasern unterschiedlichsten Durchmessers. Dabei dienen grobe Fasern der mechanischen Stabilität des Filtermediums, während feine Fasern die Abscheidung von Partikeln verbessern.

Als Grundlage für die Untersuchung des Einflusses des Feinstfaseranteils auf Differenzdruckverlauf und Abscheidegrad wurde eine laut Hersteller für kommerzielle Medien typische Fasermischung verwendet. Mikroglasfasern aus B-Glas mit einem nominellen Durchmesser von $0,65\ \mu\text{m}$ wurden in unterschiedlichen Mengenanteilen einer festen Fasermischung zugegeben. In der festen Fasermischung waren dabei Fasern in folgenden Anteilen enthalten:

- $0,53\ \mu\text{m}$ (B-Glas Mikroglasfasern): 4,3 Ma.-%
- $0,65\ \mu\text{m}$ (E-Glas Strangfasern): 22,4 Ma.-%
- $1,48\ \mu\text{m}$ (B-Glas Mikroglasfasern): 6,4 Ma.-%
- $2,44\ \mu\text{m}$ (B-Glas Mikroglasfasern): 13,8 Ma.-%
- $3,20\ \mu\text{m}$ (B-Glas Mikroglasfasern): 52,1 Ma.-%

Die vier Medien nach eingesetzten Medien mit ihren wichtigsten Eigenschaften sind in Tabelle 4.1 gelistet. Sämtliche Medien wurden auf einem Blattbildner ohne Zugabe von Binder hergestellt und waren oleophil.

Tabelle 4.1: Eigenschaften der vier verwendeten Medien unterschiedlichen Feinstfaseranteils.

Medium	Anteil 0,65 μm Fasern	Lagendicke / mm	Porosität / -	Flächengewicht / g/m^2
grob	0,0 Ma.-%	0,60	0,95	78
mittelgrob	3,0 Ma.-%	0,68	0,95	78
mittelfein	6,0 Ma.-%	0,68	0,95	82
fein	15,0 Ma.-%	0,58	0,95	78

* E-Glas Strangfasern

Zunächst wurde mittels Kapillarflussporometrie untersucht, wie der Feinstfaseranteil die Porengrößenverteilung der Medien beeinflusst. Die erhaltenen Porengrößenverteilungen der vier verwendeten Medien sind in Abbildung 4.1 zu sehen. Die Mediane der Porendurchmesser liegen zwischen 5,1 und 11,5 μm und steigen mit abnehmendem Feinstfaseranteil. Dies ist vor allem in Hinblick auf den Differenzdrucksprung bei der Filmbildung von Bedeutung, da dieser als Kapillarphänomen maßgeblich vom Porendurchmesser abhängt.

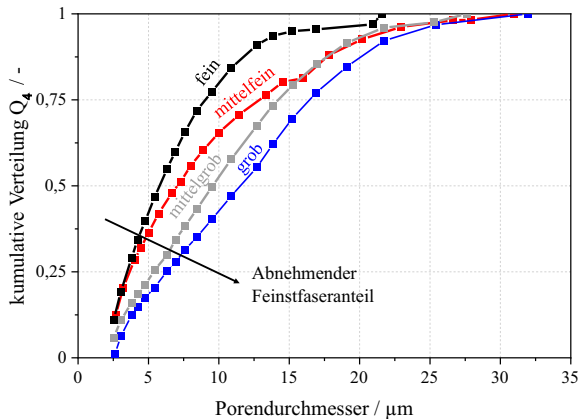
**Abbildung 4.1:** Kumulative Porengrößenverteilungen der vier verwendeten Medien mit unterschiedlichem Feinstfaseranteil.

Abbildung 4.2 (links) zeigt die Differenzdruckverläufe abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks von Sechslagenpaketen der vier getesteten Medien unterschiedlichen Feinstfasergehalts über der kumulativen Ölmasse. Hinsichtlich des Differenzdruckanstiegs im Bereich der Kanalbildung sind signifikante Unterschiede zwischen dem groben und mittelgroben Medium auf der einen und dem mittelfeinen und feinen Medium auf der anderen Seite zu erkennen.

Der Anstieg des Differenzdruckes im Kanalbereich ist jeweils beim groben und mittelgroben sowie beim feinen und mittelfeinen Medium etwa gleich. Wie aufgrund der unterschiedlichen Porendurchmesserverteilungen (siehe nä. Kapitel) zu erwarten, gibt es deutliche Unterschiede bei dem Differenzdrucksprung infolge der Filmbildung, welcher mit zunehmendem Feinstfaseranteil steigt. Zudem wird der quasistationäre Zustand bei geringeren kumulativen Ölmassen erreicht.

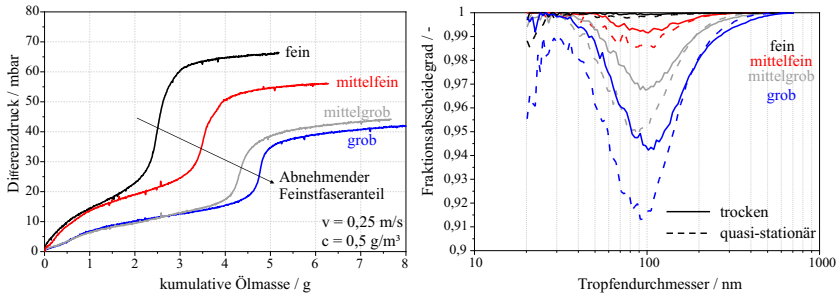


Abbildung 4.2: Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdruckes über kumulativer Ölmasse (links) sowie Fraktionsabscheidegrade (rechts) für Filterpakete bestehend aus jeweils sechs Lagen vier verschiedener Medien mit unterschiedlichem Feinstfaseranteil.

Die Fraktionsabscheidegrade der einzelnen Medien (Abbildung 4.2 rechts) steigen mit steigendem Feinstfaseranteil über sämtliche betrachteten Tropfengrößen. Dieses Verhalten ist in der steigenden Kollektorfläche mit steigendem Feinstfaseranteil begründet.

4.1.2 Porengrößenverteilung

Der Sprung des Differenzdruckes bei der Beladung mit Öl ist als Kapillarphänomen nach dem Kanal-Film-Modell im Wesentlichen von Kontaktwinkel und Porendurchmesser abhängig. Faservliese verfügen nicht über diskrete einzelne Poren, sondern über einen Porenraum bestehend aus zahlreichen miteinander verbundenen Poren. Zur Bestimmung der Porendurchmesser müssen Annahmen bezüglich der Porengeometrie getroffen werden. Aufgrund ihrer einfachen Anwendbarkeit wurde die Kapillarflussporometrie (siehe Kapitel 3.1.1) verwendet, bei der zur Berechnung der Porendurchmesserverteilung die Annahme zylindrischer, durchgehender und diskreter Poren getroffen wird. Da der Porendurchmesser in den Medien als verteilte Größe vorliegt, soll im Folgenden der

Median der Porendurchmesserverteilung als maßgebliche Größe verwendet werden. Es ist davon auszugehen, dass mit feinerer Porenstruktur der Differenzdrucksprung zunehmen sollte. Dies konnte u.a. von Chen et al. auch so beobachtet werden [16], welche zudem einen Anstieg des Δp_{Kanal} mit sinkendem Porendurchmesser verzeichneten. Da die eingesetzten Medien unterschiedliche Lagendicken sowie Porositäten aufwiesen, ist der Zusammenhang des Δp_{Kanal} speziell mit der Porengröße in Frage zu stellen.

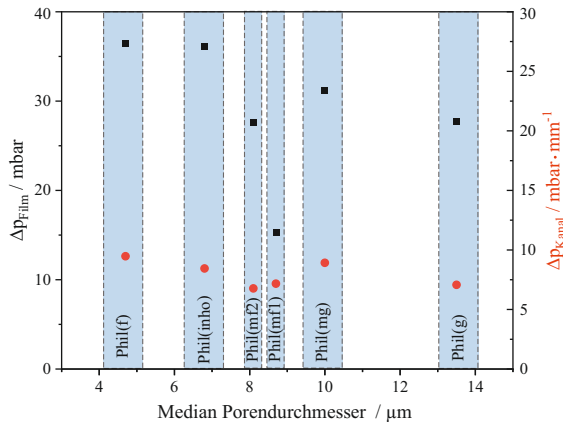


Abbildung 4.3: Drucksprung durch Filmbildung und Differenzdruckzunahme pro Millimeter Mediendicke durch Kanalbildung für die kommerziell eingesetzten benetzbaren Medien, welche in dieser Arbeit verwendet wurden.

Im Laufe der vorliegenden Arbeit wurden zahlreiche Medien mittels Kapillarflussporometrie hinsichtlich ihrer Porengrößenverteilung charakterisiert und auf ihre Betriebseigenschaften geprüft. Aufgrund der unterschiedlichen Faserzusammensetzungen und Benetzbarkeiten ist eine gesonderte Betrachtung des Einflusses der Porengrößen auf das Betriebsverhalten nicht möglich. Abbildung 4.3 zeigt die Höhe des Drucksprunges durch Filmbildung sowie die Differenzdruckzunahme pro Millimeter Mediendicke durch Kanalbildung für die sechs in dieser Arbeit eingesetzten kommerziell verfügbaren, benetzbaren Medien. Um einen zusätzlichen Einfluss des Oleophobisierungsgrades auf die abgebildeten Größen auszuschließen, wurden lediglich benetzbare Medien für den Vergleich betrachtet. Die einzelnen Differenzdruckkomponenten wurden grafisch aus den Differenzdruckkurven ermittelt (analog zu Kolb et al.[42]). Es

zeigt sich eine Abnahme des Differenzdrucksprunges mit steigender Porengröße, während das Δp_{Kanal} pro mm Mediendicke annähernd konstant bleibt. Allerdings zeigen sich bei der Ermittlung der einzelnen Differenzdruckkomponenten zwei wesentliche Probleme: Zum einen zeigen manche Medien einen sehr steilen und klar abgegrenzten Sprung, während andere einen langezogenen, abflachenden Sprung aufweisen. Zum anderen weisen einige Medien einen "Erste-Lagen-Effekt" auf (siehe Kapitel 4.2.2), welcher signifikant zum Δp_{Kanal} beiträgt.

4.2 Einfluss meso- und makroskaliger Strukturgrößen auf das Betriebsverhalten von Ölnebelfiltern

4.2.1 Benetzbarkeit

Wie in Kapitel 1.2 erläutert, ist die Benetzbarkeit eines Fasermediums mit einer Flüssigkeit in hohem Maße von dessen Struktur abhängig, während wiederum der Kontaktwinkel auf einzelnen Fasern vom Faserdurchmesser abhängt. Um den Einfluss der Benetzbarkeit evaluieren zu können, sind Versuche an Medien gleicher Struktur jedoch unterschiedlich ausgeprägter Oleophobizität (d.h. mit unterschiedlichem Oleophobizitätsgrad) nötig. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit nur eingeschränkt gelungen. Im Folgenden werden zum einen ein benetzbares und nicht-benetzbares Medium gleicher Struktur miteinander verglichen. Zum anderen werden zwei Medien betrachtet, welche aus einer Mischung grober und feiner Fasern bestehen, wobei jeweils ein Anteil oleophob war, der andere oleophil.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte keine oleophobe Ausrüstung von Medien bei gleicher Struktur jedoch unterschiedlichen Oleophobizitätsgraden (etwa durch Behandlung mit Lösungen perfluorierter Alkylverbindungen unterschiedlicher Konzentration) erreicht werden. Daher wurden als Grenzfälle das Medium Phil(mf2) in der Standardvariante (vollständig benetzbar; Oleophobizitätsgrad nach DIN EN ISO 14419: 0) und eine Variante, die in einem CVD-Verfahren oleophobisiert wurde (Phob(mf2); Oleophobizitätsgrad nach DIN EN ISO 14419: 5), gewählt. Mittels Kapillarflusssporometrie wurde sichergestellt, dass sich die Porenstruktur des Mediums durch das CVD-Verfahren im Wesentlichen nicht

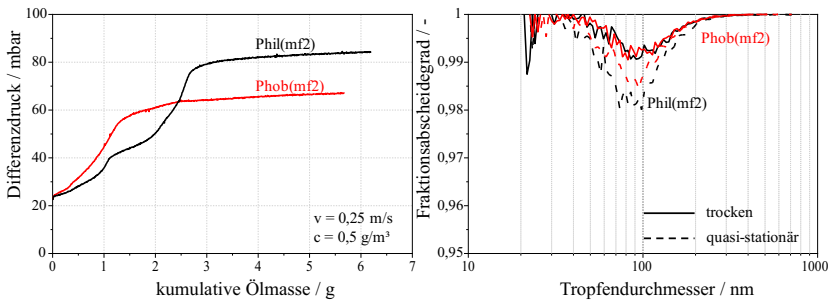


Abbildung 4.4: Differenzdruck über kumulativer Ölmasse (links) sowie Fraktionsabscheidegrade (rechts) für jeweils sechs Lagen eines benetzbaren (Phil(mf2)) und eines nicht-benetzbaren Mediums (Phob(mf2)) gleicher Struktur.

geändert hatte. Anschließend wurden Filterpakete bestehend aus jeweils 6 Lagen jeden Mediums im Filtermedienprüfstand hinsichtlich ihrer Betriebs-eigenschaften vermessen. Die Differenzdruckverläufe und Fraktionsabscheidegrade der beiden Filterpakete sind in Abbildung 4.4 (links) dargestellt. Der Anfangsdruckverlust ist für beide Filterpakete nahezu identisch und die Differenzdrucksprünge durch die Filmbildung betragen etwa 30 mbar. Deutliche Unterschiede zeigen sich jedoch im Differenzdruckanstieg durch Kanalbildung, bzw. im Falle des benetzbaren Mediums zu Beginn des Betriebs. Dies kann auf die unterschiedlichen Mechanismen zurückgeführt werden, welche bei benetzbaren und nicht-benetzbaren Medien zur Bildung von Flüssigkeitskanälen führen. Während es beim oleophoben Medium zunächst anströmseitig zur Bildung des Films kommt, welcher bei ausreichend hohem Druck stellenweise in das Medium hinein gedrückt wird, bilden sich die Kanäle im benetzbaren Medium durch Akkumulation von Öl in Bereichen der vordersten Filterlage. Dabei kann es zu einem ausgeprägten "erste-Lage-Effekt" kommen, welcher in der Differenzdruckkurve bis ca. 1 g kumulativer Ölmasse sichtbar wird. Dieser Aspekt wird in Kapitel 4.2.2 näher betrachtet und soll deshalb hier zunächst nicht erörtert werden. Dieser Einlaufeffekt macht einen Großteil der Druckverlustdifferenz zwischen beiden Medien im quasistationären Zustand aus.

Da davon auszugehen ist, dass sich bei nicht-benetzbaren Medien die Kanäle durch Penetration des Films in offene Bereiche bilden, ist hier eine geringere Differenzdruckzunahme zu erwarten als bei benetzbaren Medien, wo sich die Kanäle mutmaßlich in dichteren Bereichen bilden (dazu siehe Kapitel 4.2.2).

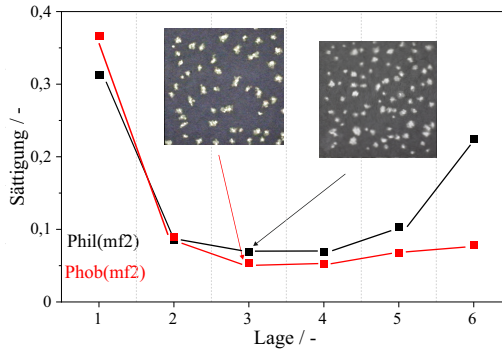


Abbildung 4.5: Einzellagensättigungen und Durchlichtbilder jeweils einer Kanallage für ein benetzbares (Phil(mf2)) und ein nicht-benetzbares Medium (Phob(mf2)) gleicher Struktur.

Beim Übergang vom trockenen in den quasistationären Zustand nimmt zudem der Fraktionsabscheidegrad des benetzbaren Standardmediums stärker ab als bei der oleophoben Variante (siehe Abbildung 4.4 rechts). Auch hier kann die Bildung von Kanälen in größeren Bereichen des oleophoben Mediums als Erklärung herangezogen werden. Im trockenen Zustand hingegen sind keine signifikanten Unterschiede im Fraktionsabscheidegrad erkennbar. Die Benetzbarkeit des Mediums wirkt sich also nicht unmittelbar auf die Abscheidung aus. Unterschiede im Abscheidegrad, wie z.B. von Chen et al. [14] festgestellt, sind also vermutlich wie im vorliegenden Fall ausschließlich auf die unterschiedliche Verteilung des Öls im Medium im beladenen Zustand zurückzuführen (welche jedoch im Falle der beiden hier betrachteten Medien recht ähnlich war, dazu siehe Abbildung 4.5).

Bei der Untersuchung von Medien gemischter Benetzbarkeitseigenschaften lag der Fokus bisheriger Arbeiten auf oleophobisierten, größeren, zusammenhängenden Teilbereichen von Medien [77][78]. Für diese Arbeit wurden zwei Medien gleicher Faserdurchmesserzusammensetzung auf einem Blattbildner hergestellt. Beide Medien bestanden dabei aus groben Fasern des nominellen Durchmessers $3,2 \mu\text{m}$ sowie aus feinen Fasern des nominellen Durchmessers $0,65 \mu\text{m}$ im Masseverhältnis 60:40. Bei dem Medium GrobPhobM wurden die groben Fasern vor der Blattbildung oleophobisiert, während dies bei dem Medium FeinPhobM für die feinen Fasern der Fall war. Direkt nach der Blattbildung wurde auf die Medien im nassen Zustand Binder appliziert. Von beiden Medien

wurden Lagenpakete von jeweils sechs Lagen hinsichtlich ihrer Betriebseigenschaften vermessen.

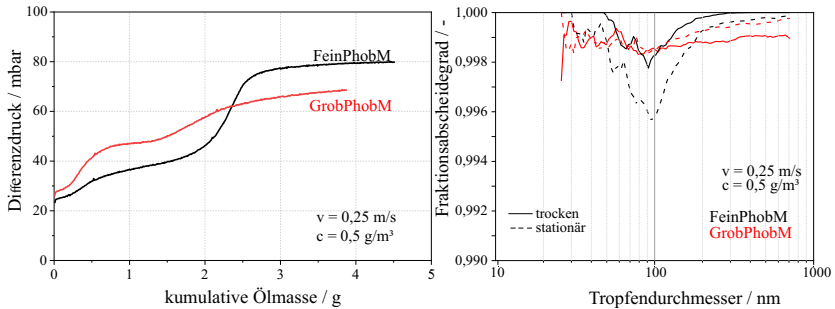


Abbildung 4.6: Differenzdruck über kumulativer Ölmasse (links) sowie Fraktionsabscheidegrade (rechts) für sechs Lagen eines Mediums mit oleophobisiertem Grobfaseranteil (GrobPhobM) und eines Mediums mit oleophobisiertem Feinfaseranteil (FeinPhobM) bei ansonsten gleicher Faserzusammensetzung.

Abbildung 4.6 (links) zeigt die Entwicklung des Differenzdrucks über aufgebener Ölmasse für beide Filter. Die unterschiedlichen Anfangsdifferenzdrücke haben ihre Ursache in der unterschiedlichen Lagendicke der beiden Medien (die Porendurchmesser-Verteilung beider Medien ist sehr ähnlich, dazu siehe Abbildung 4.7 rechts). Darüber hinaus unterscheidet sich der qualitative Verlauf der beiden Kurven deutlich. Während FeinPhobM einen für oleophile Medien typischen Kurvenverlauf aufweist, zeigt GrobPhobM ein Verhalten, das eher untypisch für rein oleophile oder oleophobe Medien ist. Der Differenzdruckanstieg zu Beginn impliziert die Bildung eines Films an der Anströmseite und geht in einen äußerst flachen Kanalbereich über (ca. 0,8 bis 1,3 g kumulativer Ölmasse), auf den wiederum ein steilerer, jedoch zunehmend abflachender Differenzdruckanstieg folgt. Hinsichtlich der Fraktionsabscheidegrade (Abbildung 4.6 rechts) fällt auf, dass sich dieser für GrobPhobM im stationären Zustand kaum vom trockenen Medium unterscheidet. Lediglich ein signifikanter Anstieg für Tropfen größer als die MPPS bedingt durch Trägheitsabscheidung an den beiden Filmen ist hier zu sehen. Bei Betrachtung der Einzellagensättigungen (siehe Abbildung 4.7 links) zeigt sich bei beiden Medien ein Verlauf der Sättigung, wie er für oleophile Medien typisch ist. Da bei dem Medium GrobPhobM die Sättigung der letzten Lage deutlich erhöht ist, ist davon auszugehen, dass der Differenzdruckanstieg ab ca. 1,3 g Ölmasse auf eine Filmbildung zurückzuführen ist. Somit erscheint plausibel, dass bei dem Medium GrobPhobM sowohl

auf An- als auch Abströmseite ein Film auftritt. Der dabei jeweils resultierende Sprung im Differenzdruck fällt jedoch im Vergleich zum Medium FeinPhobM so gering aus, dass davon auszugehen ist, dass die Filmabdeckung der Vorder- und Rückseite im Vergleich zum abströmseitigen Film von FeinPhobM deutlich geringer ausfällt. Dies führt zu einer gegenüber dem Medium FeinPhobM verringerten Zunahme des Differenzdrucks, obwohl es zur Bildung von zwei Filmen kommt. Die geringe Zunahme des Differenzdrucks bei der Kanalbildung spiegelt sich auch in der niedrigen Sättigung der Kanallagen wider. Die Oleophobisierung bestimmter Fasern bietet also eine vielversprechende Möglichkeit zur Optimierung des Betriebsverhaltens.

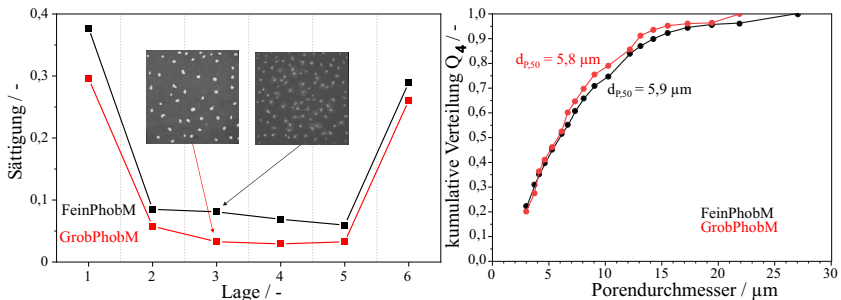


Abbildung 4.7: Einzellagensättigungen und Durchlichtbilder jeweils einer Kanallage (links) sowie Porendurchmesserverteilung (rechts) für ein Medium mit oleophobisiertem Grobfaseranteil (GrobPhobM) und ein Medium mit oleophobisiertem Feinfaseranteil (FeinPhobM) bei ansonsten gleicher Faserzusammensetzung.

4.2.2 Medienhomogenität

Zur Bestimmung des Homogenitätseinflusses wurden die in Kapitel 3.1.2 hinsichtlich ihrer Inhomogenität charakterisierten Medien in Filtrationsversuchen eingesetzt. Da von den Medien Phil(SM1) und Phil(SM2) jeweils nur eine Lage hergestellt werden konnte, wurden zunächst ausschließlich die drei kommerziell verfügbaren Medien Phil(mf2), Phil(f) und Phil(inho) als Sechs-Lagen-Pakete mit einer Anströmgeschwindigkeit von $0,25 \text{ m/s}$ und einer Rohgaskonzentration von $0,5 \text{ g/m}^3$ im Filtermedienprüfstand getestet. Abbildung 4.8 zeigt die resultierenden Differenzdruckverläufe abzüglich des Differenzdruckes des unbeladenen Mediums. Da die Medien u.a. unterschiedliche Lagendicke, Faserzusammensetzung und Porengrößenverteilungen besitzen, sind quantitative

Unterschiede bezüglich der Beladungskurven im Bezug auf die Höhe der einzelnen Druckverlustkomponenten zu erwarten. Allerdings sind darüber hinaus deutliche Unterschiede im Kurvenverlauf erkennbar. Das Medium Phil(inho) zeigt einen dreiteiligen Verlauf, bestehend aus Kanal, Film und quasistationärem Zustand, wie er im Kanal-Film-Modell von Kampa et al. beschrieben ist [37]. Bei den beiden anderen Medien ist jedoch zu Beginn der Beladung (bis ca. 1 g kumulative Ölmasse) ein weiterer mehr oder minder klar abgegrenzter Bereich in der Kurve sichtbar. In der Literatur findet sich dieser Bereich ebenfalls in unterschiedlicher Ausprägung ([18],[75]), auch Kampa et al. vermerkten einen leichten Knick in der Differenzdruckkurve zu Versuchsbeginn. Dieser ist allerdings nicht zu sehen, wenn nur eine einzige Lage eines Mediums verwendet wird (siehe Abschnitt 5.1 und [13],[12]).

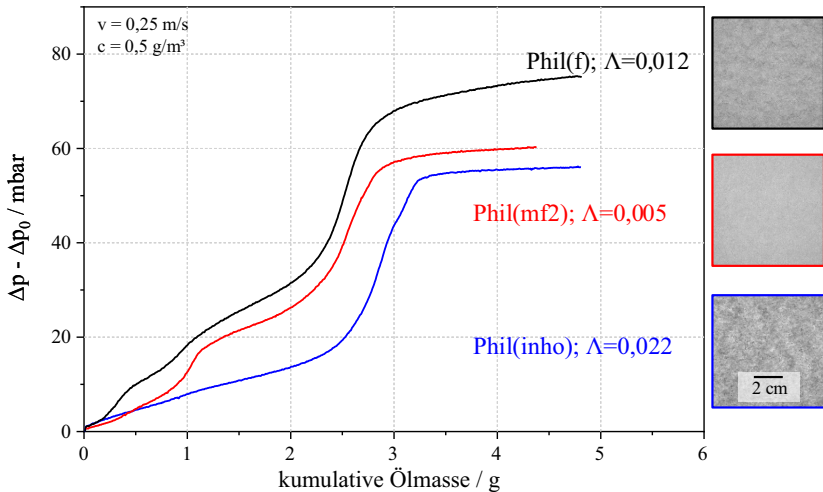


Abbildung 4.8: Differenzdruckverlauf abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulative Ölmasse für sechs Lagen der drei unterschiedlich homogenen, extern bezogenen Medien.

Um die Vorgänge im Filtermedium aufzuklären, die diesem Verhalten zugrundeliegen, wurde die Beladung eines Filters mit einem weiteren sehr homogenen Medium ($\Lambda = 0,005$) mit Öl am Übergang zum typischen, durch stetigen Differenzdruckanstieg gekennzeichneten Kanalbereich abgebrochen, das Filter entnommen und die einzelnen Lagen im Durchlicht betrachtet. Die Differenzdruckkurve bis zum Versuchsabbruch und die Durchlichtbilder der ersten drei

Lagen sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Die erste Lage ist verhältnismäßig gleichmäßig mit Öl beladen, während in der zweiten Lage bereits deutlich die Ansätze der Kanalstruktur erkennbar sind. Dies deutet darauf hin, dass der Knick in der Kurve nach dem anfänglich tiefenfilterähnlichen Differenzdruckanstieg den Übergang zur Kanalbildung anzeigt. Vor der Kanalbildung ist davon auszugehen, dass das Öl gleichmäßig (vorrangig) in der ersten Filterlage abgeschieden wird. Abgeschiedene Tropfen koaleszieren mit anderen Tropfen und können auf den Fasern von der Strömung mobilisiert werden. In oleophilen Filtern ist es so möglich, dass sich das Öl bei zunehmender Beladung aufgrund der Kapillarität in feinporigeren Bereichen bevorzugt sammelt, hinter welchen sich anschließend die Kanäle bilden, sobald genügend Öl abgeschieden ist. Diese Kanäle setzen sich dann in nachfolgenden Lagen fort. In sehr homogenen Medien kommt es hingegen zu einer gleichmäßigeren Verteilung des Öls in der ersten Lage bevor es zur Bildung von Kanälen kommt. Bei der Kanalbildung in Glasfasermedien ist die Struktur, bzw. die strukturelle Homogenität der ersten Lage, welche sich über die Lakunarität aus einer Bildanalyse der Medien beschreiben lässt, also von entscheidender Bedeutung. Kanalstrukturen in nachfolgenden Lagen werden von der jeweils vorhergehenden Lage übernommen.

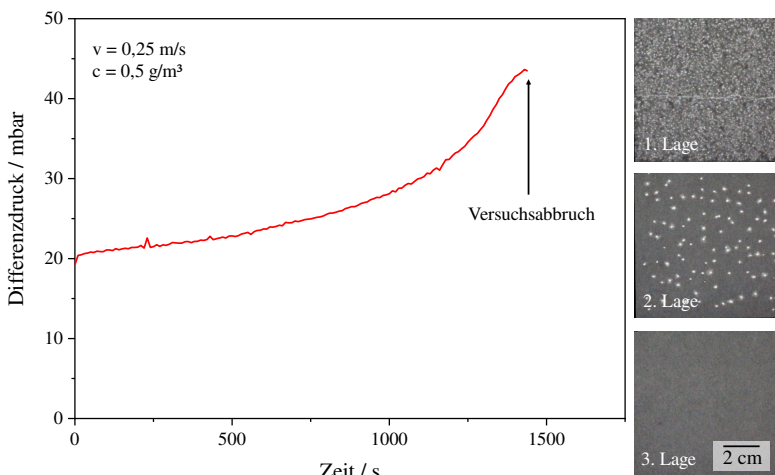


Abbildung 4.9: Abbruch der Beladung eines Filterpakets mit Öl: Differenzdruckkurve bis Abbruch und Durchlichtbilder der ersten drei Lagen.

Die Lagen von Phil(SM1) und Phil(SM2) wurden speziell als "Feeder"-Lagen ausgelegt, um zu überprüfen, ob feinere Bereiche inhomogener Medien tatsächlich für die Kanalbildung ursächlich sind. Jeweils eine Lage jeden Mediums wurde 5 Lagen von Phil(mf2) als erste Paketlage anströmseitig vorgeschaltet und das Filterpaket daraufhin ebenfalls im Versuchsstand mit einer Filtrationsgeschwindigkeit von 0,25 m/s und einer Ölkonzentration von 0,5 g/m³ beladen. Die resultierenden Differenzdruckkurven abzüglich des Anfangsdruckverlustes der trockenen Lagen (welcher für alle drei Pakete nahezu identisch war) sind in Abbildung 4.10 abgebildet. Es ist zu sehen, dass der "Erste-Lagen-Effekt" deutlich reduziert wird oder gänzlich verschwindet, wenn ein stark inhomogenes Medium als erste Lage verwendet wird. Dies wiederum führt zu einer signifikanten Reduzierung des gesamten Differenzdruckes, da die weiteren Differenzdruckkomponenten näherungsweise gleich bleiben.

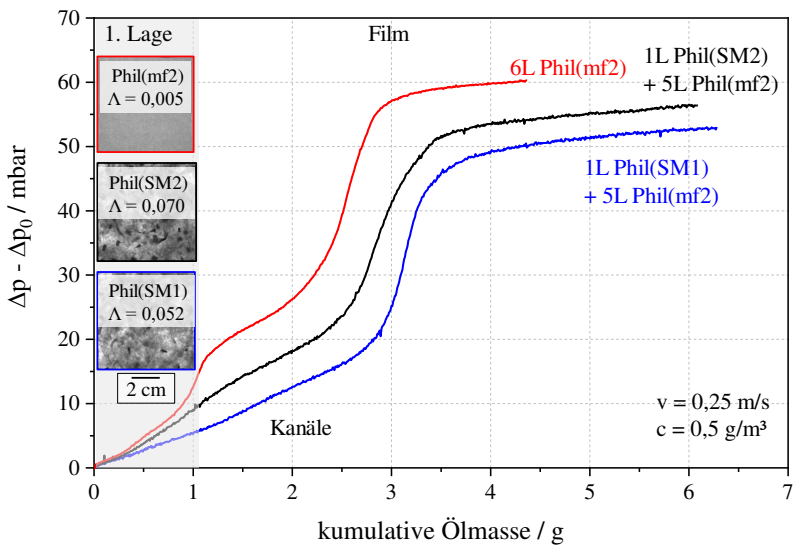


Abbildung 4.10: Differenzdruckverlauf abzüglich des Anfangsdruckverlustes über kumulativer Ölmasse für sechs Lagen von Phil(mf2) und Kombinationen von jeweils einer Lage der zwei selbsthergestellten inhomogenen Medien mit fünf Lagen von Phil(mf2).

Die für die Bestimmung der Lakunarität verwendeten Aufnahmen der trockenen Lagen von Phil(SM1) und Phil(SM2) wurden nach den Versuchen jeweils mit den Durchlichtbildern der zweiten Lagen aus den mit Öl beladenen Lagenpa-

keten verglichen (siehe dazu Abbildung 4.11). Die Bilder wurden zur besseren Bestimmung überlappender Bereiche binarisiert, wobei für die trockenen Lagen der Schwellenwert so gesetzt wurde, dass dunkle Bereiche im Medium segmentiert wurden, bei den beladenen zweiten Lagen wurden die Kanäle segmentiert. Bei der Überlagerung der ersten mit ihren jeweiligen zweiten Lagen, bzw. der binarisierten Bilder, lässt sich feststellen, dass die Anteile der überlappenden Bereiche 40,0% für Phil(SM1) und 34,8% für Phil(SM2) bei einem Anteil dunkler Bereiche von jeweils 22,2% und 26,7% betragen. Diese Werte sollen hier nur illustrativen Zwecken dienen. Sie zeigen jedoch, dass sich die Kanäle in den zweiten Medienlagen tatsächlich bevorzugt hinter dunkleren, bzw. strukturell dichteren Bereichen bilden. Offenbar spielt die Kanalbildung durch Ablenkung der Strömung durch offenere Bereiche der ersten Lage und Abscheidung von Öl dahinter bei der Kanalbildung höchstens eine untergeordnete Rolle.

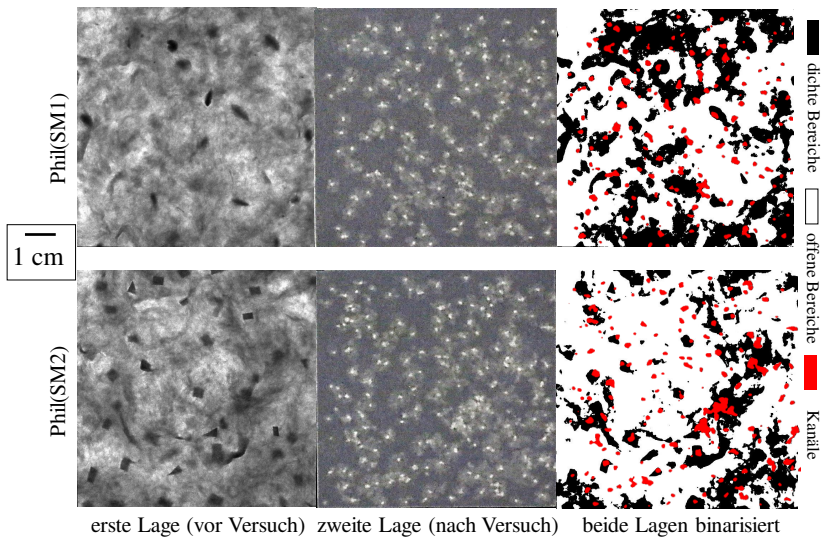


Abbildung 4.11: Links: Durchlichtbilder der beiden Medien Phil(SM1) und Phil(SM2) im trockenen Zustand; Mitte: zweite Lage des Lagenpakets (Phil(mf2)) nach den Versuchen; Rechts: Überlagerung beider Bilder. Der Schwellenwert bei der Binarisierung wurde so gewählt, dass dunkle Regionen der trockenen Lagen (schwarz) und helle Regionen der mit Öl beladenen Lagen (Ölgefüllte Bereiche/Kanäle) segmentiert wurden.

Sollten sich tatsächlich dichtere Bereiche in der ersten Lage im Betrieb bevorzugt mit Öl füllen, so würde das bedeuten, dass diese Bereiche im Laufe des

Betriebs nicht mehr zur Abscheidung von Öltröpfen zur Verfügung stünden. Da diese Bereiche mutmaßlich einen höheren lokalen Abscheidegrad aufweisen, müsste sich das dementsprechend im Fraktionsabscheidegrad der Filter im quasistationären Zustand niederschlagen. Die Fraktionsabscheidegrade der drei Filterpakete sind in Abbildung 4.12 zu sehen. Während im Anfangszustand die Fraktionsabscheidegrade quasi identisch sind (ca. 99,2 bis 99,3% an der MPPS), unterscheiden sich die Fraktionsabscheidegrade im quasistationären Zustand tatsächlich signifikant voneinander. Dabei weisen die Filter mit den inhomogenen ersten Lagen einen niedrigeren Abscheidegrad auf als das Lagepaket, welches ausschließlich aus dem sehr homogenen Medium besteht. Bei der Betrachtung der Durchlichtbilder (siehe Abbildung 4.13) der beladenen ersten Lagen zeigt sich, dass ein großer Teil der Einschlüsse und Flocken nach den Versuchen mit Öl gefüllt sind. Im Falle von Phil(SM2) ist dies in geringerem Maße der Fall als für Phil(SM1), was wahrscheinlich den höheren Abscheidegrad im quasistationären Zustand bedingt. Ob Flocken und Einschlüsse bei der Beladung des Filters mit Öl gefüllt werden, hängt möglicherweise auch von deren Einbettung im Bulk-Material ab.

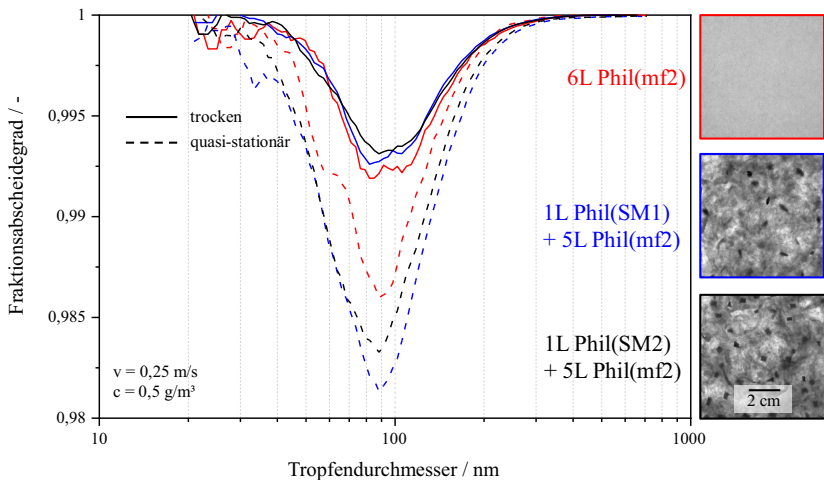


Abbildung 4.12: Fraktionsabscheidegrade im trockenen (durchgezogen) und im quasistationären (gestrichelt) Zustand für sechs Lagen von Phil(mf2) und Kombinationen von jeweils einer Lage der zwei selbsthergestellten inhomogenen Medien mit fünf Lagen von Phil(mf2).

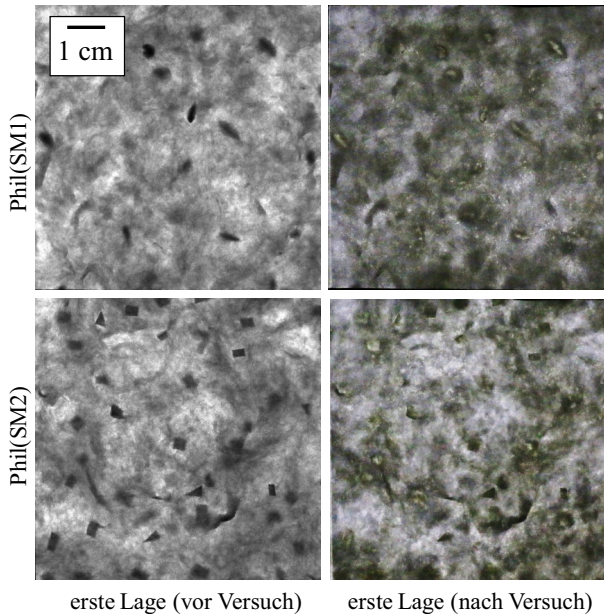


Abbildung 4.13: Durchlichtbilder der beiden Medien Phil(SM1) und Phil(SM2) im trockenen Zustand und nach den Versuchen.

Einfluss von Inhomogenitäten bei niedrigen Filteranströmgeschwindigkeiten

In sämtlichen obigen Experimenten waren trotz der unterschiedlichen kanalbildenden ersten Lagen in allen Medienpaketen deutlich abgegrenzte Kanäle sichtbar, welche sich bis zur Filterabströmseite erstreckten. Kolb et al. beobachteten, dass die Anzahl an Kanälen bei Geschwindigkeiten zwischen 5 und 70 cm/s keine Funktion der Filtrationsgeschwindigkeit ist [42]. Das von ihnen verwendete Medium war relativ inhomogen und war identisch mit Phil(inho) aus dieser Arbeit. Der Grund für die relativ konstante Anzahl an Kanälen ist möglicherweise, dass die Anzahl weniger von den Betriebsbedingungen als vielmehr von der Medienstruktur, genauer gesagt der Anzahl an kanalbildenden Bereichen an der Filteranströmseite, bzw. der ersten Lage abhängt. Zur Überprüfung welche Rolle die Medienhomogenität bei der Kanalbildung unter unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten spielt, wurden Filterpakete bestehend aus sechs Lagen der extern bezogenen Medien unter Versuchsbedin-

gungen von $0,03 \text{ m/s}$ und $1,3 \text{ g/m}^3$ beladen. Die Konzentration wurde höher als bei den vorhergehenden Versuchen gewählt, um die Versuche innerhalb einer angemessenen Zeit abschließen zu können.

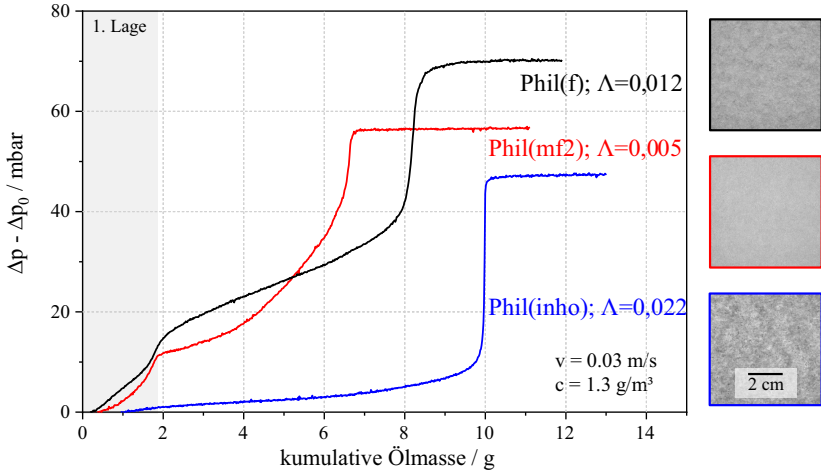


Abbildung 4.14: Differenzdruckverlauf abzüglich des Anfangsdruckverlustes über kumulative Ölmasse für sechs Lagen von Phil(mf2), Phil(f) und Phil(inho) bei einer Anströmgeschwindigkeit von $0,03 \text{ m/s}$.

Abbildung 4.14 zeigt Differenzdruckkurven über kumulative Ölmasse für die drei extern bezogenen Medien abzüglich des Differenzdrucks für die unbeladenen Filter bei einer Filteranströmgeschwindigkeit von $0,03 \text{ m/s}$. Die qualitativen Unterschiede im Kurvenverlauf sind nun wesentlich stärker ausgeprägt als bei einer Geschwindigkeit von $0,25 \text{ m/s}$ (siehe Abbildung 4.8). Der deutlichste Unterschied im Kurvenverlauf zeigt sich für das homogenste Medium Phil(mf2). Während im Differenzdruckverlauf des Mediums Phil(f) ein klar abgegrenzter Erste-Lage-Effekt zu sehen ist, welcher in einen stetigen Kanalbereich und schließlich in einen filmbedingten Sprung übergeht und der Verlauf für Phil(inho) weiterhin einen charakteristisch ausgeprägten Kanal- und Filmbereich aufweist, ist für Phil(mf2) keine Abgrenzung zwischen Kanal- und Filmbereich zu sehen. Bei der Betrachtung und dem Vergleich der Sättigung und der Flüssigkeitsverteilung in den einzelnen Lagen zeigt sich die Ursache für dieses Verhalten.

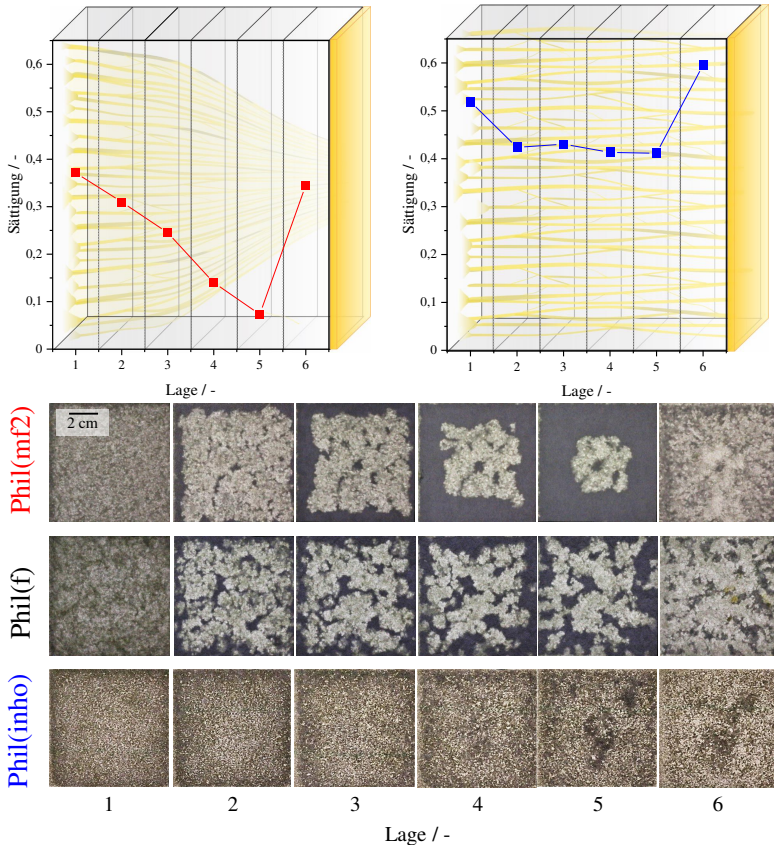


Abbildung 4.15: Oben: Einzellagensättigung der Medienpakete für Phil(mf2) (links) und Phil(inho) (rechts) mit schematischen Darstellungen der Flüssigkeitsverteilung. Unten: Durchlichtbilder der Einzellagen nach allen Versuchen mit einer Filteranströmgeschwindigkeit von 0,03 m/s.

Abbildung 4.15 zeigt die Sättigungsverläufe der Medien Phil(mf2) und Phil(inho) mit schematischen Darstellungen der Flüssigkeitsverteilung innerhalb der Filter (Phil(f) wurde der Übersichtlichkeit halber weggelassen) sowie die dazugehörigen Durchlichtbilder aller drei Medien nach den Versuchen. Phil(inho) weist in den Kanallagen 2-5 eine näherungsweise konstante Sättigung auf, wie es für Kanallagen zu erwarten ist. Für Phil(mf2) hingegen nimmt die Sättigung zur

Filterabströmseite hin ab, bevor sie in der letzten Lage aufgrund des nach dem Abstellen der Strömung aufgesaugten Films wieder ansteigt. In den Durchlichtbildern ist zu sehen, dass sich in Phil(mf2) anstatt der typischen Kanalstruktur eine zur Abströmseite hin verjüngende Ölverteilung ausbildet, während in Phil(inho) das Öl weiterhin vergleichsweise gleichmäßig über die gesamte Filterfläche verteilt ist, wobei allerdings keine einzelnen, klar abgegrenzten Kanäle eindeutig auszumachen sind. Obwohl die Sättigung in Phil(inho) über sämtliche Lagen hinweg im Vergleich zu Phil(mf2) hoch liegt, ist der Differenzdruckanstieg im Kanalbereich deutlich niedriger. Es ist also davon auszugehen, dass es sich hier statt um einzelne, abgegrenzte Kanäle um ein System von miteinander verbundenen Kanälen handelt, welche die dichteren Bereiche des Mediums belegen, während offene Bereiche weiterhin von Luft durchströmt werden können.

Zur Ausbildung von Kanälen bedarf es also neben dem Vorhandensein von kanalbildenden Bereichen in Form von feineren Teilbereichen innerhalb der Medien auch einer Art "Aktivierungsenergie" in Form einer ausreichend hohen Gasgeschwindigkeit. Diese ist notwendig, um die abgeschiedenen Tropfen auf den Fasern zu mobilisieren, so dass sich diese schließlich in kanalbildenden Bereichen akkumulieren können, aus welchen die Flüssigkeit in nachfolgende Lagen transportiert wird.

Ein weiterer deutlicher Unterschied zwischen den drei Medien ist die Filmbildungskinetik. Dies äußert sich für Phil(inho) in einem sehr klar abgegrenzten Sprung im Differenzdruck, während die Differenzdruckkurve für die anderen beiden Medien unmittelbar vor Erreichen des quasistationären Zustands flacher verläuft. Es ist davon auszugehen, dass sich in Phil(inho) eine uniforme "Kanalfront" bildet, während die Kanäle für Phil(f) nicht zeitgleich an der Filterabströmseite ankommen und so der Filmaufbau mehr Zeit in Anspruch nimmt. Im Falle von Phil(mf2) breitet sich der Film von der Mitte der Filterfläche über die gesamte Abströmseite aus, was noch einmal deutlich länger dauert und die fehlende Abgrenzung zwischen Kanal- und Filmbereich in der Differenzdruckkurve erklärt.

4.2.3 Lagen mit innerer Strukturphasengrenze

Die Auswirkungen der Kombination verschiedener Medien gleicher Benetzbarkeit jedoch unterschiedlicher Struktur auf die Vorgänge in den Medien und infolgedessen auf deren Betriebseigenschaften sind in Kapitel 5.3.1 beschrieben. Dabei werden Lagenaufbauten beschrieben, bei denen mehrere Lagen jeweils einheitlicher Struktur mit Lagen anderer (aber innerhalb der einzelnen Lagen einheitlicher) Struktur kombiniert werden. In diesem Kapitel werden Medien beschrieben, deren einzelne Lagen aus zwei Phasen unterschiedlicher Struktur bestehen. Die Filzseite/Oberseite der Lagen ist dabei jeweils grob, die Siebseite/Unterseite fein strukturiert (siehe Abbildung 4.16), wobei die Unterschiede zwischen beiden Lagen hinsichtlich ihrer Faser- und Porenstruktur jeweils recht groß sind. Da eine einzelne Lage i.d.R nicht ausreichend ist, um die Öltransportvorgänge räumlich klar abgegrenzt beobachten zu können, wurden jeweils zwei Lagen jeden Mediums kombiniert.

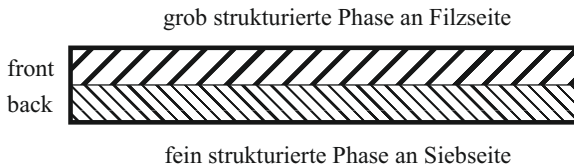


Abbildung 4.16: Schematischer Aufbau einer einzelnen Lage bestehend aus zwei Strukturphasen.

Drei verschiedene Medien mit innerer Strukturphasengrenze wurden verwendet (Dual(g), Dual(m) und Dual(f)). Dabei wurden zwei Lagen in jeweils zwei verschiedenen Konfigurationen getestet. Zum einen Siebseite an Siebseite (back-to-back, Bezeichnung b2b), so dass sich an- und abströmseitig jeweils die Filzseiten der beiden Lagen befinden und Filzseite an Filzseite, wobei sich an- und abströmseitig die Siebseiten befinden (front-to-front, Bezeichnung f2f). Die beiden Medien Dual(g) und Dual(m) waren benetzbar, das Medium Dual(f) nicht-benetzbar. Die wichtigsten Charakteristika der drei Medien sind gegeben in Tabelle 2.1. zu beachten ist hierbei, dass der angegebene Median der Porendurchmesserverteilung für die engste Stelle der jeweiligen Durchgangspore gilt. Somit ist die feinporige Siebseite maßgeblich für die jeweils mit der Kapillarflussporometrie gemessenen Porengrößenverteilung. Für eine räumlich aufgelöste Porengrößenverteilung innerhalb der einzelnen Lagen, müssten diese beispielsweise mit μCT untersucht werden. Da die zweiphasige Struktur

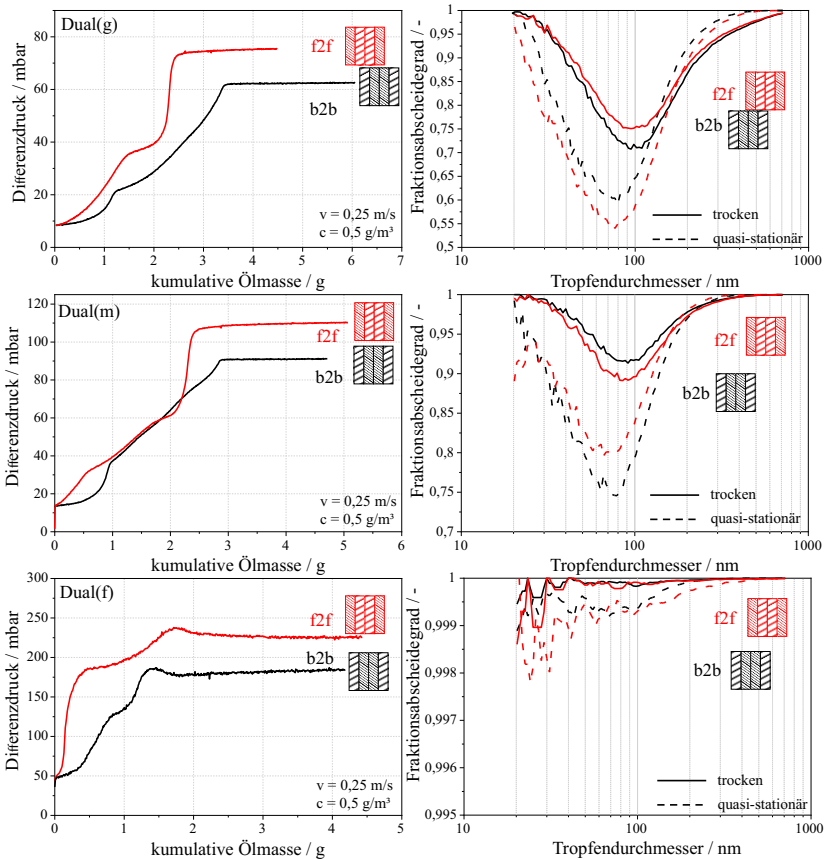


Abbildung 4.17: Differenzdruckverläufe (links) über kumulativer Ölmasse sowie Fraktionsabscheidegrade (rechts) für drei Medien mit innerer Strukturphasengrenze jeweils in front-to-front und back-to-back Konfiguration.

mittels eines zweiteiligen Stoffauflaufs umgesetzt wurde, ist hier jedoch auch von einer gewissen Durchmischung/Überlappung beider Phasen auszugehen.

Abbildung 4.17 zeigt die Differenzdruckverläufe und Fraktionsabscheidegrade der drei verwendeten Medien in den beiden oben erwähnten Konfigurationen. Bei allen drei Medien ist jeweils die Konfiguration vorteilhaft, bei der die beiden feinen Unterlagen aneinander liegen, so dass sich die groben Oberlagen an- und

abströmseitig befinden. Ursächlich hierfür ist, dass so die Filmbildung an Grenzflächen feiner Medien verhindert wird, so dass die Höhe des Drucksprungs vermindert wird. Die "f2f" Konfigurationen der beiden benetzbaren Medien Dual(g) und Dual(m) zeigen einen sehr hohen, deutlich abgegrenzten Drucksprung beim Erreichen der Kanäle an der Filtrückseite (jeweils bei knapp über 2 g kumulativer Ölmasse). Dieser beträgt ca. 30 mbar für Dual(g) und 45 mbar für Dual(m). Bei den "b2b" Konfigurationen der beiden benetzbaren Medien ist kein solcher abgegrenzter Sprung erkennbar. Bei den Fraktionsabscheidegraden beider benetzbarer Medien gibt es keinen klaren Vorteil für die "f2f" oder "b2b" Konfigurationen. Für das nicht-benetzbare Medium Dual(f) beträgt der Differenzdruckanstieg durch Filmbildung an der Filteranströmseite etwa 130 mbar, was den höchsten Druckverlustanstieg aller in dieser Arbeit getesteten Medien darstellt, während dieser in der "b2b" Konfiguration ca. 80 mbar beträgt. Die Differenz im Enddifferenzdruck zwischen beiden Konfigurationen beträgt eben jene 50 mbar Differenz bedingt durch den Differenzdrucksprung. Die Fraktionsabscheidegrade beider Konfigurationen verhalten sich näherungsweise gleich - durch die hohen Abscheidegrade sind insbesondere in den Fraktionen kleinerer Tropfen kaum noch Tropfen enthalten. Da die erzielten Abscheidegrade aller drei Medien (Abbildung 4.17 (rechts)) jedoch in keinem Verhältnis zu den resultierenden Differendrücken stehen, sind die getesteten Medien für die Ölnebelabscheidung keine ernsthafte Option.

5 Einsatz von Medien in der Filterauslegung

5.1 Betriebsverhalten beim Einsatz einer einzigen Lage

In typischen Anwendungen von Glasfasermedien für die Tröpfchenabscheidung ist der Einsatz einzelner Lagen gegenüber Mehrlagenaufbauten eher untypisch, ist jedoch je nach Reinheitsanforderungen an das Reingas ebenfalls denkbar, um beispielsweise den Druckverlust gering zu halten. In der Literatur ist die Verwendung von Einlagenaufbauten zur Ölnebelabscheidung nicht ungewöhnlich ([13],[12]). Wie zuvor gezeigt (siehe Kapitel 4.2.2), dient in Mehrlagenpaketen die erste Lage der Abscheidung des überwiegenden Anteils des Öls und der Ausbildung von Kanälen. Insofern ist die Funktion der anströmseitigen Lage innerhalb eines Filterpakets die eines "Feeders". Infolgedessen ist die erste anströmseitige Lage für gewöhnlich deutlich stärker gesättigt als nachfolgende Lagen. Somit ist der anzunehmende relative Anstieg des Druckverlustes und das Absinken des Abscheidegrades als Nachteil dieser Konstellation gegenüber Mehrlagenaufbauten zu sehen. Anhand des Betriebsverhaltens von 3 oleophilen und 2 oleophoben Medien mit unterschiedlichen Struktureigenschaften wurde diese Vermutung überprüft. Die verwendeten oleophilen Medien waren dabei Phil(g), Phil(mf1) und Phil(mf2), die oleophoben Phob(g) und Phob(f).

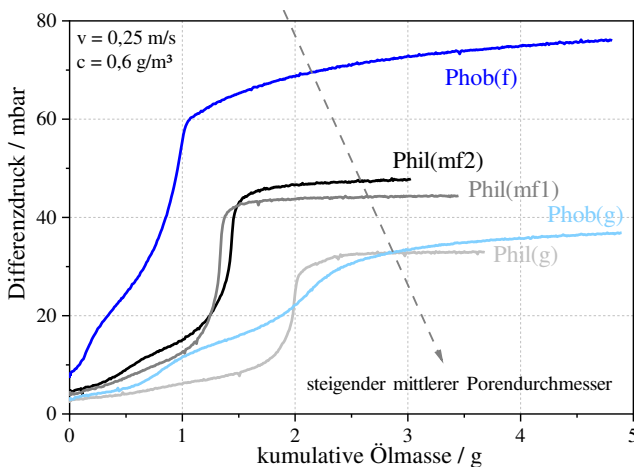


Abbildung 5.1: Differenzdruckverlauf über kumulativer Ölmasse für Einlagenaufbauten verschiedener Medien.

Die Differenzdruckverläufe der fünf Einlagenaufbauten sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Sowohl Anfangs- als auch Enddruckverlust zeigen eine äußerst gute Korrelation mit dem mittleren Porendurchmesser, bzw. dem Median der Porendurchmesserverteilung der Medien. Phil(mf1) und Phil(mf2) haben einen recht ähnlichen Median bezüglich der Porendurchmesserverteilung ($8,7 \mu\text{m}$ und $7,1 \mu\text{m}$), die leichten Unterschiede im Differenzdruck ergeben sich durch die geringfügig höhere Dicke von Phil(mf2) ($0,65 \text{ mm}$ gegenüber $0,6 \text{ mm}$) und einen leichten Zwischenanstieg des Druckverlustes bis etwa $0,6 \text{ g}$ Ölmasse für Phil(mf2). Dieser ist analog zum Verhalten von Mehrlagenpaketen von Phil(mf2) (siehe z.B. Abschnitt 4.2.2), jedoch deutlich weniger ausgeprägt. In der Differenzdruckkurve des Mediums Phob(g) ist keine klare Abgrenzung zwischen Film- und Kanalbereich erkennbar. Dies ist möglicherweise in der relativ groben Porenstruktur (Median Porendurchmesser $12,8 \mu\text{m}$) begründet. Das feinporige oleophobe Medium Phob(f) besitzt hingegen einen ausgeprägten Sprung, jedoch keinen abgegrenzten Kanalbereich. Auch hier ist ein Einlaufeffekt bis ca. $0,25 \text{ g}$ Ölmasse zu beobachten. Dieses eher untypische Verhalten hängt möglicherweise mit einer unzureichenden Oleophobisierung zusammen.

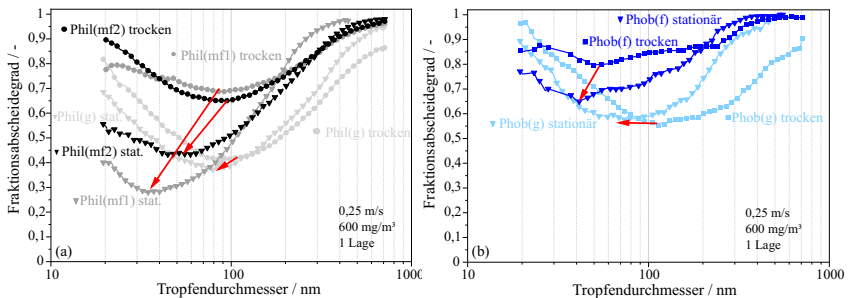


Abbildung 5.2: Fraktionsabscheidegrade im trockenen und quasistationären Zustand für Einlagenaufbauten verschiedener Medien. Links: oleophile Medien; rechts: oleophobe Medien. Die Verschiebung der MPPS ist durch Pfeile gekennzeichnet.

Die Fraktionsabscheidegrade der fünf Einlagenaufbauten in trockenem sowie im quasistationären Zustand sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Für sämtliche eingesetzten Medien gibt es erwartungsgemäß eine Abnahme des Fraktionsabscheidegrades für kleine Tropfen und eine Zunahme des Fraktionsabscheidegrades für größere Tropfen. Die MPPS verschiebt sich somit zu kleineren Tropfendurchmessern. Die Änderung des Abscheidegrades ist jedoch je nach Medium stark unterschiedlich ausgeprägt. Die unterschiedlichen Sättigung-

gen der Medien liefern für dieses Verhalten keine Erklärung. Phil(mf1) und Phil(mf2), welche relativ niedrige Sättigungen im stationären Zustand (jeweils 0,40; Phil(g): 0,48; Phob(f): 0,65; Phob(g): 0,37) aufweisen, verschlechtern sich im Abscheidegrad am deutlichsten (20 bis 40% Verlust an der MPPS). Generell scheint sich der Abscheidegrad oleophober Medien weniger zu verschlechtern. Bei der Kanalbildung in oleophilen Medien werden feinporige Bereiche, d.h. Bereiche mit hohem lokalen Abscheidegrad, aufgrund der Kapillarwirkung mit Öl gesättigt, während dies bei oleophoben Medien mutmaßlich offenere Bereiche betrifft. Bei Mehrlagenpaketen wird dies durch nachfolgende Lagen kompensiert, da hier die Kanalstrukturen aus der ersten Lage übernommen werden.

5.2 Betriebsverhalten beim Einsatz mehrerer Lagen gleicher Medien

Der überwiegende Teil an Untersuchungen zu der Filtration von Tropfen-aerosolen mit filternden Abscheidern, welche in der Literatur zu finden sind, verwendet einen mehrlagigen Aufbau jeweils eines Mediums. Bei Untersuchungen hat dies den Vorteil, dass sich die unterschiedlichen Bereiche und die sich darin abspielenden Flüssigkeitstransportmechanismen räumlich gut voneinander abgrenzen lassen. In der Regel kann dabei im Falle von oleophilen Medien die erste Lage als Feeder-Lage/Kanallage betrachtet werden, nachfolgende Lagen als Kanallagen und die abströmseitige Lage als Kanallage mit Filmanteil. Im Betrieb bedeutet jede zusätzliche Lage des gleichen Mediums also neben der Zunahme des Anfangsdruckverlusts Δp_0 durch die höhere Dicke auch eine Zunahme des Kanaldruckverlustes. Der Gesamtdruckverlust $\Delta p_{ges,phil}$ eines oleophilen Filters ergibt sich vereinfacht bei n Lagen des gleichen Mediums demnach aus

$$\Delta p_{ges,phil} = \Delta p_0 + \Delta p_{1.Lage} + (n - 1) \cdot \Delta p_{Kanal} + \Delta p_{Film} \quad (5.1)$$

mit dem Kanaldruckverlust pro Lage Δp_{Kanal} (bei annähernd konstanter Sättigung in den Kanallagen) und dem durch den Film verursachten Druckverlust Δp_{Film} . Für sehr inhomogene Medien wird aufgrund der fehlenden Unterscheidbarkeit in der Differenzdruckkurve nicht zwischen $\Delta p_{1.Lage}$ und Δp_{Kanal} differenziert (siehe Abschnitt 4.2.2). Im Falle inhomogener Medien, bei welchen sich der Film auf der Vorderseite bildet, ergibt sich der gesamte Druckverlust im quasistationären Zustand $\Delta p_{ges,phob}$ aus

$$\Delta p_{ges,phob} = \Delta p_0 + \Delta p_{Film} + n \cdot \Delta p_{Kanal} \quad (5.2)$$

Analog zum Druckverlust lässt sich auch die Penetration eines Filters als Summe der Penetration einzelner Lagen und des Films darstellen [43]. Analog zur Reihenschaltung von Filtern ergibt sich die Penetration des gesamten Filters hierbei aus dem Produkt der Penetrationen der einzelnen Lagen. Unter der Annahme, dass der Film jeweils einen gewissen Anteil $f < 1$ innerhalb der letzten Lage einnimmt, lässt sich die Gesamtpenetration eines oleophilen Filters P_{phil} ausdrücken als

$$P_{phil} = P_{1.Lage} \cdot P_{Kanal}^{n-1-f} \cdot P_{Film} \quad (5.3)$$

mit der Penetration der ersten Lage $P_{1.Lage}$, der Penetration der Kanallagen P_{Kanal} und der Penetration des Films P_{Film} . Für einen olephobes Filter ergibt sich analog

$$P_{phob} = P_{Film} \cdot P_{Kanal}^{n-f} \quad (5.4)$$

Der Druckverlust pro Kanallage Δp_{Kanal} ist in der Regel deutlich geringer als der Druckanstieg durch den Film Δp_{Film} (welcher unabhängig von der Lagenzahl ist). Weiterhin ist die Penetration pro Kanallage aufgrund deren geringerer Sättigung niedriger. Somit lässt sich anhand der Gleichungen 5.1 bis 5.4 nachvollziehen, dass mit dem Hinzufügen zusätzlicher Lagen eine deutlich verringerte Penetration bei gleichzeitig mäßigem Anstieg des Druckverlustes im quasistationären Zustand erreicht werden kann.

In dieser Arbeit wurden neben dem Einfluss der Lagenanzahl auf die Entwicklung des Differenzdrucks auch der Verlauf der Gesamtpenetration durch das Filter für ein oleophiles (Phil(inho)) und ein oleophobes Medium (Phob(inho)) beobachtet. Die Partikelanzahlkonzentration im Reingas wurde dabei mit einem CPC vermessen. Für jedes Medium wurde jeweils ein Filterpaket mit 4, 6, 8 und 10 Lagen getestet und dabei während des gesamten Versuchs Differenzdruck und Reingaspartikelanzahlkonzentration gemessen.

Abbildung 5.3 zeigt das Verhältnis von Penetration zu Anfangspenetration und Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer aufgegebener Ölmasse für Filterpakete bestehend aus jeweils 4, 6, 8 und 10 Lagen des oleophilen Mediums Phil(inho). Die Kurven für die unterschiedlichen Lagenzahlen liegen zunächst nahezu ideal aufeinander. Sowohl Differenzdruck als auch Penetration steigen bei der Kanalbildung linear an. Der Anstieg der Penetration in diesem Bereich kann analog zum Differenzdruckanstieg auf die Ausbildung von Ölkanälen innerhalb des Mediums zurückgeführt werden. Durch die zunehmende Aufsättigung zuvor trockener Filterlagen durch das Voranschreiten der Kanäle innerhalb des Filterpakets nimmt die zur Abscheidung zur Verfügung stehende Filterfläche ab und somit die Penetration zu. Der quasistationäre Zustand wird erwartungsgemäß bei einer höheren Lagenanzahl später bzw. bei einer höheren kumulativen aufgegebenen Ölmasse erreicht. Der Unterschied zwischen den einzelnen Paketen beträgt jeweils ca. 0,3 g, was in

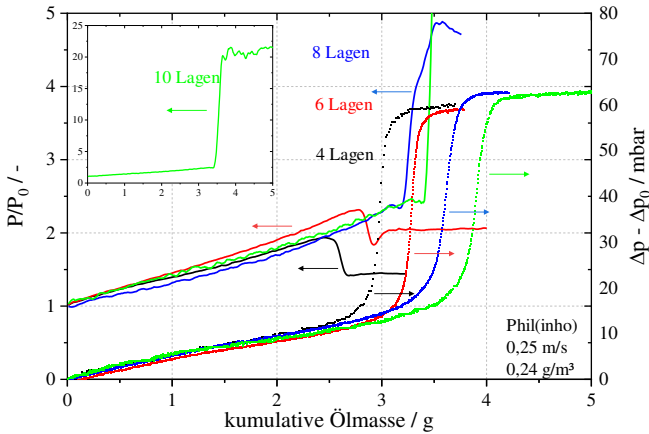


Abbildung 5.3: Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration und Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse für oleophile Filterpakete mit unterschiedlicher Lagenzahl.

etwa der in 2 Lagen nach dem Versuch enthaltenen Ölmasse entspricht (siehe dazu auch Einzellagensättigung, Abbildung 5.4, links). Das spätere Erreichen des quasistationären Zustands und der damit einhergehende verlängerte Kanalbereich führt zu einer höheren relativen Abnahme des Gesamtabscheidegrades des Filters im Bezug auf den anfänglichen Gesamtabscheidegrad. Wie weiterhin in Abbildung 5.4 zu sehen, kommt es durch die Kanalbildung zu einer relativ konstanten Sättigung im Kanalbereich. Die Kanallagen an der Filtervorderseite sind noch durch Abscheidung von durch vorhergehende Lagen penetrierte Tropfen beeinflusst. Die Sättigung der hintersten (und mit Einschränkung die der vorletzten) Lage eines oleophilen Mediums ist hingegen durch das Aufsaugen des abströmseitigen Films nach Abstellen der Strömung erhöht. Zu Beginn der Filmbildung ist für alle Filterpakete ein kurzes Absinken der Penetration zu beobachten. Für die Vier- und Sechslagenpakete nimmt die Penetration mit Ausbildung des Films schlagartig ab, im Falle der Acht- und Zehnlagenpakete führt die Ausbildung des Films zu einem sprunghaften Anstieg der Penetration, was zu einer Reingaskonzentration führt, die bis zu einer Größenordnung über der Reingaskonzentration des unbeladenen Filters liegt. Bei dem Flüssigkeitsfilm handelt es sich um keinen vollständig geschlossenen Film, vielmehr gibt es zahlreiche Öffnungen, durch welche das Gas hindurchströmen kann. Der Film wirkt somit ähnlich wie eine Lochplatte als Trägheitsabscheider. Bei zunehmen-

der Ausbildung des Films kommt es in diesem vermehrt zur Bildung und Zerfall von Blasen [81]. Die Fragmente dieser Blasen werden mit dem Gasstrom in das Reingas eingetragen. Im Falle hocheffizienter Mehrlagenpakete kann diese Sekundärpenetration von Partikeln die Primärpenetration um ein Vielfaches Überschreiten, zu sehen im Falle von acht und zehn Lagen am sprunghaften Anstieg der Penetration nach Ausbildung des Films.

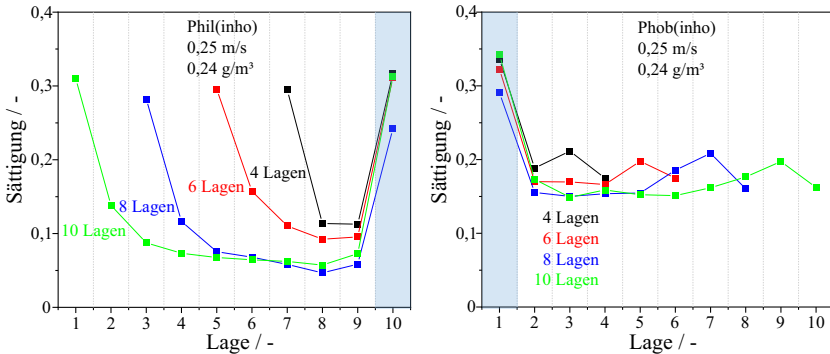


Abbildung 5.4: Einzellagensättigung der verschiedenen Filterpakete. Für das oleophile Medium wurde die Filmlage als Lage 10 definiert, für das oleophobe Lage 1.

Abbildung 5.5 zeigt das Verhältnis von Penetration zu Anfangspenetration und Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer aufgegebener Ölmasse für Filterpakete bestehend aus jeweils 4, 6, 8 und 10 Lagen des oleophoben Mediums Phob(inho). Bezüglich der Änderungen des Differenzdrucks und der Penetration zeigen die oleophoben Filterpakete ein zu den oleophilen Filtern analoges Verhalten bezüglich der qualitativen Änderungen in Zusammenhang mit den Öltransportmechanismen. Da sich der Film bei oleophoben Medien auf der Filteranströmseite bildet, tritt das sprunghafte Ansteigen des Differenzdrucks bzw. Absinken der Penetration zu Beginn des jeweiligen Versuchs auf und ist wie schon bei den oleophilen Filterpaketen unabhängig von der Lagenzahl für alle Filter annähernd identisch. Die Länge des darauf folgenden Kanalbereichs und somit das weitere Ansteigen des Differenzdrucks bzw. der Penetration ist abhängig von der Lagenzahl. Im Gegensatz zu oleophilen Medien kommt es bei Erreichen des quasistationären Zustands zu keinem weiteren Anstieg der Reingaskonzentration. Dies deckt sich mit bisherigen Arbeiten zu oleophoben Filtermaterialien [82][81]. Da sich der Film auf der Filteranströmseite aufbaut, kommt es auf der Reingasseite

zu keiner nennenswerten Blasenbildung. Da das Abblasen von Tropfen für den Wiedereintrag von Öltröpfchen eine eher untergeordnete Rolle spielt, ist die Primärpenetration von Tropfen bei oleophoben Medien hauptverantwortlich für die Reingaskonzentration.

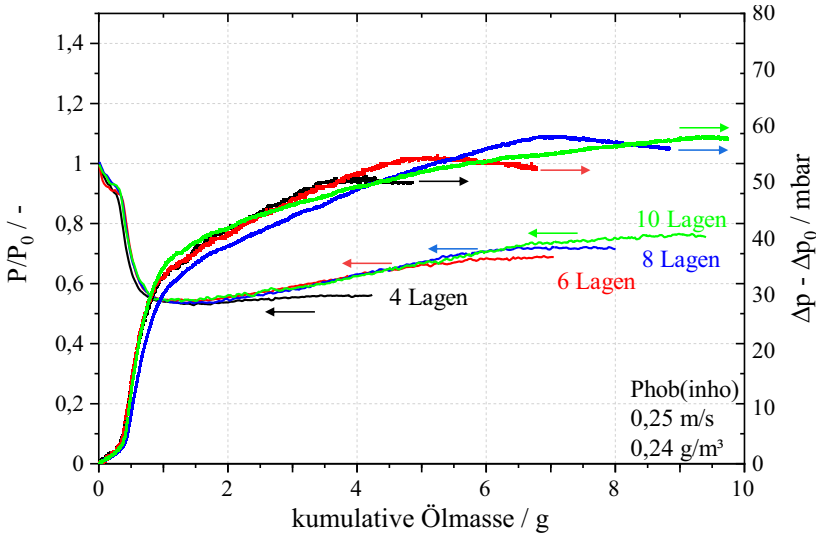


Abbildung 5.5: Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration und Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse für oleophobe Filterpakete mit unterschiedlicher Lagenzahl.

Bei der Anwendung von Ölnebeln für Anwendungen mit höchsten Anforderungen an die Reinheit des Gases ist also zu beachten, dass bei der Verwendung von oleophilen Filtermedien der anfänglich niedrige Restölgehalt des Reingases um ein Vielfaches ansteigen kann, sobald der quasistationäre Zustand erreicht ist. Zu den hier durchgeführten Messungen ist anzumerken, dass lediglich Tropfen im submikronen Bereich gemessen wurden und somit nur ein Teil des wiedereingetragenen Ölaerosols erfasst werden konnte. Die tatsächliche Menge an Wiedereintrag von Öl könnte nochmals deutlich höher sein. Durch den Einsatz oleophober Medien oder nachgeschalteter Aufreinigung kann der Restölgehalt des Reingases gering gehalten werden.

5.3 Betriebsverhalten bei der Kombination mehrerer Lagen unterschiedlicher Struktur und Benetzbarkeit

In Filterelementen zur Abscheidung von Ölnebel in der Druckluftfiltration sind Mehrlagenaufbauten bestehend aus unterschiedlichen Medien mittlerweile Standard. In der Regel werden hierbei zwei Medientypen verwendet, wovon häufig eines benetzbar und das andere nicht-benetzbar ist. Die Filterhersteller wählen die Filtermedien dabei basierend auf Erfahrungswerten zur Reduktion von Druckverlust und Wiedereintrag von Tropfen und zur Steigerung des Abscheidegrades aus. Im Folgenden wird das Betriebsverhalten von Filtern mit Medien unterschiedlicher Porengrößenverteilung (welche hier als maßgebliches Kriterium für die Medienstruktur herangezogen wird), Faserzusammensetzung und Benetzbarkeit in verschiedenen Konfigurationen betrachtet. Dabei werden sowohl Medien gleicher Benetzbarkeit jedoch unterschiedlicher Struktur als auch Medien unterschiedlicher Benetzbarkeit und unterschiedlicher Struktur untersucht. Ziel war es, für das Betriebsverhalten der Filter vorteilhafte Konfigurationen zu finden.

5.3.1 Einfluss der Kombination von unterschiedlich strukturierten Medien gleicher Benetzbarkeit auf das Betriebsverhalten

Wie in vorherigen Untersuchungen bereits ausführlich gezeigt wurde, wird die Flüssigkeitsverteilung (u.a. [38]) einzelner Filterlagen im Betrieb einerseits maßgeblich durch Medienstruktureigenschaften, -benetzbarkeit und Betriebsbedingungen beeinflusst, allerdings auch durch die Flüssigkeitsverteilung von vorgeschalteten Filterlagen, da sich Kanalstrukturen üblicherweise bis zur Filterabströmseite erstrecken. Um zu überprüfen, ob sich Kanalstrukturen auch medienübergreifend fortsetzen und welchen Einfluss die Konfiguration auf die Betriebseigenschaften der Filter hat, wurden jeweils ein grobporiges und ein feinporiges Medium gleicher Benetzbarkeit kombiniert. Verwendete oleophile Medien waren Phil(g) und Phil(f) und als oleophobe Medien wurden Phob(g) und Phob(f) gewählt. Dabei wurden jeweils drei Lagen des groben/feinen Mediums anströmseitig ("vorne") und drei Lagen des feinen/groben Mediums an der

Abströmseite ("hinten") platziert. Als Stützgitter wurde R33(1,8) (siehe Kapitel 5.4) verwendet.

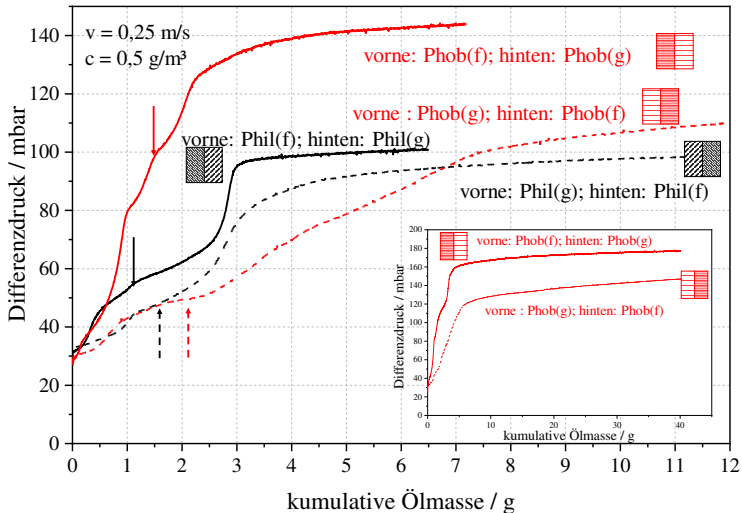


Abbildung 5.6: Differenzdruck über kumulativer Ölmasse für oleophile (schwarz) und oleophobe (rot) Filterpakete mit jeweils einem groben und feinen Filtermedium. Zusätzlich ist unten rechts das Langzeitverhalten der oleophoben Kombinationen dargestellt.

Abbildung 5.6 zeigt die Differenzdruckverläufe über der kumulativen Ölmasse für Kombinationen feiner und grober oleophiler und oleophober Medien. Bei der Verwendung gleicher Medien ist der Anfangsdruckverlust wie zu erwarten unabhängig von der Konfiguration. Bei der Konfiguration mit dem Medium Phil(f) an der Anströmseite ist zu Beginn der Beladung ein zunächst steiler Anstieg des Differenzdrucks zu beobachten, welcher die Beladung der ersten Filterlage anzeigt und in einen vergleichsweise steilen linearen Differenzdruckanstieg während der Kanalbildung übergeht, welcher jedoch bei ca. 1,2 g aufgegebenen Ölmasse abflacht. Dieser Übergang impliziert den Übergang der Kanäle vom feinen in das größere Medium. Der Sprung im Differenzdruck durch Filmbildung (ab ca. 2,7 g Ölmasse) ist klar abgegrenzt und beträgt etwa 25 mbar. Der Anstieg des Differenzdruckes durch Abscheidung und Akkumulation von Öl in der ersten Lage fällt bei der anströmseitigen Verwendung von Phil(g) deutlich langsamer aus und geht in einen flachen Kanalanstieg über, welcher wiederum ab etwa 1,6 g ab dem wahrscheinlichen Übergang der Kanäle in Phil(f) steiler

wird. Der Sprung ist im Vergleich zu der zuvor genannten Konfiguration der bedien Medien weniger scharf abgegrenzt und beträgt ca. 30 mbar.

Bei der anströmseitigen Verwendung von Phob(f) kommt es zu Beginn zu einem deutlichen, sprunghaften Anstieg des Differenzdruckes um etwa 50 mbar, mit einem Abknicken der Differenzdruckkurve und Übergang in einen nur wenig flacheren Verlauf ab 1 g kumulativer Ölmasse. Der Knick zeigt den Übergang von Filmbildung auf der Anströmseite zur Kanalbildung innerhalb des Medium an, welche innerhalb des feinen oleophoben Mediums mit einem relativ starken Anstieg des Differenzdrucks verbunden ist. Ein weiterer Knick bei 1,5 g aufgebener Ölmasse weist auf den Übergang ins Medium Phob(g) hin. Der folgende steile Anstieg des Druckverlustes impliziert eine Filmbildung an der Grenzfläche zwischen beiden Medien, was bei einer Kombination von zwei Medien gleicher Benetzbarkeit eigentlich nicht zu erwarten wäre und möglicherweise auf die großen strukturellen Unterschiede zwischen den beiden Medien zurückzuführen ist. Die für die Kanalbereiche der jeweiligen Medien untypische hohe Sättigung der beiden Lagen an der Grenzfläche (Abbildung 5.7 rechts, Lage 3 für Phob(f) und Lage 4 für (Phob(g)) spricht ebenfalls für eine Filmbildung an dieser Grenzfläche.

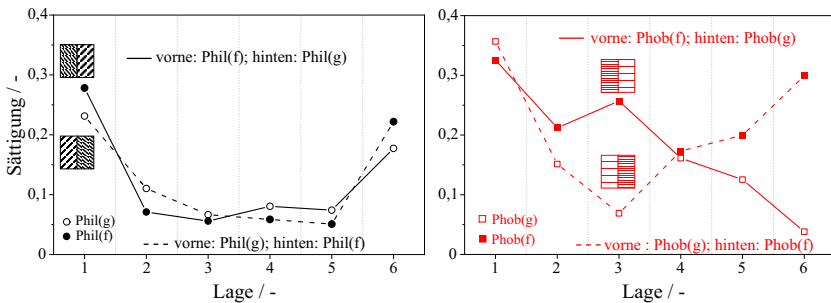


Abbildung 5.7: Einzellagensättigung für oleophile (schwarz, links) und oleophobe (rot, rechts) Filterpakete mit jeweils einem groben und feinen Filtermedium.

Bei der Konfiguration mit Phob(g) anströmseitig mit nachgeschalteten Lagen von Phob(f) ist während der Beladung kein charakteristischer, abgegrenzter Sprung im Differenzdruck auszumachen - in dieser Hinsicht verhält sich das Medium Phob(g) ohnehin untypisch für ein oleophobes Medium (siehe Kapitel 5.1). Vielmehr kommt es zunächst zu einem Anstieg des Differenzdruckes, der eher mit dem "Erste-Lage-Effekt" von homogenen oleophilen Medien vergleichbar

ist. Bei 2,1 g Ölmasse erreichen die Kanäle vermutlich das Medium Phob(f). Es folgt ein langer, stetiger Anstieg des Differenzdrucks bis 7,0 g kumulativer Ölmasse. Da die Drainage bereits deutlich früher gemessen wird (ab etwa 4,5 g aufgebener Ölmasse) ist das Erreichen der Filtrerrückseite durch die Kanäle hier nicht gleichzusetzen mit dem quasi-stationären Zustand und es kommt zu einer weiteren Akkumulation von Öl innerhalb des Mediums. Auch über 7,0 g Ölmasse hinaus kommt es weiter zu einem signifikanten Anstieg des Differenzdrucks. Abbildung 5.6 zeigt zudem die beiden oleophoben Kombinationen im Langzeitverhalten (bis ca. 45 bis 50 g aufgebener Ölmasse). Beide Kombinationen zeigen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Kolb et al. [41] auch weit über den quasistationären Zustand ein Kriechen des Differenzdruckes, welches für die Kombination mit Phil(g) an der Anströmseite stärker ausgeprägt ist. Auch wenn der Differenzdruckanstieg für die Konfiguration mit Phob(g) an der Anströmseite im angenommenen quasistationären Zustand also zunächst deutlich geringer ausfällt als für die andere oleophobe Konfiguration, könnte sich dieser Unterschied für lange Betriebszeiten aufgrund des Kriechens des Differenzdruckes letztendlich nivellieren.

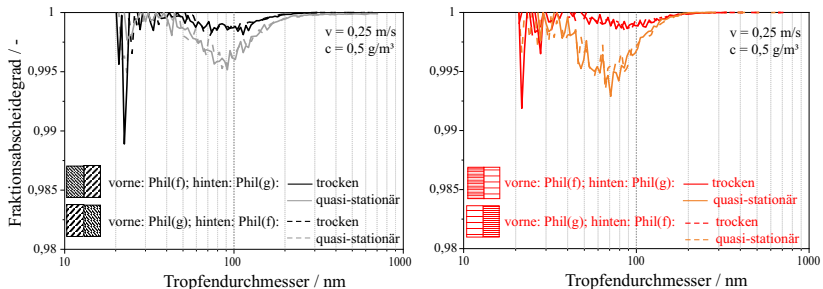


Abbildung 5.8: Fraktionsabscheidegrade für oleophile (links) und oleophobe (rechts) Filterpakete mit jeweils einem groben und feinen Filtermedium.

Abbildung 5.8 zeigt die Fraktionsabscheidegrade aller Kombinationen gleicher Benetzbarkeit. Weder im trockenen noch im quasistationären Zustand zeigte sich hier ein signifikanter Unterschied zwischen verschiedenen Konfigurationen gleicher Medien.

5.3.2 Einfluss der Kombination von unterschiedlich strukturierten Medien unterschiedlicher Benetzbarkeit auf das Betriebsverhalten

Das Auftreten der einzelnen Flüssigkeitstransportmechanismen in Filterpaketen ist maßgeblich davon abhängig, ob an Grenzflächen (äußeren oder inneren) kapillare Ein- oder Austrittskräfte überwunden werden müssen. An einer inneren Grenzfläche eines Filterpaketes tritt demnach ein Film auf, wenn ein oleophiles Medium einem oleophoben vorgeschaltet ist. Die Kanalstrukturen einzelner Lagen sind hingegen von der Lage und Größe der Kanalstrukturen vorgeschalteter Lagen abhängig. Den Ergebnissen von Kampa et al. zufolge ist die Position und Größe von Ölkanälen in einem oleophoben Medium von den Kanalstrukturen in einem vorgeschalteten oleophilen Medium unabhängig [37]. Als Ursache hierfür nannten Kampa et al. eine Umverteilung des Öls an der Grenzfläche zwischen oleophilem und oleophobem Medium durch die Filmbildung. Eine Schlussfolgerung hieraus wäre, dass der Differenzdruckanstieg infolge der Kanalbildung im oleophoben Medium in diesem Falle unabhängig von den vorgeschalteten Lagen des oleophilen Mediums ist. Ziel der Untersuchungen mit Filterpaketen unterschiedlicher Benetzbarkeit und Struktur war es, über die bisherigen Erkenntnisse hinaus einen zusätzlichen Einfluss der Medienstruktur in Konfigurationen unterschiedlicher Benetzbarkeit zu beleuchten. Es wurden jeweils drei Lagen eines oleophilen/oleophoben groben/feinen Mediums mit drei Lagen eines oleophoben/oleophilen feinen/groben Mediums kombiniert.

Abbildung 5.9 zeigt den Differenzdruck über aufgebener, kumulativer Ölmasse für Filterpakete bestehend aus Kombinationen der Medien Phil(f) mit Phob(g) und Phob(f) mit Phil(g). Auch hier ist erwartungsgemäß der anfängliche Differenzdruck bei Verwendung gleicher Medien von deren Konfiguration unabhängig. Anders als etwa bei Kampa zeigte sich hier, dass sowohl der Beitrag des Films zum Gesamtdruckverlust als auch die Kinetik der Filmbildung entscheidend davon abhängen, ob sich der Film an einer äußeren oder an einer inneren Grenzfläche bildet. Besonders deutlich wurde das bei der Filmbildung an den beiden oleophoben Medien:

- Bei einer abströmseitigen Platzierung des Mediums Phob(g) ist der sprunghafte Anstieg des Differenzdrucks durch die Filmbildung an der Grenzfläche zwischen Phil(f) und Phob(g) steil und klar abgegrenzt (in Abbildung 5.9 durchgezogene schwarze Linie ab 2 g kumulativer

Ölmasse). Die Anwesenheit eines Ölfilms wird auch bei der Betrachtung der Einzellagensättigungen der beiden Lagen an der Grenzfläche nach dem Versuch deutlich (siehe Abbildung 5.10), welche - typisch für Filmlagen - erheblich erhöht sind.

- Wenn Phob(g) sich stattdessen an der Anströmseite befindet, ist hingegen (wie schon in vorherigen Versuchen mit dem Medium an der Anströmseite) kein klarer Sprung im Differenzdruckverlauf zu sehen (siehe gestrichelte schwarze Linie in Abbildung 5.9).

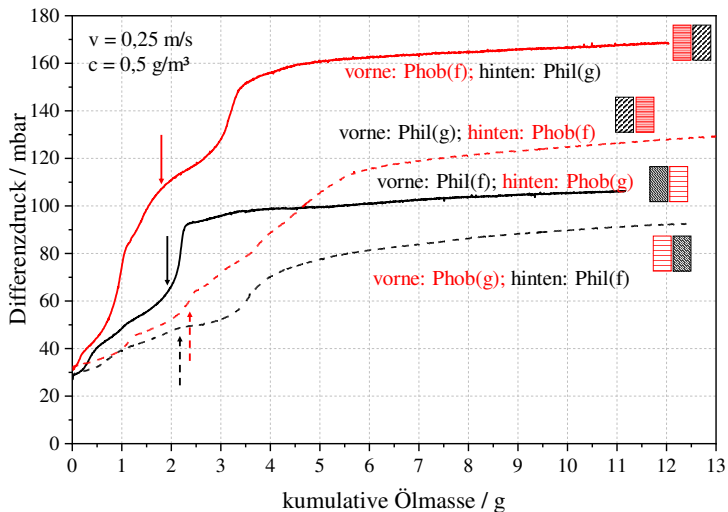


Abbildung 5.9: Differenzdruck über kumulativer Ölmasse für Kombinationen von Phil(f) mit Phob(g) (schwarz) und Phob(f) mit Phil(g) (rot). Die Pfeile zeigen jeweils den wahrscheinlichen Übergang von Öl von dem anströmseitigen in das abströmseitige Medium.

In dieser Hinsicht zeigt das feine oleophobe Medium Phob(f) hingegen in Kombination mit dem groben oleophilen Medium Phil(g) das gegenteilige Verhalten:

- Bei einer anströmseitigen Platzierung von Phob(f) beträgt der Sprung zu Beginn des Betriebs ca. 50 mbar und ist recht deutlich abgegrenzt (0 bis 1 g Ölmasse in Abbildung 5.9).
- Bei einer Platzierung hinter Phil(g) ist die Filmbildung lediglich durch einen sehr kleinen Sprung im Differenzdruck angedeutet (bei etwa 2,2 g

Ölmasse in Abbildung 5.9). Anschließend steigt der Differenzdruck lange stetig an (bis 5,5 g aufgebener Ölmasse). Bei der Betrachtung der Einzellagensättigung (Abbildung 5.10 rechts) fällt auf, dass die Sättigungen der beiden Lagen an der Grenzfläche nicht signifikant gegenüber der jeweils benachbarten Kanallage erhöht sind, wie es bei Anwesenheit eines Filmes zu erwarten wäre. Es ist also anzunehmen, dass zumindestens kein vollständiger Film an der Grenzfläche ausgebildet wird. Dieses Verhalten konnte auch mit weiteren Kombinationen aus groben oleophilen und feinen oleophoben Medien reproduziert werden.

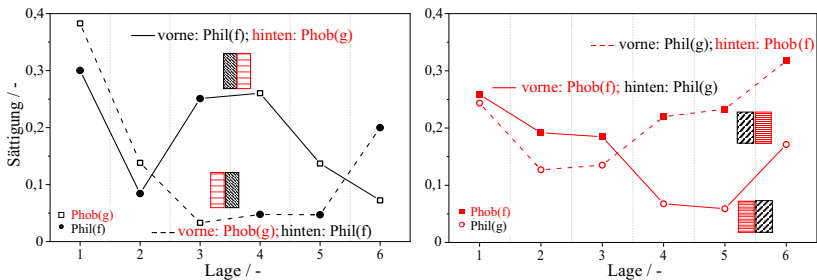


Abbildung 5.10: Einzellagensättigung für Kombinationen von Phil(f) mit Phob(g) (schwarz) und Phob(f) mit Phil(g) (rot).

Die Reingaskonzentration ist neben dem Druckverlust ein weiterer Indikator für die im Filter ablaufenden Mechanismen, da diese bei der Kanalbildung aufgrund von Verlust von Kollektorfläche ansteigt und bei der Filmbildung absinkt, da der Film als Trägheitsabscheider dient. Daher wurde zur Überprüfung einer eventuellen Filmbildung die Reingaskonzentration online mittels CPC überwacht. Abbildung 5.11 zeigt Differenzdruck- und Reingaskonzentrationsverläufe im Betrieb für die beiden Kombinationen, bei denen ein oleophiles Medium einem oleophoben vorgeschaltet ist. Im Falle der Kombination aus Phil(f) und Phob(g) (schwarz) ist ein Absinken der Reingaskonzentration parallel zum Differenzdrucksprung zu beobachten. Für die andere Konfiguration steigt nach dem Ausbilden der Kanäle ab ca. 1,5 g Ölmasse die Tropfenkonzentration im Reingas stetig an, so wie es bei der Kanalbildung zu erwarten wäre. An dem Punkt, an dem eine Filmbildung zwischen den Medien stattfinden müsste (ab 2 g kumulativer Ölmasse), ist kein signifikanter Einfluss auf die Reingaskonzentration sichtbar.

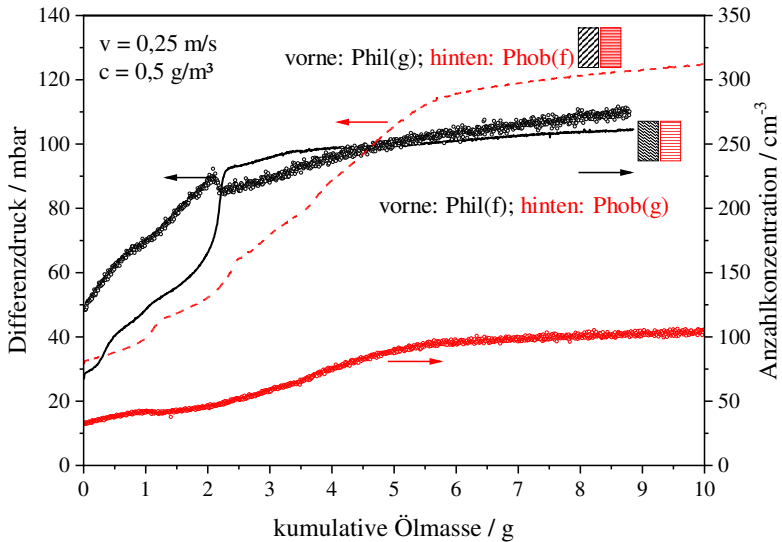


Abbildung 5.11: Differenzdruck über kumulativer Ölmasse für Kombinationen von Phil(f) mit Phob(g) (schwarz) und Phil(g) mit Phob(f) (rot) sowie zugehörige Tropfenanzahlkonzentrationen im Reingas.

Konfigurationen mit einem groben Medium an der Anströmseite zeigen also unabhängig von der Benetzbarkeit deutliche Vorteile hinsichtlich des im Betrieb entstehenden zusätzlichen Differenzdruckes. Es kann u.a. beobachtet werden, dass bei einem vorgeschalteten groben oleophoben Medium der durch Kanalbildung in einem feinen oleophilen Medium entstehende zusätzliche Differenzdruck geringer ausfällt als der Differenzdruck in demselben Medium, wenn dieses seinerseits anströmseitig platziert wird. Entscheidend scheint hier zu sein, in welchem Medium sich die Kanäle zunächst "frei" aus abgeschiedenem und koalesziertem Öl bilden, denn dieses bestimmt die Anzahl und Form der Kanäle und hängt von Medienstruktur (u.a. Homogenität) und -benetzbarkeit ab. Kanäle in nachfolgenden Lagen behalten Durchmesser und Lage im Wesentlichen bei.

Nach den Versuchen lässt sich in Durchlichtbildern der einzelnen Lagen erkennen, dass sich die Kanalstrukturen der beiden Konfigurationen signifikant unterscheiden. Abbildung 5.12 zeigt Einzellagensättigungen der Filterpakete sowie Durchlichtbilder der jeweils dritten und vierten Lage (d.h. der beiden

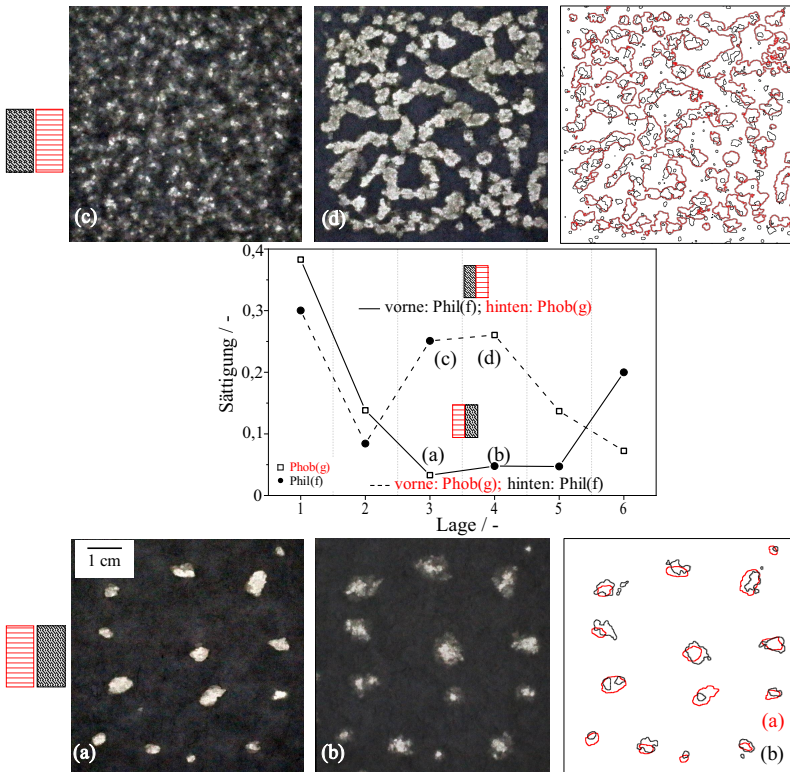


Abbildung 5.12: Einzellagensättigung für Kombinationen von Phob(g) mit Phil(f) und Durchlichtbilder der jeweiligen Lagen an der Grenzfläche. Rechts sind die Umriss der Kanäle nochmals visualisiert. Die Kanalummrisse in Phil(f) sind dabei in schwarz dargestellt, diejenigen in Phob(g) in rot.

Lagen an der Grenzfläche zwischen den beiden Medien). Ist Phob(g) Phil(f) vorgeschaltet, so finden sich die in Phob(g) entstehenden Kanalstrukturen auch in Phil(f) wieder, zu sehen an Lage 3 von Phob(g) in Abbildung 5.12 (a) und der darauf folgenden Phil(f) Lage (b). Verwendet man stattdessen das Paket mit Phil(f) an der Vorderseite, so bildet sich in diesem Medium eine deutlich höhere Anzahl an feinen Kanälen (c). Obwohl sich zwischen den beiden Medien in diesem Fall ein Film bildet und nach Kampa et al. [37] somit das Öl

umverteilt und sich die Kanalstrukturen aus dem oleophilen Medium nicht mehr im oleophoben wiederfinden sollten, ist in der folgenden Lage Phob(g) (d) ebenfalls eine hohe Anzahl an Kanälen erkennbar. Diese sind überwiegend an Positionen, an denen sich auch die Kanäle der dritten Lage des oleophilen Mediums befinden. Die von Kampa et al. beobachtete Umverteilung des Öls und unabhängige Kanalneubildung konnte somit nicht bestätigt werden.

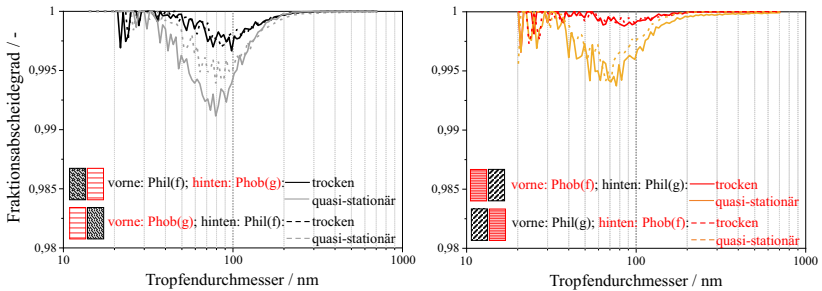


Abbildung 5.13: Fraktionsabscheidegrade für Kombinationen von Phil(f) mit Phob(g) (links) und Phil(g) mit Phob(f) (rechts).

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Konfigurationen und die Auswirkungen auf den Öltransport in den Medien sind auch im Fraktionsabscheidegrad sichtbar (Abbildung 5.13). In trockenem Zustand spielt die Reihenfolgen der Lagen analog zu einer Reihenschaltung von Abscheidern keine Rolle. Im quasistationären Zustand hingegen kommt die unterschiedliche Flüssigkeitsverteilung innerhalb der Lagen im Bezug auf die Differenzdruckanstiege und die Fraktionsabscheidegrade der verschiedenen Konfigurationen zum Tragen. Bei Kombinationen aus Phil(f) und Phob(g) ist im quasistationären Zustand diejenige Konfiguration im Vorteil, bei welcher Phob(g) dem Medium Phil(f) vorgeschaltet ist. Dies zeigt sich in einem höheren Abscheidegrad für Tropfen < 100 nm (siehe Abbildung 5.13). Dies ist durch die niedrigere globale Sättigung dieser Variante und der somit höheren zur Verfügung stehenden Kollektorfläche bedingt. Bei Kombinationen von Phob(f) mit Phil(g) hingegen ist der Fraktionsabscheidegrad für Tropfen größer als die MPPS (ca. 70 nm) leicht erhöht, wenn das oleophobe Medium abströmseitig platziert ist. Dabei handelt es sich nicht um Primärpenetration sondern vielmehr um Entrainment von Tropfen durch platzende Blasen im rückseitigen Film, welcher lediglich bei oleophilen Medien an der Abströmseite gebildet wird.

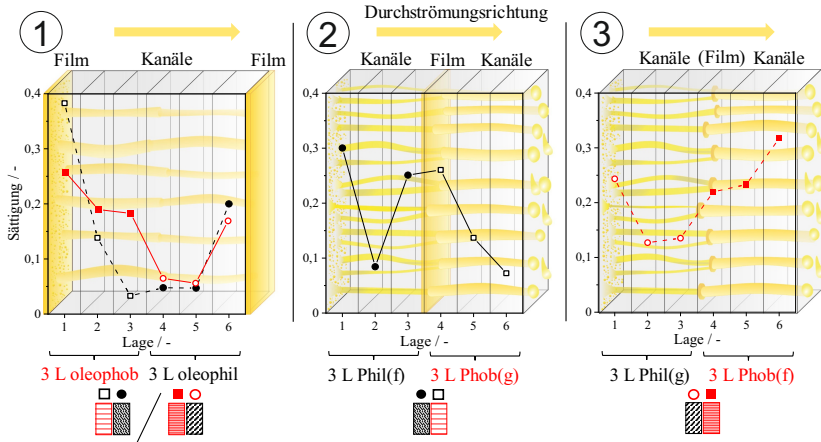


Abbildung 5.14: Schematische Darstellung der Flüssigkeitsverteilung innerhalb von Sechslagenpaketen bestehend aus jeweils zwei verschiedenen Medien.

Abbildung 5.14 zeigt schematisch die Flüssigkeitsverteilung innerhalb der Lagenpakete für die verschiedenen betrachteten Konfigurationen:

1. Folgt ein oleophiles Medium auf ein oleophobes, werden die im oleophilen Medium gebildeten Kanäle an der Grenzfläche zwischen den Medien vom oleophoben Medium übernommen (Abbildung 5.14 links). Dies kann bei einem groben oleophoben Medium mit relativ geringer Kanallagensättigung vorteilhaft für Differenzdruck und Abscheidegrad sein.
2. Folgt ein grobes oleophobes Medium auf ein feines oleophiles, bildet sich ein Flüssigkeitsfilm an der Mediengrenzfläche, allerdings wird die Lage der Kanäle im oleophoben Medium maßgeblich von der Lage der Kanäle im oleophilen Medium beeinflusst (Abbildung 5.14 Mitte). Dies bringt grundsätzlich keine wesentlichen Vorteile bezüglich des Betriebsverhaltens.
3. Wird einem feinen oleophoben Medium ein grobes oleophiles vorangestellt, so bildet sich ein unvollständiger Film an der Grenzfläche bevor Kanäle im oleophoben Medium gebildet werden (Abbildung 5.14 rechts). Dies verringert die Differenzdruckzunahme durch Filmbildung wesentlich.

Bezüglich des Betriebsverhaltens der Filter sind also insbesondere solche Konfigurationen vorteilhaft, bei welchen ein grobes Medium einem feinen vorgeschaltet ist.

5.4 Einfluss abströmseitiger Stützgitter auf das Betriebsverhalten

Koaleszenzfilter, wie sie in der Druckluftaufbereitung oder für Vakuumpumpen verwendet werden, bestehen häufig aus einem zylindrischen Blech, auf welches mehrere Lagen eines Filtermediums gewickelt sind. Darauf folgt häufig ein Drainagemedium in Form eines Schaumes oder eines grobfaserigen Materials (siehe Abbildung 1.1). Bei der Entwicklung neuer Koaleszenzfilter standen bisher v.a. die Koaleszenzfilter- und Drainagemedien im Fokus, während als Stützstruktur beliebige Lochbleche verwendet wurden. In der gängigen Literatur finden sich selten Informationen bezüglich der verwendeten Stützstrukturen, mutmaßlich da deren Einfluss bisher als vernachlässigbar angenommen wird. In Arbeiten, in denen flache Filter anstatt ganzer kommerzieller Filterelemente untersucht wurden, fanden überwiegend Lochbleche Anwendung. In einigen Fällen wurden offene Strukturen verwendet oder die Stützstruktur weggelassen, um Vorgänge auf der Filterrückseite besser beobachten zu können [36] [81]. Allerdings hat die Stützstruktur einen großen Einfluss auf das Strömungsfeld innerhalb der Medien. Zudem werden Teile der Filtergrenzfläche bzw. der Grenzfläche zwischen Filter- und Drainagemedium von der Stützstruktur abgedeckt, so dass davon auszugehen ist, dass diese einen signifikanten Einfluss auf die Flüssigkeitsverteilung innerhalb der Medien und somit auf das Betriebsverhalten der Filter im Betrieb hat. Dies gilt v.a. für oleophile Medien, bzw. Filterpakete mit einem oleophilen Medium an der Abströmseite, da sich die Stützstruktur in diesem Fall exakt dort befindet, wo sich ein Flüssigkeitsfilm bildet. In diesem Fall wäre davon auszugehen, dass die Stützstruktur Einfluss auf die Filmbildung und somit auf den daraus resultierenden Sprung des Differenzdrucks hat.

Tabelle 5.1: Wichtigste Kennwerte der verwendeten Stützgitter

Stützgitter	Anteil offener Fläche	Öffnungsweite / mm	Stegbreite / mm
R10(3,4)	10 %	3,4	10
R33(1,8)	33 %	1,8	3
R33(4)	33 %	4	6,6
R33(5,8)	33 %	5,8	10
SQ33(4)	33 %	4 x 4	7
R52(4)	52 %	4	5
B90	90 %	80 x 14	2

Zur Überprüfung des Einflusses von verschiedenen Stützgittergeometrien auf das Betriebsverhalten von Koaleszenzfiltern, wurden sieben verschiedene Stützgitter mit unterschiedlicher freier durchströmter Fläche, Öffnungsweite und -abstand in Kombination mit Filterpaketen bestehend entweder aus sechs Lagen eines oleophilen (Phil(mf1)) oder eines oleophoben (Phob(mg)) Mediums mit einer Anströmgeschwindigkeit von 0,25 m/s und einer Ölnebelkonzentration von 0,5 g/m³ beladen. Sieben Edelstahllochbleche mit einer Dicke von 0,5 mm und einer Größe von 94 x 94 mm wurden verwendet, wobei sich die Perforation auf eine Fläche von 80 x 80 mm beschränkte. Davon waren fünf Bleche mit einer Rundlochung nach Rv DIN 24041, eines hatte eine Quadratlochung nach Qg 24041 und eines war ein Steggitter mit vier dünnen Stegen [23]. Gitter mit einer Rundlochung haben den Namenszusatz 'R', das mit der Quadratlochung 'SQ'. Die Zahl hinter dem Präfix gibt die freie durchströmte Fläche in Prozent an und die Zahl in Klammern die Öffnungsweite. Die sieben Gitter mit ihren wichtigsten Eigenschaften sind aufgelistet in Tabelle 5.1. Abbildung 5.15 zeigt die sieben verwendeten Stützgitter geordnet nach dem offenen Flächenanteil und Lochgröße.

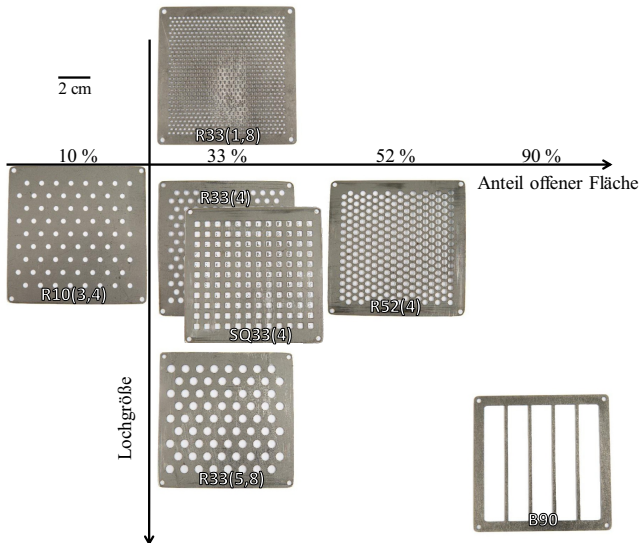


Abbildung 5.15: Übersicht verwendeter Stützgitter

5.4.1 Einfluss von Stützgittergeometrien bei oleophilen Filtern

Da sich im Fall oleophiler Medien im quasistationären Zustand auf der Filterabströmseite ein Flüssigkeitsfilm ausbildet, ist dieser Fall bei der Betrachtung des Einflusses von Stützgittergeometrien von besonderem Interesse, da eine Beeinflussung der Filmbildung zu erwarten ist. Abbildung 5.16 zeigt Differenzdruckverläufe von Sechslagenpaketen des Mediums Phil(mf1) in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächenanteile zwischen 10 und 90 %. Aus den Gittern mit 33 % offenem Flächenanteil sind die beiden Gitter abgebildet, welche im quasistationären Zustand jeweils den höchsten und niedrigsten Differenzdruck aufweisen. Für den Anfangsdruckverlust der trockenen Filter (in Abbildung 5.16 rechts) ist neben dem offenen Flächenanteil der Abstand zwischen den Öffnungen, d.h. die Stegbreite entscheidend. Die Filterpakete mit den Gittern R33(1,8), R52(4) und B90 (Stegbreiten 3, 5 und 2 mm) haben einen recht ähnlichen Anfangsdruckverlust von jeweils ca. 22 mbar. Für R33(5,8) liegt dieser bei 28 und für R10(3,4) bereits bei 49 mbar (Stegbreiten jeweils 10 mm).

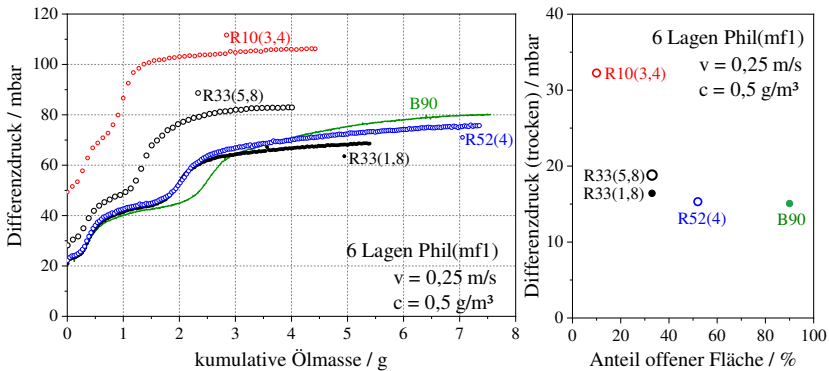


Abbildung 5.16: Differenzdruckverläufe von sechslagigen oleophilen Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächen (links) sowie zugehörige Differenzdrücke zu Beginn der Beladung in Abhängigkeit des durchströmten Flächenanteils (rechts).

Auf den Differenzdruckanstieg während der Kanalbildung hingegen hat weder der durchströmte Flächenanteil noch der Abstand oder die Größe der Öffnungen einen signifikanten Einfluss. Dieser beträgt 21 bis 22 mbar für alle Filter. Dieser Umstand ist auch in der Sättigung der Kanallagen (Lagen zwei bis fünf) der einzelnen Filterpakete ersichtlich (Abbildung 5.17). Einzige Ausnahme bildet

hier die vorletzte Lage des Filters mit dem Gitter B90, was vermutlich eher auf die größere benötigte Ölmenge zur Filmbildung an der folgenden Lage zurückzuführen ist, als dass es die tatsächliche Sättigung dieser Lage im Betrieb abbildet. Die relativ geringen Unterschiede in der Kanallagensättigung der einzelnen Filter sind analog zu Beobachtungen beim Betrieb von Filtern bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Bei größeren Abständen der Gitteröffnungen beginnt die Filmbildung bereits bei niedrigeren kumulativen Ölmassen, da die Kanalbildung hier stärker auf die Austrittsöffnungen der Gitter fokussiert ist. Abgesehen vom unterschiedlichen Anfangsdifferenzdruck der trockenen Filter, war der Anstieg des Differenzdruckes durch Filmbildung hauptsächlich für die Unterschiede zwischen den Filterpaketen mit unterschiedlichen Gittern verantwortlich. Die unterschiedlichen Steigungen der Sprungkurven weisen auf eine unterschiedlich schnelle Ausbildung des Films, bzw. eine unterschiedliche hierfür benötigte Ölmenge hin. Dies wird auch an den Sättigungen der jeweils letzten Lagen sichtbar. Die Sättigung korreliert überwiegend mit der freien Fläche der Gitter. Einzige Ausnahme bildet R33(1,8). Aufgrund der hohen Anzahl an kleinen Öffnungen kommt es hier vermutlich zum Zurückhalten von Öl, welches nach Abstellen der Gasströmung wieder vom Medium aufgesogen wird.

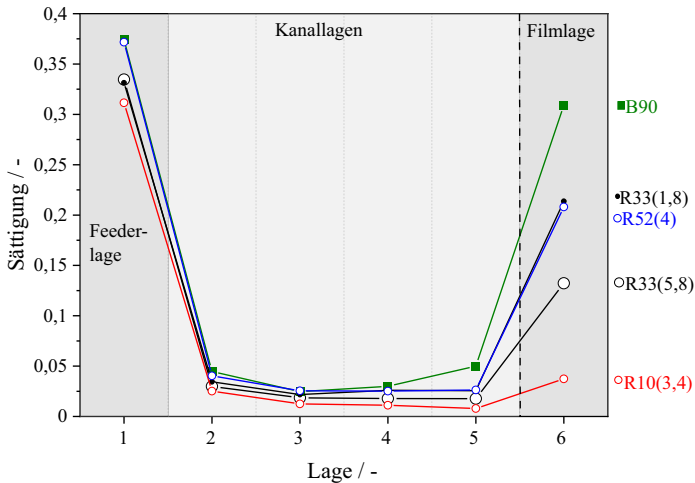


Abbildung 5.17: Einzellagensättigung von sechslagigen oleophilen Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächen.

Abbildung 5.18 (links) zeigt Differenzdruckverläufe von Gittern mit einem freien durchströmten Flächenanteil von 33 % und variierender Öffnungsgröße, Abstand und Form. Der anfängliche Differenzdruck der trockenen Filter korreliert recht gut mit dem Lochabstand (Stegbreite) der Gitter (Abbildung 5.18). R33(1,8) hat die geringste Stegbreite (3 mm) und in Kombination mit dem Filterpaket den geringsten Differenzdruck (22 mbar), das Gitter R33(5,8) hat die größte Stegbreite und das zugehörige Filter den höchsten Differenzdruck (28 mbar). Ursächlich hierfür ist die Kontraktion und Ablenkung der Strömung innerhalb des Filtermediums aufgrund der größeren Öffnungsabstände. Die Differenzdruckzunahme während der Kanalbildung ist ebenfalls näherungsweise gleich für alle Filter. Allerdings findet die Filmbildung bei dem Gitter R33(5,8) schon bei etwa 1 g kumulativer Ölmasse statt, bei den Gittern R33(4) und SQ33(4) bei 1,3 g, bei dem Gitter R33(1,8) jedoch erst bei 1,6 g kumulativer Ölmasse. Auch hinsichtlich des Beitrags des Films zur Differenzdruckzunahme während des Betriebs zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Gittern. Dies ist für das Gitter R33(5,8) mit 31 mbar am höchsten, bei R33(4) beträgt diese Zunahme 16 mbar, während die Differenzdruckzunahme durch die Filmbildung bei den beiden anderen Gittern dazwischen liegt. Die Filmbildung wird also offensichtlich von der Wahl des abströmseitigen Stützgitters signifikant beeinflusst.

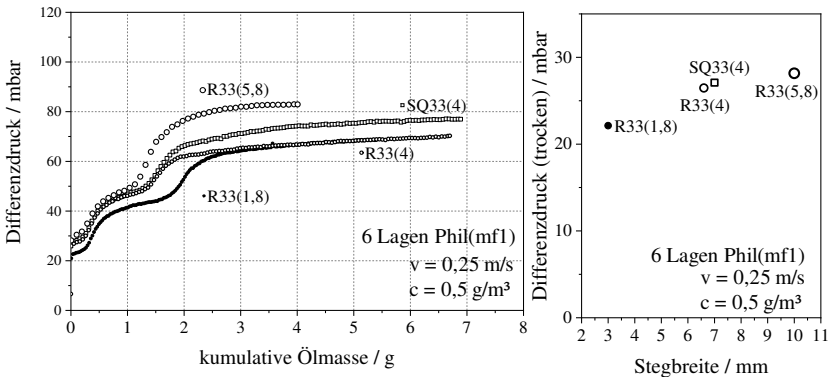


Abbildung 5.18: Differenzdruckverläufe von sechslagigen oleophilen Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern gleicher freier durchströmter Flächen und unterschiedlichen Öffnungsweiten und -form (links) sowie zugehörige Differenzdrücke zu Beginn der Beladung in Abhängigkeit des durchströmten Flächenanteils (rechts).

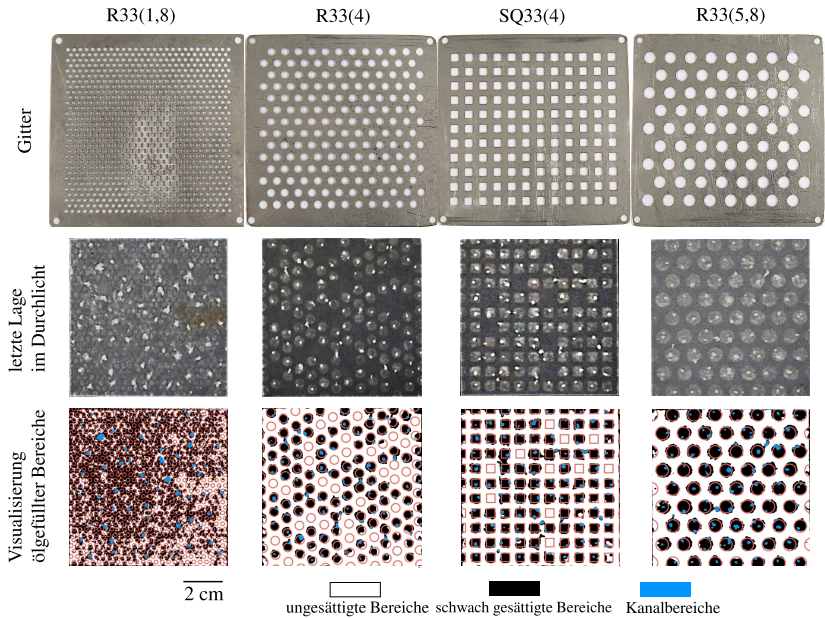


Abbildung 5.19: Durchlichtbilder der jeweils letzten (abströmseitigen) Lage von sechslagigen oleophilen Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern gleicher freier durchströmter Flächen und unterschiedlichen Öffnungsweiten und -form. Die Ölverteilung in den Lagen wurde durch Binarisierung der Bilder mit geeigneter Schwellwertanpassung visualisiert (untere Reihe)

Die Durchlichtbilder der jeweils letzten Lagen der einzelnen Filterpakete erlauben Rückschluss auf Unterschiede in der Ölverteilung und der Filmbildung bei einzelnen Stützgittern. Diese sind in Abbildung 5.19 zu sehen. Bereiche, die stärker gesättigt sind, erscheinen hierbei als nur schwach gesättigte oder ungesättigte Bereiche. Kanalbereiche können als Bereiche vollständiger Sättigung angenommen werden und erscheinen somit im Durchlicht am hellsten. Da die Flüssigkeitsmenge des Films (abschätzbar aus der Sättigung der letzten Lage abzüglich der Sättigung, welche durch Kanalbildung bedingt ist) nicht ausreicht, um die letzte Lage nach Abstellen der Strömung vollständig zu sättigen, sind diese im Durchlicht nur leicht heller als ungesättigte Teilbereiche. Die untere Reihe in Abbildung 5.19 zeigt die einzelnen Teilbereiche durch Binarisierung und passende Schwellwertanpassung visualisiert. Zu sehen ist zum einen, dass Flüssigkeitskanäle bevorzugt an offenen Bereichen der Gitter

enden, zum anderen, dass sich der Film von den Kanalenden aus und somit in denselben offenen Teilbereichen auf der Filterrückseite bildet. Die Ränder der Öffnungen, an denen Kanäle enden, begrenzen somit die Ausbreitung des Films auf weitere Bereiche der Filterrückseite. Von den Gittern abgedeckte Bereiche erscheinen in den Durchlichtbildern dunkel. Somit ist anzunehmen, dass sich der Film nicht auf diese Bereiche erstreckt hat. Bei den geringen Abständen zwischen den einzelnen Öffnungen des Gitters R33(1,8) ist es jedoch möglich, dass ein Kanal mehrere Löcher abdeckt (Kanal­durchmesser teils größer als Loch­durchmesser) und sich der Film auch über Bereiche ohne Kanalenden erstreckt. Bei den Gittern R33(4) und SQ33(4) endet nicht an jeder Öffnung ein Kanal. Somit bleiben Teilbereiche der Filterabströmseite filmfrei und der Differenzdruckanstieg im Betrieb ist deutlich geringer als für das Filter mit dem Gitter R33(5,8), bei dem an jeder Öffnung mindestens ein Kanal endet, so dass praktisch die gesamte offene Fläche der Rückseite mit dem Film bedeckt ist.

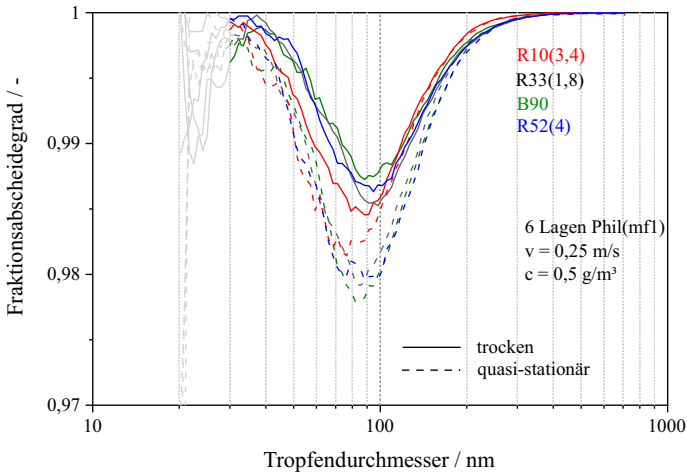


Abbildung 5.20: Fraktionsabscheidegrade von sechslagigen oleophilen Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächen

Bei den Fraktionsabscheidegraden der einzelnen Filter zeigen sich keine signifikanten Unterschiede mit Ausnahme des Gitters mit dem geringsten freien durchströmten Flächenanteil (Abbildung 5.20). Die MPPS der Filter mit Gittern eines offenen Flächenanteils von 33, 52 und 90 % beträgt im trockenen Zustand knapp unter 100 nm mit einem Abscheidegrad für diese Fraktion von

0,985 bis 0,987. R10(3,4) hingegen weist eine leicht niedrigere MPPS auf. Im quasistationären Zustand sinkt die MPPS für Filter mit Gittern ab 33 % freiem Flächenanteil auf unter 90 nm und einen Fraktionsabscheidegrad von 0,98, im Falle von R10(3,4) auf 80 nm und 0,982. Dabei sind Fraktionsabscheidegrade im Vergleich zu den anderen Gittern für Tropfen kleiner als die MPPS niedriger und für Tropfen größer als die MPPS höher. Die höheren Gasgeschwindigkeiten bei Verwendung eines Gitters mit geringem freiem Flächenanteil bedingen eine Verschlechterung der diffusiven Abscheidung bei gleichzeitiger Verbesserung der Trägheitsabscheidung. Dieses Verhalten ist analog zum Betrieb von Filtern mit höheren Filtrationsgeschwindigkeiten.

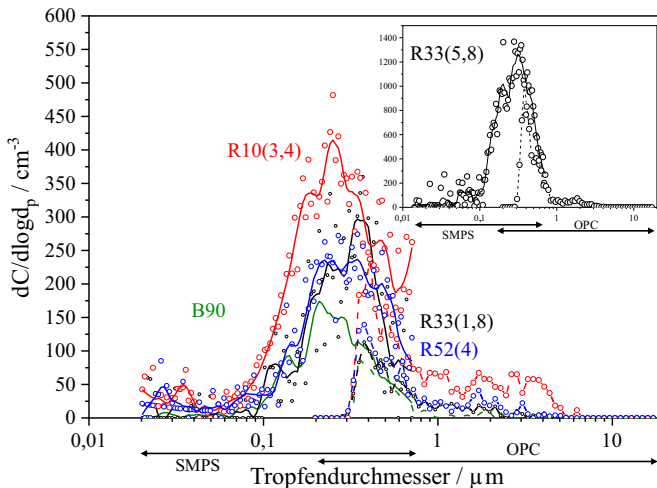


Abbildung 5.21: Größenverteilungen von an der Rückseite sechslagiger oleophiler Filterpakete in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächen wiedereingetragenen Tropfen. R33(5,8) ist aufgrund der hohen Konzentrationen gesondert dargestellt.

Zur Messung des Wiedereintrags von Tropfen in den Reingasstrom an der Filterrückseite wurden die oleophilen Filter nach Ende der Beladung mit partikelfreier Druckluft bei konstanten 0,25 m/s durchströmt und die Tropfengrößenverteilungen im Reingas mit SMPS und optischem Partikelzähler gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.21 dargestellt. Die Filter mit den Gittern R33(4) und SQ33(4) wurden hier zwecks besserer Übersichtlichkeit weggelassen. Die gemessenen Tropfengrößenverteilungen waren sehr ähnlich zu denen des Filters mit dem Gitter R33(1,8). Die mit dem SMPS bestimmten Größenverteilungen

gen weisen Modalwerte zwischen 200 und 300 nm auf. Die mit dem optischen Partikelzähler bestimmten Tropfengrößenverteilungen weisen im überlappenden Größenbereich zwischen 300 und 700 nm eine recht gute Übereinstimmung mit denen des SMPS auf, für Tropfengrößen kleiner als 300 nm sinken die gemessenen Konzentrationen rapide ab - ein Indiz für die abnehmende Zählfizienz des Partikelzählers unterhalb dieser Tropfengröße. Gemäß Wurster et al. [81] erhöht sich der Wiedereintrag von Tropfen ins Reingas mit steigender Filtrationsgeschwindigkeit. Da hier im wesentlichen die Gasgeschwindigkeit an der Fiterabströmseite, wo das Sekundäraerosol entsteht, entscheidend ist, ist die durchströmte Fläche der Stützgitter bei gleichbleibendem Volumenstrom der entscheidende Faktor für das Reentrainment. Entsprechend zeigt das Gitter B90 die niedrigste und R10(3,4) die höchste Konzentration, während die restlichen Gitter dazwischenliegen. Einzige Ausnahme bildet hier das Gitter R33(5,8). Da das Zerplatzen von Blasen im rückseitigen Film der dominierende Mechanismus zur Entstehung des Sekundäraerosols ist, ist zu vermuten, dass die Filmabdeckung bei Verwendung diesen Gitters (siehe Abbildung 5.19) in Kombination mit erhöhten Gasgeschwindigkeiten Ursache für die hohe Konzentration wiederingetragener Tropfen ist.

5.4.2 Einfluss von Stützgittergeometrien bei oleophoben Filtern

Da sich bei oleophoben Filtermedien der Film anströmseitig bildet, ist zumindest kein Einfluss abströmseitiger Stützgitter auf die Filmbildung zu erwarten. Wie jedoch schon bei oleophilen Medien gezeigt, ist ein Einfluss auf den anfänglichen Differenzdruck sowie die Flüssigkeitsverteilung innerhalb des Mediums zu erwarten. Abbildung 5.22 (links) zeigt Differenzdruckverläufe von Sechslagenpaketen des Mediums Phob(mg) in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächenanteile zwischen 10 und 90 %. Wie zu erwarten korreliert der anfängliche Differenzdruck der unbeladenen Filter mit dem offenen Flächenanteil der Gitter und dem Abstand der Öffnungen (dazu siehe Abbildung 5.22 rechts). Der durch Filmbildung bedingte zusätzliche Differenzdruck beträgt für alle Filter etwa 20 mbar. Dies stützt die zuvor getroffenen Annahme, dass abströmseitige Stützgitter keinen signifikanten Einfluss auf die Filmbildung oleophober Filter haben, bzw. dass die Filmbildung nicht von Sützgittern beeinflusst wird, wenn diese nicht in Kontakt mit der filmbildenden Filtergrenzfläche sind.

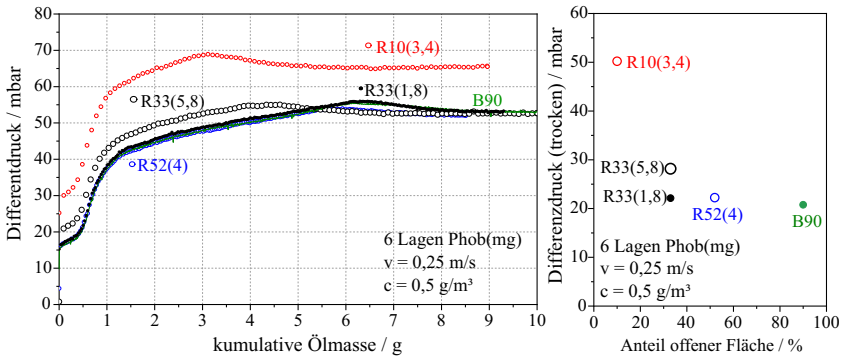


Abbildung 5.22: Differenzdruckverläufe von sechslagigen oleophoben Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächen (links) sowie zugehörige Differenzdrücke zu Beginn der Beladung in Abhängigkeit des durchströmten Flächenanteils (rechts).

Auch bei Filtern mit Stützgittern gleicher freier durchströmter Fläche (33 %) jedoch unterschiedlicher Öffnungsweite, -form und -abstand korreliert der Anfangsdruckverlust mit dem Perforationsabstand. Anders als im Falle oleophiler Medien ist jedoch kein signifikanter Einfluss auf den Differenzdruck im quasistationären Zustand erkennbar. Die Differenzdruckzunahme durch Filmbildung beträgt auch hier jeweils 20 mbar für alle Filter. Gitter mit höheren Perforationsabständen führen zu einem kürzeren Kanalbereich im Differenzdruckverlauf der Filter und zu einem früheren Erreichen des quasistationären Zustands, da hier die Kanäle stärker auf die Austrittsöffnungen fokussiert sind. Dieser Effekt wird allerdings durch die Unterschiede im Anfangsdifferenzdruck kompensiert, so dass der Differenzdruck im quasistationären Zustand für alle Filter etwa 51 bis 52 mbar beträgt.

Die Fraktionsabscheidegrade von oleophoben Filterpaketen sind in Abbildung 5.24 dargestellt. Auch hier ist nur der Abscheidegrad für ein Gitter eines freien durchströmten Flächenanteils von 33 % gezeigt, da der Verlauf für die Kurven aller vier Gitter recht ähnlich war. Für offene Flächenanteile von 33, 52 und 90 % liegt die MPPS knapp unter 100 nm im trockenen Zustand mit Fraktionsabscheidegraden von etwa 0,965, wobei das Gitter R10(3,4) wieder die Ausnahme mit geringfügig niedrigerer MPPS und Fraktionsabscheidegrad für diese Tropfengröße darstellt. Im quasistationären Zustand verringerten sich die MPPS auf 90 nm und die Fraktionsabscheidegrade an der MPPS auf 0,94 bis 0,953. Das Filter mit dem Gitter R10(3,4) hat aufgrund der höheren

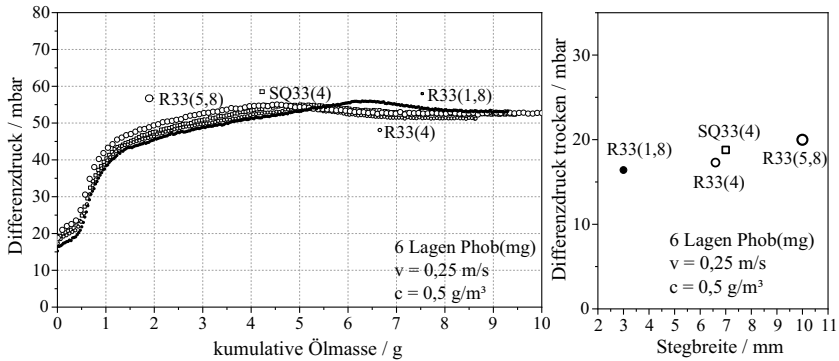


Abbildung 5.23: Differenzdruckverläufe von sechslagigen oleophoben Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern gleicher freier durchströmter Flächen und unterschiedlichen Öffnungsweiten und -form (links) sowie zugehörige Differenzdrücke zu Beginn der Beladung in Abhängigkeit des Perforationsabstands (rechts).

Geschwindigkeit des Aerosols im Filtermedium im Vergleich zu den anderen Filtern höhere Abscheidegrade für Tropfen größer als 200 nm im trockenen Zustand und für alle erfassten Tropfengrößen im quasistationären Zustand.

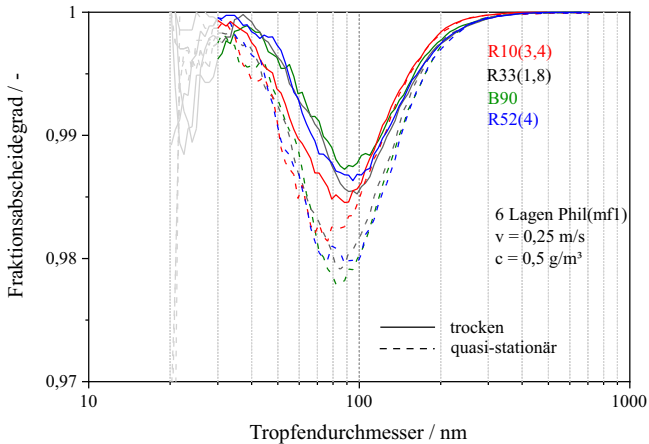


Abbildung 5.24: Fraktionsabscheidegrade von sechslagigen oleophoben Filterpaketen in Kombination mit unterschiedlichen Stützgittern.

5.5 Einfluss von Filterangeschwindigkeit und Ölbeladungsrate in Zusammenhang mit der Medienbenetzbarkeit

Nach dem Kanal-Film-Modell von Kampa et al. [36] hängen die beiden wesentlichen Flüssigkeitstransportmechanismen der Kanal- und Filmbildung und die daraus resultierenden Änderungen des Differenzdrucks auf charakteristische Weise mit den Betriebsbedingungen der Filter, wie der Filteranströmgeschwindigkeit und der Ölbeladungsrate zusammen. Demnach ist der zusätzliche Differenzdruck durch Kanalbildung (Kanaldruckverlust) unabhängig von der Filteranströmgeschwindigkeit, da exakt dieser Differenzdruck nach dem Modell benötigt wird, um die Flüssigkeit durch das Filter zu befördern. Eine Änderung der Geschwindigkeit wird durch eine Anpassung der Sättigung der Filter kompensiert. Mit der Beladungsrate sollte der Kanaldruckverlust jedoch ansteigen, da eine größere Menge Flüssigkeit durch das Filter befördert werden muss. Dies geschieht durch eine höhere Anzahl an Ölkanälen innerhalb des Mediums. Die Filmbildung hingegen ist abhängig von Medien- und Flüssigkeitseigenschaften (Porengrößenverteilung des Mediums und Oberflächenspannung der Flüssigkeit), womit der Differenzdrucksprung durch die Filmbildung unabhängig von Filteranströmgeschwindigkeit und Beladungsrate sein sollte. Kolb et al. [42] konnten dieses Verhalten für den Differenzdruck für verschiedene Filteranströmgeschwindigkeiten und Ölbeladungsraten bestätigen.

Analog zur Entwicklung des Differenzdrucks während der Filterbeladung haben die Flüssigkeitstransportmechanismen ebenso Einfluss auf die Entwicklung des Filterabscheidegrades bzw. der Penetration im Betrieb, u.a. da die sich einstellende Sättigung für die effektive Porosität und damit freie Kollektorfläche maßgeblich ist. Hier konnte schon Kampa einen Anstieg der Reingaskonzentration während der Kanalbildung und ein Einbrechen mit der Filmbildung beobachten [38]. In diesem Abschnitt sollen diese Zusammenhänge näher beleuchtet werden. Dazu wurden jeweils Filter bestehend aus sechs Lagen eines oleophilen (Phil(inhom)) oder oleophoben (Phob(inhom)) Mediums bei unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeiten und Beladungsraten mit Ölnebel bis zum Erreichen des quasistationären Zustands beaufschlagt und die Reingaskonzentration durchgängig mit einem CPC und punktuell größen aufgelöst mit einem SMPS gemessen.

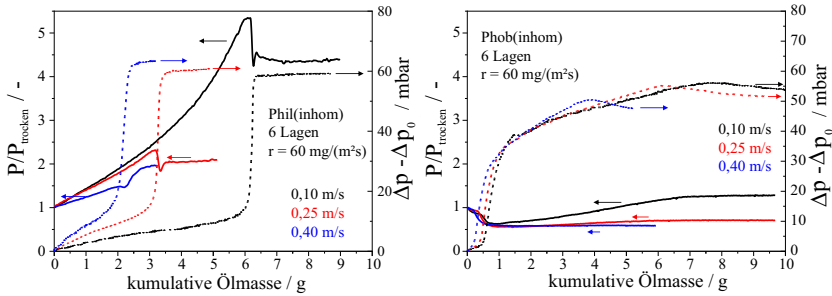


Abbildung 5.25: Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration und Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse für oleophile (links) und oleophobe (rechts) Filterpakete bei Beladung mit unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeiten.

Abbildung 5.25 zeigt die Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration und den Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über der kumulativen Ölmasse gemessen an oleophilen und oleophoben Filterpaketen bei der Beladung mit Öl bei Filteranströmgeschwindigkeiten von 0,1 m/s, 0,25 m/s und 0,4 m/s bei einer Ölbeladungsrate von $60 \text{ mg}/(\text{m}^2\text{s})$. Unabhängig vom Medium wird der quasistationäre Zustand bei höheren Geschwindigkeiten bereits nach kürzeren Zeiten bzw. geringeren kumulativen Ölmassen erreicht, da sich deutlich geringere Sättigungen im Medium infolge der erhöhten Geschwindigkeit einstellen. Für das oleophile Medium bestätigt sich, dass die Differenzdruckzunahme im Betrieb weitestgehend unabhängig von der Geschwindigkeit ist. Der Kanalanstieg ist bei steigender Geschwindigkeit zwar kürzer, jedoch auch steiler, so dass das Δp_{Kanal} annähernd konstant bleibt. Bei der Entwicklung der Penetration hingegen zeigen sich deutliche Vorteile bei einem Betrieb mit hohen Geschwindigkeiten. Hier bedingen hohe Geschwindigkeiten nicht nur kürzere, sondern auch flachere Anstiege der Penetration. Für 0,1 und 0,25 m/s ist die Filmbildung von einem deutlichen Einbruch der Reingaskonzentration begleitet. Dieser ist bei 0,4 m/s lediglich angedeutet. Danach kommt es zu einem Anstieg der relativen Penetration aufgrund des einsetzenden Entrainments durch zerplatzende Blasen im abströmseitigen Film. Im Bezug auf Δp_{Kanal} verhält sich das oleophobe Medium (Abbildung 5.25 (rechts)) ebenso, jedoch zeigen sich hier Unterschiede bei dem Sprung des Differenzdruckes zu Beginn der Beladung im Bereich von 5-10 mbar, welche sich entsprechend auf den Differenzdruck im quasistationären Zustand auswirken. Diese Unterschiede lassen sich mit dem Kanal-Film-Modell nicht zufriedenstellend erklären und

bedürfen weiterer Aufklärung. Auffällig ist, dass die benötigte Ölmenge zur Filmbildung bei höheren Geschwindigkeiten signifikant niedriger ist, bzw. die Filmbildung bei niedrigeren kumulativen Ölmassen abgeschlossen ist und in die Kanalbildung übergeht. Wie beim oleophilen Medium ist ein Einbrechen der Penetration mit der Filmbildung zu beobachten, was die Bedeutung des Films als Abscheider deutlich macht. Der anschließende Anstieg der Penetration fällt für höhere Geschwindigkeiten deutlich geringer aus, so dass die Filter im quasistationären Zustand einen höheren Gesamtabscheidegrad aufweisen als im trockenen Zustand.

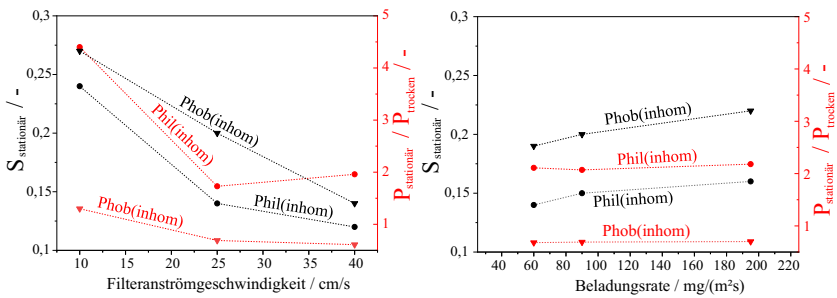


Abbildung 5.26: Globale Sättigungen im quasistationären Zustand für oleophile und oleophobe Filterpakete bei Beladung mit unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeiten (links) und Beladungsraten (rechts).

Der Nachteil bezüglich des Gesamtabscheidegrades der Filter bei Betrieb mit niedrigen Geschwindigkeiten lässt sich auf den stärkeren Verlust von Kollektoroberfläche durch eine höhere sich einstellende Flüssigkeitssättigung in den Medien zurückführen (siehe Abbildung 5.26). Um Auswirkungen auf den Fraktionsabscheidegrad zu untersuchen, wurden zusätzlich SMPS Messungen im trockenen und im quasistationären Zustand durchgeführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 5.27 dargestellt. Für 0,1 m/s zeigt sich eine deutliche Verschlechterung des Abscheidegrades für alle Tropfengrößen < 200 nm mit einer deutlichen Verschiebung der MPPS von 130 nm auf 100 nm. Besonders deutlich fällt die Verschlechterung des Abscheidegrades im Bereich von Tropfen kleiner als die MPPS (im trockenen Zustand) aus. Hier kommen neben dem Verlust an Kollektorfläche auch die durch die hohen Sättigungen erhöhten inneren Gasgeschwindigkeiten und somit eine Verschlechterung der diffusiven Abscheidung zum Tragen. Bei einer Filteranströmgeschwindigkeit von 0,4 m/s hingegen zeigt sich eine schwächere Verschiebung der MPPS (von ca. 100 nm auf 85 nm) und

eine deutliche Verbesserung der Abscheidung von Tropfengrößen größer als die MPPS, während die Verschlechterung für Tropfen kleiner als die MPPS weniger deutlich ausfällt als für geringere Geschwindigkeiten, so wie es aufgrund der im Vergleich niedrigeren Sättigung zu erwarten war.

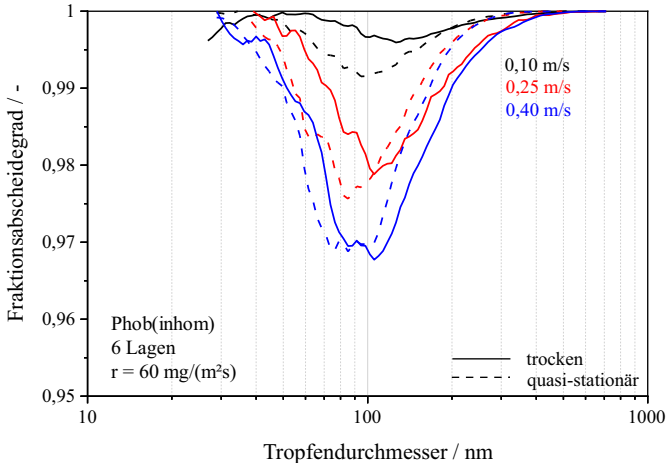


Abbildung 5.27: Fraktionsabscheidegrade im trockenen und quasistationären Zustand für oleophile und oleophobe Filterpakete bei Beladung mit unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeiten.

Nach dem Kanal-Film-Modell sollte die Ölbeladungsrate keinen Einfluss auf die Filmbildung, jedoch aufgrund der unterschiedlichen Menge an zu transportierendem Öl auf das Δp_{Kanal} haben. Um den Einfluss der Beladungsrate der Filter auf deren Differenzdruck und Abscheideverhalten zu evaluieren, wurden Sechslagenpakete von Phil(inhom) und Phob(inhom) mit Ölbeladungsraten von $60 \text{ mg}/(\text{m}^2\text{s})$ (entspricht $0,24 \text{ g}/\text{m}^3$ Rohgaskonzentration), $90 \text{ mg}/(\text{m}^2\text{s})$ ($\hat{=}$ $0,36 \text{ g}/\text{m}^3$) und $195 \text{ mg}/(\text{m}^2\text{s})$ ($\hat{=}$ $0,78 \text{ g}/\text{m}^3$) mit einer konstanten Filteranströmgeschwindigkeit von $0,25 \text{ m/s}$ beladen. Abbildung 5.28 zeigt die Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration und den Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über der kumulativen Ölmasse gemessen an oleophilen und oleophoben Filterpaketen bei der Beladung mit Öl. Bei beiden Medien wird der quasistationäre Zustand bei höheren Ölbeladungsraten erst bei höheren kumulativen Ölmassen erreicht, da für den Transport des Öls durch das Medium mehr Ölkanäle im Medium notwendig sind [42], was sich entsprechend in einer höheren Sättigung widerspiegelt (siehe Abbildung 5.26). Dies äußert sich in einem längeren Anstieg des Δp_{Kanal} und somit erhöhtem

Differenzdruck im quasistationären Zustand. Die Unterschiede sind aber relativ gering. Der Δp_{Film} ist unabhängig von der Beladungsrate.

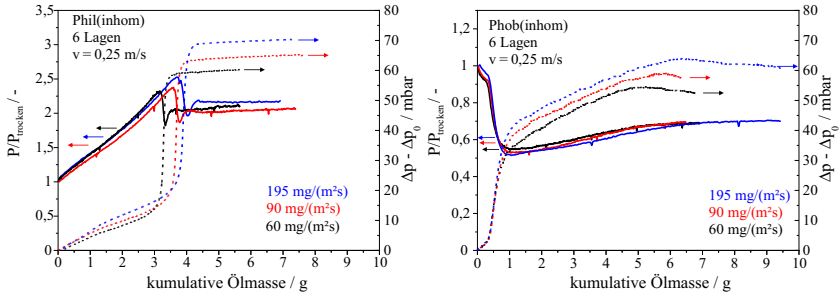


Abbildung 5.28: Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration und Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse für oleophile (links) und oleophobe (rechts) Filterpakete bei Beladung mit unterschiedlichen Ölbeladungsraten.

Für das oleophile Medium sind analog dazu auch die Anstiege der Penetration während der Beladung für die unterschiedlichen Beladungsraten nahezu identisch und unterscheiden sich hauptsächlich in der Länge der Anstiege, wobei die Unterschiede jedoch ebenfalls nur gering ausfallen. Der Einbruch der Penetration bei der Filmbildung ist ebenfalls für alle Beladungsraten gleich, so dass die Unterschiede in der Penetration im quasistationären Zustand nur marginal sind. Im Falle des oleophoben Mediums sind wie schon zuvor in der Versuchsreihe zum Geschwindigkeitseinfluss, die Abweichungen im Δp_{Film} zwischen den einzelnen Beladungsraten erstaunlich, da diese der Erwartungshaltung aus dem Kanal-Film-Modell widersprechen, nach welchem Δp_{Film} unabhängig von der Beladungsrate sein sollte. Δp_{Film} steigt jedoch mit der Beladungsrate an. Offenbar sind bei einer anströmseitigen Bildung des Flüssigkeitsfilms nicht alleine die Medieneigenschaften für die Änderung des Differenzdruckes bestimmend.

Beim Vergleich der Penetrationsentwicklung im Betrieb beider Medien (Abbildung 5.29) ist neben der offensichtlichen unterschiedlichen Abfolge der Öltransportmechanismen mit deren Auswirkungen deutlich erkennbar, dass der Anstieg der Penetration bei der Kanalbildung bei beiden Medien sehr stark unterschiedlich ausgeprägt ist. Dies ist ein Indiz dafür, dass im oleophilen Medium durch die Ausbildung der Kanalstrukturen besonders abscheiderelevante Bereiche betroffen sind, zumal die Sättigungen für das oleophile Medium im quasistationären Zustand eigentlich geringer sind (siehe Abbildung 5.26

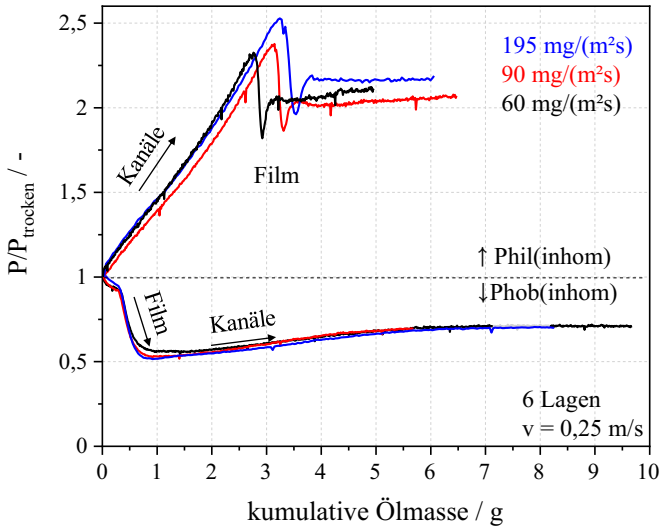


Abbildung 5.29: Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration über kumulativer Ölmasse für oleophile und oleophobe Filterpakete bei Beladung mit unterschiedlichen Ölbeladungsraten.

(rechts)). Ursachen hierfür sind möglicherweise die unterschiedlichen Kanalbildungsmechanismen in oleophilen und oleophoben Medien, so dass sich Kanäle in oleophilen Medien tendenziell eher in feinstrukturierteren Bereichen bilden, während dies in oleophoben Medien in Bereichen größerer Struktur der Fall ist.

6 Schlussfolgerungen für die Medienauslegung

Bei der Einordnung der gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Auslegung von Koaleszenzfiltern zur Ölnebelabscheidung ist zu beachten, dass sich gegebenenfalls nicht sämtliche Ergebnisse ohne Weiteres auf reale Systeme übertragen lassen. Die den Änderungen des Differenzdrucks und des Abscheidegrades zugrundeliegenden Prozesse lassen sich jedoch maßgeblich durch Filtermedieneigenschaften beeinflussen, womit der Auswahl der Filtermedien bei der Filterauslegung eine bedeutende Rolle zukommt. In dieser Arbeit wurden bezüglich Filtermedien vorrangig zwei verschiedene Ansätze zur Optimierung des Betriebsverhaltens verfolgt. Der erste war die Anpassung von Benetzbarkeits- sowie Struktureigenschaften vom Filtermedien, wie die Porengrößen- oder Faserdurchmesserverteilung oder die Strukturhomogenität. Der zweite war die Kombination mehrerer Medientypen mit unterschiedlichen Struktur- und Benetzungseigenschaften in einem Filterpaket.

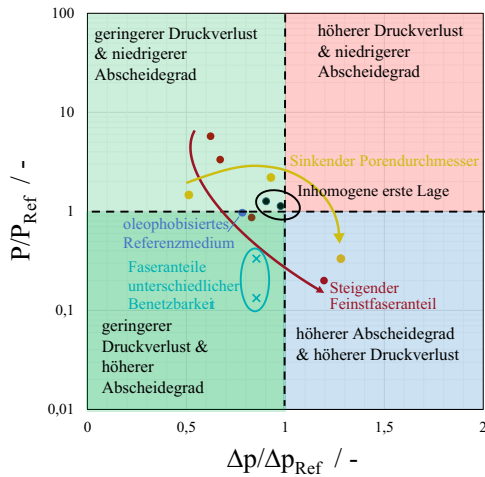


Abbildung 6.1: Penetration und Differenzdruck im quasistationären Zustand sechslagiger Filtermedienaufbauten mit verschiedenen Benetzbarkeits- und Struktureigenschaften in Bezug auf Penetration und Differenzdruck von sechs Lagen des Mediums Phil(mf2).

Ein weiterer untersuchter Aspekt der Filterauslegung ohne unmittelbaren Medienbezug war die Auswahl des eingesetzten Stützgitters. Die für das Betriebsverhalten bestimmenden Öltransportmechanismen innerhalb der Filtermedien standen dabei im Fokus und sollten so beeinflusst werden, dass der Differenzdruck und die Penetration von Tropfen durch die Filter möglichst gering ausfällt.

Abbildung 6.1 zeigt eine Einordnung verschiedener Maßnahmen in Bezug auf Penetration sowie Differenzdruck mit einem sechslagigen Filterpaket des Mediums Phil(mf2) in Kombination mit dem Stützgitter R33(1,8) als Referenz.

Gezeigt ist das Verhältnis des Differenzdrucks sowie der Penetration im quasistationären Zustand von Filtermedien mit variierendem Feinstfaseranteil (siehe Kapitel 4.1.1), Medien unterschiedlicher Porendurchmesser (Kapitel 4.1.2), Faseranteilen unterschiedlicher Benetzbarkeit (Kapitel 4.2.1) sowie Filterpaketen mit inhomogener anströmseitiger Lage (Kapitel 4.2.2). Deutlich zu sehen ist, wie Differenzdruck und Abscheidegrad mit zunehmendem Feinstfaseranteil ansteigen und durch Strukturinhomogenität der Differenzdruck zulasten des Abscheidegrades verringert werden kann. Eine Verbesserung der Betriebseigenschaften kann zudem durch die Oleophobisierung des gesamten Mediums oder bestimmter Faseranteile erreicht werden. Hinsichtlich der Porengrößenverteilung (gelbe Punkte) war keine eindeutige Systematik erkennbar.

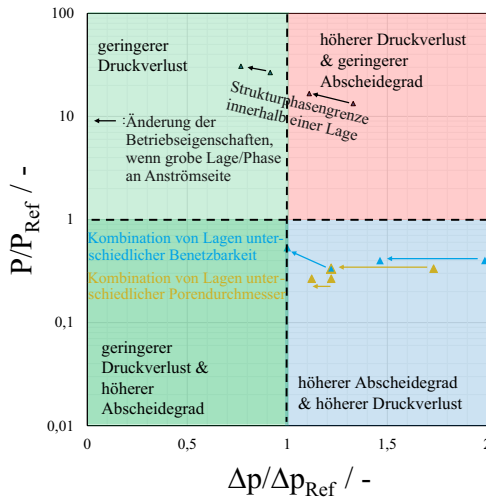


Abbildung 6.2: Übersicht der Penetration und des Differenzdruckes im quasistationären Zustand von Filtermedienaufbauten bestehend aus Kombinationen unterschiedlicher Medien und Aufbauten mit einer Strukturphasengrenze innerhalb jeweils einer Lage in Bezug auf Penetration und Differenzdruck von sechs Lagen des Mediums Phil(mf2).

Abbildung 6.2 zeigt Penetration und Differenzdruck verschiedener Kombinationen unterschiedlicher Medientypen innerhalb eines Lagenpakets im Verhältnis

zu sechs Lagen Phil(mf2). Hinsichtlich der Spanne möglicher Betriebseigenschaften konnte durch die gezielte Anordnung verschiedener Medientypen innerhalb eines Lagenpakets (und in geringerem Maße beim Einsatz von Lagen mit innerer Strukturphasengrenze) der weiteste Bereich abgedeckt werden. Dabei ist zu beachten, dass in dieser Arbeit nur jeweils maximal zwei verschiedene Medientypen innerhalb eines Lagenpakets kombiniert wurden und dabei jeweils in einer beschränkten Anzahl an möglichen Anordnungen.

Bei der Evaluierung des Einflusses der abströmseitigen Stützstruktur (siehe Abbildung 6.3) ist gut erkennbar, dass das Stützgitter lediglich für oleophobe Medien Einfluss auf den Differenzdruck im quasistationären Zustand hat. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse zur Optimierung des Betriebsverhaltens (Vermeidung von Filmen an den Grenzflächen feinporiger Medien, Übernahme von Kanalstrukturen) können zur Auslegung weiterer optimierter Aufbauten genutzt werden.

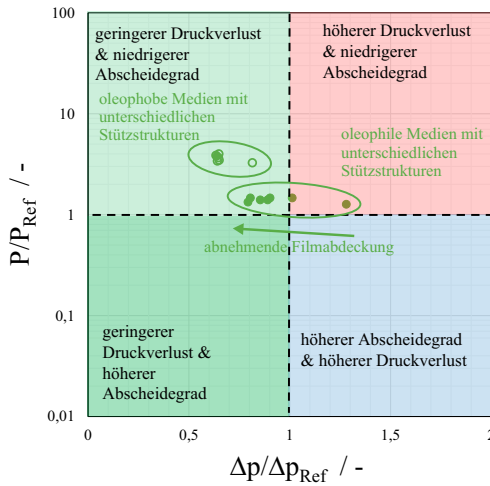


Abbildung 6.3: Übersicht der Penetration und des Differenzdruckes im quasistationären Zustand sechslageriger Filtermedienaufbauten mit unterschiedlichen Stützstrukturen in Bezug auf Penetration und Differenzdruck von sechs Lagen des Mediums Phil(mf2) (mit dem Gitter R33(1,8).

Basierend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit sähe ein optimierter Aufbau etwa folgendermaßen aus: einige Lagen eines groben oleophoben Mediums mit geringem Differenzdruckanstieg durch Filmbildung an der Anströmseite, gefolgt von einigen Lagen eines feinen oleophoben Mediums zur Verbesserung der

Abscheidung. Großes Potential haben auch Anordnungen, bei denen ein feines oleophobes Medium auf ein grobes oleophiles folgt, da hier ein geschlossener Film vermieden wird (siehe Kapitel 5.3). Die dabei zu verwendende Anzahl an Lagen bzw. Mediendicke richtet sich dabei nach der benötigten Qualität des Reingases. Das eingesetzte Stützgitter ist bei der abströmseitigen Verwendung eines oleophoben Mediums unerheblich.

Wird anströmseitig ein benetzbares Medium verwendet, so zeigte sich zudem, dass die Verwendung einer Filterlage mit einer ausgeprägten Strukturinhomogenität den Differenzdruckanstieg im Betrieb signifikant verringern kann. Bei der Auslegung von Filtern ist dies also entsprechend mit zu berücksichtigen. Wird abströmseitig ebenfalls ein oleophiles Medium verwendet, so ist auf die Auswahl des richtigen Stützgitters zu achten. In dieser Arbeit zeigten Aufbauten mit dem Gitter R33(1,8) das günstigste Betriebsverhalten.

Bei der Verwendung von Lagenpaketen bestehend aus nur einem einzigen Medientyp zeigten Medien bestehend aus Fasern unterschiedlicher Benetzbarkeit das größte Potential hinsichtlich Differenzdruck und Abscheidegrad (siehe Kreuze in Abbildung 6.1). Diese konnten allerdings zum Zeitpunkt der Arbeit lediglich auf dem Blattbildner hergestellt werden.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Einfluss von Medieneigenschaften und der Einsatz unterschiedlicher Medien in der Ölnebel filtration untersucht. Auf Grundlage der bei der Koaleszenzfiltration in Medien ablaufenden Mechanismen wurde dabei die Relevanz von Struktur, Benetzbarkeit und Medienkonfiguration in Filtern für deren Betriebseigenschaften evaluiert.

Zur Untersuchung dieser Aspekte wurde eine experimentell gestützte Vorgehensweise gewählt. Zunächst wurden geeignete Methoden zur Charakterisierung von filtrationsrelevanten Medieneigenschaften identifiziert und bewertet. Für die Erfassung von Strukturparametern wurden unter anderem bildgebende Verfahren eingesetzt. Insbesondere bei der Charakterisierung von mikroskaligen Strukturgrößen spielt dabei das räumliche Auflösungsvermögen dieser Verfahren eine große Rolle. Die Rasterelektronenmikroskopie ist zwar hinsichtlich der Auflösung geeignet, um kleinste Strukturen abzubilden, jedoch lassen sich kaum Informationen aus dem Medieninneren gewinnen. Die Mikrocomputertomografie hingegen liefert 3D Volumendaten des Mediums, so dass eine Aufklärung der Struktur in mikroskopisch schwer zugänglichen Bereichen möglich ist. Mit dieser Methode ließen sich Faserdurchmesserverteilungen verschiedener Medien bestimmen, wobei festgestellt wurde, dass diese recht gut mit den nominell bei der Medienherstellung zugegebenen Faserdurchmessern übereinstimmen. Jedoch konnten feinste Fasern aufgrund der im Vergleich zu dem REM beschränkten Auflösung nur unzureichend erfasst werden. Die Orientierung der Fasern in Strömungsrichtung konnte ebenfalls bestimmt werden, wobei der überwiegende Anteil der Fasern für alle vermessenen Medien senkrecht zur Durchströmungsrichtung orientiert war. Aus den gewonnenen Volumendaten konnten zudem Porendurchmesserverteilungen bestimmt werden. Die geringen räumlichen Abmessungen hochauflösender Aufnahmen und der hohe rechnerische und zeitliche Aufwand je gewonnener Aufnahme stellen allerdings die Praktikabilität dieser Methode infrage. Aufgrund ihrer schnellen Durchführbarkeit und dem relativ geringen apparatetechnischen Aufwand ist die Kapillarflussporometrie gegenüber der Mikrocomputertomografie als Porencharakterisierungsmethode zu bevorzugen. Zur Charakterisierung der Medienstrukturhomogenität wurde eine Methode basierend auf der fraktalen Geometrie implementiert. Mit der differentiellen Boxcounting Methode wurde die Lakunarität als kennzeichnende Größe für die Homogenität von Filtermedien auf Grundlage von Durchlichtbildern bestimmt.

Die Bestimmung des Einflusses mikroskaliger Strukturgrößen wurde dadurch erschwert, dass sich die beiden im Fokus stehenden Größen - die Porengrößenverteilung und die Faserdistribution/der Feinstfaseranteil - nicht ohne weiteres

bei der Produktion der Medien unabhängig voneinander ändern lassen. Bei Erhöhung des Feinstfaseranteils sank der mittlere Porendurchmesser, während Differenzdruck und Abscheidegrad anstiegen. Hier war insbesondere ein Zusammenhang von Feinstfaseranteil/Porendurchmesser und dem durch Filmbildung verursachten Differenzdruckanstieg feststellbar. Diese Feststellung ist so allerdings nicht pauschal auf andere Medien mit anderer Faserzusammensetzung und Porengrößenverteilung übertragbar.

Die Strukturhomogenität von oleophilen Filtervliesen, insbesondere die Homogenität der vordersten Filterlage wurde als wesentlicher Einflussfaktor auf das Betriebsverhalten der Filter identifiziert, da die Vorgänge in dieser Lage eine entscheidende Rolle bei der Ausbildung von Flüssigkeitskanälen im Filter spielen. Abgeschiedenes Öl sammelt sich aufgrund der Kapillarität bevorzugt in dichteren bzw. feineren Teilbereichen der ersten Lage und bildet bei zunehmender Ölbeladung hinter diesen Bereichen Kanäle aus. Bei sehr homogenen Medien führt die Abwesenheit solcher definierten Bereiche zu einer gleichmäßigen Abscheidung und Akkumulation von Öl in der ersten Filterlage vor der Bildung von Kanälen. Im Differenzdruckverlauf macht sich dies durch einen tiefenfilterähnlichen Anstieg direkt zu Beginn der Beladung bemerkbar, welcher schließlich in den linearen Anstieg durch Kanalbildung übergeht. Bei sehr langsamen Anströmgeschwindigkeiten ist ein Einfluss der Homogenität über die erste Lage hinaus erkennbar. So ändert sich die Ölverteilung innerhalb homogener Medien von abgegrenzten Kanälen hin zu einer trichterförmig zur Abströmseite hin zulaufenden Form, während für inhomogene Medien weitestgehend eine Gleichverteilung von Kanälen innerhalb des Filterpakets erhalten bleibt.

Die Dicke der Filterpakete (d.h. die Anzahl der verwendeten Lagen) wirkt sich neben dem Anfangsdruckverlust auch auf den Anstieg des Differenzdruckes bei der Bildung von Kanälen aus. Darüber hinaus steigt die Penetration bei der Kanalbildung linear an, so dass das Hinzufügen weiterer Lagen analog auch einen stärkeren Anstieg der Penetration verglichen mit der Anfangspenetration bei der Kanalbildung nach sich zieht. Der Film führt hingegen zu einem Absinken der Penetration, da dieser als Trägheitsabscheider wirkt, so dass gegebenenfalls der Gesamtabseidegrad der Filter im quasi-stationären Zustand höher sein kann als der Filter im unbeladenen Zustand. Bei einer hohen Anzahl an Lagen oder hocheffizienten Medien ist der Wiedereintrag von Tröpfchen an der Reingasseite der dominierende Mechanismus für die Ölkonzentration im Reingas.

Bei der Verwendung unterschiedlicher Medien in einem Filterpaket zeigen bestimmte Konfigurationen hinsichtlich ihrer Betriebseigenschaften deutliche Vorteile. Die wesentlichen Ursachen sind zum einen die Übernahme von Kanalstrukturen aus einem vorhergehenden Medium, so dass sich beispielsweise eine geringere Sättigung in dem Medium einstellt als durch "freie" Kanalbildung. Zum anderen lässt sich ein deutlich geringerer Differenzdruck durch Vermeidung der Filmbildung an feinporigen Medien realisieren. Bei Konfigurationen mit einem groben oleophilen Medium an der An- und einem feinen oleophoben Medium an der Abströmseite tritt zudem ein unvollständiger Film auf, so dass der Differenzdruckanstieg hier ebenfalls deutlich geringer ausfällt.

Neben den Medien ist das in Filtern verwendete Stützgitter eine Komponente, welche ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Flüssigkeitsverteilung im Filter hat. So zeigen sich bei oleophilen Medien bei der Verwendung abströmseitiger Stützgitter deutliche Unterschiede bezüglich des Differenzdruckanstiegs durch Filmbildung. Ursache hierfür ist, dass sich der Film u.U. nicht über die gesamte frei durchströmte Fläche an der Abströmseite ausbreitet, sondern Öffnungen filmfrei bleiben können.

Für zukünftige Untersuchungen könnten weitere Aspekte der Filterauslegung, u.a. Filtergeometrie und Drainagemedien untersucht werden. Der Zusammenhang der oben genannten Eigenschaften mit dem Wiedereintrag von Öl an der Reingasseite wurde hier nur am Rande betrachtet und bedarf weiterer Aufklärung. Weitere offene Fragen betreffen die Art und Zusammensetzung des Aerosols, beispielsweise das Vorhandensein einer weiteren festen oder flüssigen Phase.

8 Summary

In this work, the impact of media properties and the use of different media in oil mist filtration was investigated. Based on mechanisms occurring in the media during coalescence filtration, the relevance of media structure, wettability and media configuration was assessed.

An experimental approach was chosen to investigate these aspects. First, suitable methods for the characterization of filtration relevant properties were identified and evaluated. For the acquisition of structural parameters, imaging techniques were used among other methods. Particularly for the characterization of microscale structural parameters, the spatial resolution of these methods is crucial. Regarding the resolution, the scanning electron microscopy is suitable for imaging the smallest structures. However, it is hardly possible to obtain information from the interior of the media. Micro computed tomography, on the other hand, provides 3D volume data of the medium, so that an assessment of the media structure in regions that are hardly accessible with a microscope is possible. With this method, fiber diameter distributions of various media have been determined. It was found that these corresponded quite well to the nominal fiber diameters used during media production. However, finest fibers have not been sufficiently measured due to the limited resolution of the method compared to SEM. Fiber orientation distributions relative to flow direction were determined. Most fibers of the wet laid media were oriented perpendicular to the direction of flow. Pore size distributions were also determined from the obtained volume data. The relatively small spatial dimensions of high-resolution images and the high computational and temporal effort for obtaining and analyzing the images, however, call into question the practicality of this method. Due to its feasibility and the relatively low technical complexity of the equipment, capillary flow porometry is to be preferred to micro computed tomography as a method for pore characterization. For the characterization of the structural homogeneity of the media, a method based on fractal geometry was implemented. The differential boxcounting method was used to determine the lacunarity as a characterizing value for the homogeneity of filter media based on the analysis of backlit images of the media.

The determination of the influence of microscale structural properties was complicated by the fact, that the two properties of interest - the pore size distribution and the fiber size distribution/fine fiber content - cannot easily be varied independently of each other during the production of the media. Increasing the fine fiber content of media lead to a decrease of mean pore diameter, while the differential pressure and the separation efficiency increased. A correlation between the fine fiber content/porosity diameter and the increase

in differential pressure caused by film formation has been observed. This can however not easily be applied to other media with different fiber composition and/or pore size distribution.

The structural homogeneity of oleophilic filter media, in particular the homogeneity of the foremost upstream filter layer has been identified as a significant factor impacting the operating behavior of the filters, since the processes in this layer play a decisive role in the formation of liquid channels in the filter. Separated oil collects due to capillarity in structurally denser or finer regions of the first layer and channels are formed behind these regions with increasing oil load. In the case of very homogeneous media, the absence of such defined areas leads to uniform deposition and accumulation of oil in the first filter layer before channels are formed. In the differential pressure curve, this can be seen in a depth filter- like increase of differential pressure at the beginning of operation, which eventually transitions into a linear increase of differential pressure due to channel formation. At very slow filtration velocities an impact of media homogeneity beyond the first layer has been observed. The oil distribution within very homogeneous media changes from defined channels to a conically tapering form to the filter rear, while for inhomogeneous media a uniform distribution of channels within the filter is largely maintained.

The thickness of the filter sandwich (i.e., the number of layers used) affects not only the initial pressure drop but also the increase in differential pressure during channel formation. Moreover, penetration increases linearly during channel formation, so adding more layers also results in a greater increase in penetration compared to the initial penetration during channel formation. The film, on the other hand, results in a decrease in penetration because it acts as an inertial separator. So it is possible that the total filtration efficiency of the filters can increase in the quasi-steady state compared to the unloaded state. When using a high number of layers or highly efficient media, the reentrainment of droplets on the clean gas side is the dominant mechanism for oil concentration in the clean gas.

When using different media in a filter, certain configurations show significant advantages in terms of their operating behavior. Two main reasons for improved operating performance were identified: on the one hand, the adoption of channel structures from a preceding medium, so that the resulting saturation in the medium is significantly lower than it would be through "free" channel formation. On the other hand, a significantly lower differential pressure can be achieved by avoiding film formation on the face of fine-pored media. In

configurations with a coarse oleophilic medium on the upstream side and a fine oleophobic medium on the downstream side, an incomplete film occurs at the media interface, so that the differential pressure increase is also significantly lower for this case.

Besides the media, the support grid used in filters also has a significant impact on the liquid distribution in the filter. For oleophilic media, significant differences in the differential pressure increase through film formation when using different downstream support grids can be seen. The reason for this behavior is that the film may not spread over the entire open area on the downstream side and some openings may remain film-free.

Further aspects of coalescence filter design, such as filter geometry or the use of drainage media still need further evaluation. Correlations of above mentioned properties and entrainment of oil on the filter clean gas side were only marginally considered in this work and further investigations on this aspect are needed. Further open questions concern the composition of the aerosol, e.g., the presence of another solid or liquid phase.

Literatur

- [1] I. Agranovski und R. Braddock. "Filtration of liquid aerosols on non-wettable fibrous filters". In: *AIChE Journal* 44.12 (1998), cited By 32, S. 2784–2790.
- [2] I. Agranovski u. a. "Combined wettable/non-wettable filter for mist purification". In: *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology* 24.3 (2001), S. 287–292.
- [3] I. E. Agranovski u. a. "Study of wet porous filtration". In: *Separation and purification technology* 30.2 (2003), S. 129–137.
- [4] J. F. Bauer. "Properties of Glass Fiber for Filtration: Influence of Forming Process". In: *International Nonwovens Journal* os-13.4 (2004), 1558925004os-1300401.
- [5] C. Billiet und R. Fielding. "A Quantitative Method to Determine Oil Carryover from High Efficiency Coalescing Filters in Compressed Gases Under Varying Dynamic Conditions and the Interpretation of Results to Assist Filter System Design". In: *International Compressor Engineering Conference*. 1984, S. 480.
- [6] B. Briscoe u. a. "Droplet coalescence on fibres". In: *Colloids and surfaces* 56 (1991), S. 301–312.
- [7] F. Brochard. "Spreading of liquid drops on thin cylinders: The "manchon/droplet" transition". In: *The Journal of chemical physics* 84.8 (1986), S. 4664–4672.
- [8] R. Brown. *Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters*. Elsevier Science, 1993.
- [9] B. Carroll. "The accurate measurement of contact angle, phase contact areas, drop volume, and Laplace excess pressure in drop-on-fiber systems". In: *Journal of Colloid and Interface Science* 57.3 (1976), S. 488–495.

- [10] B. Carroll. "Equilibrium conformations of liquid drops on thin cylinders under forces of capillarity. A theory for the roll-up process". In: *Langmuir* 2.2 (1986), S. 248–250.
- [11] A. Cassie und S. Baxter. "Wettability of porous surfaces". In: *Transactions of the Faraday society* 40 (1944), S. 546–551.
- [12] A. Charvet u. a. "Experimental and modelled efficiencies during the filtration of a liquid aerosol with a fibrous medium". In: *Chemical Engineering Science* 65.5 (2010), S. 1875–1886.
- [13] A. Charvet u. a. "Filtration of liquid aerosols with a horizontal fibrous filter". In: *chemical engineering research and design* 86.6 (2008), S. 569–576.
- [14] F. Chen, Z. Ji und Q. Qi. "Effect of surface wettability on filtration performance of gas-liquid coalescing filters". In: *Powder Technology* 357 (2019). Expanding Boundaries in Particle Technology: A select collision of papers from the World Congress in Particle Technology VIII, S. 377–386.
- [15] F. Chen, Z. Ji und Q. Qi. "Effect of liquid surface tension on the filtration performance of coalescing filters". In: *Separation and Purification Technology* 209 (2019), S. 881–891.
- [16] F. Chen, Z. Ji und Q. Qi. "Effect of pore size and layers on filtration performance of coalescing filters with different wettabilities". In: *Separation and Purification Technology* 201 (2018), S. 71–78.
- [17] J. Conder und T. Liew. "Fine mist filtration by wet filters—II: Efficiency of fibrous filters". In: *Journal of aerosol science* 20.1 (1989), S. 45–57.
- [18] P. Contal u. a. "Clogging of fibre filters by submicron droplets. Phenomena and influence of operating conditions". In: *Journal of Aerosol Science* 35.2 (2004), S. 263–278.
- [19] C. Davies. *Air Filtration*. Academic Press, 1973.
- [20] S. Dawar und G. Chase. "Correlations for transverse motion of liquid drops on fibers". In: *Separation and Purification Technology* 72.3 (2010), S. 282–287.
- [21] S. Dawar und G. Chase. "Drag correlation for axial motion of drops on fibers". In: *Separation and Purification Technology* 60.1 (2008), S. 6–13.
- [22] S. Dawar u. a. "Drag Correlation of Drop Motion on Fibers". In: *Drying Technology* 24.10 (2006), S. 1283–1288.

-
- [23] *DIN 24041: Lochplatten - Maße*. Norm. Dez. 2002.
- [24] *DIN 5269-2: Faserstoffe - Laborblattbildung für physikalische Prüfungen - Teil 2: Rapid-Köthen-Verfahren ; Deutsche Fassung EN ISO 5269-2:2004*. Norm. März 2005.
- [25] *DIN EN ISO 14419: Textilien – Oleophobie – Prüfung der Ölbeständigkeit mit Hilfe von Kohlenwasserstoffen; Deutsche Fassung EN ISO 14419:2010*. Norm. Aug. 2010.
- [26] J. Eggers, J. R. Lister und H. A. Stone. “Coalescence of liquid drops”. In: *Journal of Fluid Mechanics* 401 (Dez. 1999), S. 293–310.
- [27] F. Erbe. “Die Bestimmung der Porenverteilung nach ihrer Größe in Filtern und Ultrafiltern”. In: *Kolloid-Zeitschrift* 63 (1933), S. 277–285.
- [28] S. Fotovati, H. V. Tafreshi und B. Pourdeyhimi. “Influence of fiber orientation distribution on performance of aerosol filtration media”. In: *Chemical Engineering Science* 65.18 (2010), S. 5285–5293.
- [29] T. Frising u. a. “Clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: Experimental and phenomenological modelling study”. In: *Chemical Engineering Science* 60.10 (2005), S. 2751–2762.
- [30] H. Fuchs und W. Albrecht, Hrsg. *Vliesstoffe : Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung*. 2., vollst. überarb. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2012.
- [31] J. Gaydos und A. Neumann. “The dependence of contact angles on drop size and line tension”. In: *Journal of Colloid and Interface Science* 120.1 (1987), S. 76–86.
- [32] R. J. Good und M. Koo. “The effect of drop size on contact angle”. In: *Journal of Colloid and Interface Science* 71.2 (1979), S. 283–292.
- [33] R. Gougeon, D. Boulaud und A. Renoux. “Comparison of data from model fiber filters with diffusion, interception and inertial deposition models”. In: *Chemical Engineering Communications* 151.1 (1996), S. 19–39.
- [34] *ISO 8573-1: Druckluft - Teil 1: Verunreinigungen und Reinheitsklassen*. Norm. Apr. 2010.
- [35] O. S. Al-Kadi und D. Watson. “Texture Analysis of Aggressive and Nonaggressive Lung Tumor CE CT Images”. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 55.7 (2008), S. 1822–1830.

- [36] D. Kampa u. a. “Pressure drop and liquid transport through coalescence filter media used for oil mist filtration”. In: *International journal of multi-phase flow* 58 (2014), S. 313–324.
- [37] D. Kampa u. a. “Validation of a new phenomenological “jump-and-channel” model for the wet pressure drop of oil mist filters”. In: *Chemical Engineering Science* 122 (2015), S. 150–160.
- [38] D. Kampa. “Filtration von Ölnebel”. Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Inst. für Technologie, Diss., 2014IMD-Felder maschinell generiert (GBV). Diss. Göttingen, 2014.
- [39] N. Kazerouni u. a. “Mortality among workers exposed to cutting oil mist: Update of previous reports”. English. In: *American Journal of Industrial Medicine* 38.4 (2000). Cited By :35, S. 410–416.
- [40] H. Kolb, R. Schmitt u. a. “On the accuracy of capillary flow porometry for fibrous filter media”. In: *Separation and Purification Technology* 199 (2018), S. 198–205.
- [41] H. Kolb und G. Kasper. “Mist filters: How steady is their “steady state”?” In: *Chemical Engineering Science* 204 (2019), S. 118–127.
- [42] H. Kolb, J. Meyer und G. Kasper. “Flow velocity dependence of the pressure drop of oil mist filters”. In: *Chemical Engineering Science* 166 (2017), S. 107–114.
- [43] H. Kolb, A. Watzek u. a. “A mesoscale model for the relationship between efficiency and internal liquid distribution of droplet mist filters”. In: *Journal of Aerosol Science* 123 (2018), S. 219–230.
- [44] W. Krause. “Ölabscheidung in der Kurbelgehäuseentlüftung”. Diss. Kaiserslautern, Germany: Universität Kaiserslautern, 1995.
- [45] P. S. d. Laplace. “Traité de mécanique celeste, vol. 4”. In: *Supplements au Livre X* (1805).
- [46] K. Lee und B. Liu. “Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters”. In: *Aerosol Science and Technology* 1.2 (1982), S. 147–161.
- [47] D. Leith u. a. “Performance of industrial equipment to collect coolant mist”. In: *American Industrial Hygiene Association Journal* 57.12 (1996), S. 1142–1148.
- [48] P. Letellier, A. Mayaffre und M. Turmine. “Drop size effect on contact angle explained by nonextensive thermodynamics. Young’s equation revisited”. In: *Journal of Colloid and Interface Science* 314.2 (2007), S. 604–614.

- [49] T. Liew und J. Conder. "Fine mist filtration by wet filters—I. Liquid saturation and flow resistance of fibrous filters". In: *Journal of Aerosol Science* 16.6 (1985), S. 497–509.
- [50] B. Y. Liu und K. L. Rubow. "Efficiency, pressure drop and figure of merit of high efficiency fibrous and membrane filter media". In: *Proceedings of the 5th World Filtration Congress*. 1990, S. 112.
- [51] J. Liu u. a. "Superoleophobic Filters: Improvement of Filtration Performance by Front Attachment of Oil-Guiding Fabric". In: *Advanced Materials Interfaces* 7.2 (2020), S. 1901808.
- [52] C. R. Mackerer. "Health Effects of Oil Mists: A Brief Review". In: *Toxicology and Industrial Health* 5.3 (1989). PMID: 2669232, S. 429–440.
- [53] B. Mandelbrot. *Fraktale Geometrie der Natur*. Birkhäuser Basel, 1991.
- [54] N. Mao und S. Russell. "Chapter 13 - Fibre to Fabric: Nonwoven Fabrics". In: *Textiles and Fashion*. Hrsg. von R. Sinclair. Woodhead Publishing Series in Textiles. Woodhead Publishing, 2015, S. 307–335.
- [55] K. May. "The collision nebulizer: Description, performance and application". In: *Journal of Aerosol Science* 4.3 (1973), S. 235–243.
- [56] N. E. McIntyre und J. A. Wiens. "A novel use of the lacunarity index to discern landscape function". In: *Landscape Ecology* 15.4 (2000), S. 313–321.
- [57] R. Mead-Hunter, A. J. King und B. J. Mullins. "Aerosol-mist coalescing filters—A review". In: *Separation and Purification Technology* 133 (2014), S. 484–506.
- [58] B. J. Mullins u. a. "Comparative performance of philic and phobic oil-mist filters". In: *AIChE Journal* 60.8 (2014), S. 2976–2984.
- [59] B. J. Mullins u. a. "Observation and modelling of clamshell droplets on vertical fibres subjected to gravitational and drag forces". In: *Journal of Colloid and Interface Science* 284.1 (2005), S. 245–254.
- [60] B. Münch und L. Holzer. "Contradicting Geometrical Concepts in Pore Size Analysis Attained with Electron Microscopy and Mercury Intrusion". In: *Journal of the American Ceramic Society* 91.12 (2008), S. 4059–4067.
- [61] U. Müssigmann. "Bewertung inhomogener fraktaler Strukturen und Skalenanalyse von Texturen". Diss. Universität Stuttgart, 1992.

- [62] S. Payet u. a. “Penetration and pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles”. In: *Journal of Aerosol Science* 23.7 (1992), S. 723–735.
- [63] G. M. Piacitelli u. a. “Metalworking fluid exposures in small machine shops: an overview”. In: *AIHAJ-American Industrial Hygiene Association* 62.3 (2001), S. 356–370.
- [64] J. A. F. Plateau. *Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires*. Bd. 2. Gauthier-Villars, 1873.
- [65] R. E. Plotnick, R. H. Gardner und R. V. O’Neill. “Lacunarity indices as measures of landscape texture”. In: *Landscape ecology* 8.3 (1993), S. 201–211.
- [66] J. Poiseuille. *Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de tres-petits diametres*. Imprimerie Royale, 1844.
- [67] L. F. Rayleigh. “On the stability, or instability, of certain fluid motions”. In: *Proceedings of the London Mathematical Society* 1.1 (1879), S. 57–72.
- [68] P. C. Raynor und D. Leith. “The influence of accumulated liquid on fibrous filter performance”. In: *Journal of Aerosol Science* 31.1 (2000), S. 19–34.
- [69] R. V. Rivera-Virtudazo u. a. “Lacunarity analysis of TEM images of heat-treated hybrid organosilica materials”. In: *Innovations in Chemical Biology*. Springer, 2009, S. 397–403.
- [70] N. Sarkar und B. B. Chaudhuri. “An efficient differential box-counting approach to compute fractal dimension of image”. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 24.1 (1994), S. 115–120.
- [71] H. L. Sauter, P. Trautmann und M. Abendschein. “Messung und Abscheidung von Ölnebel aerosolen aus der Kurbelgehäuseentlüftung von Verbrennungsmotoren”. In: *MTZ-Motortechnische Zeitschrift* 62.1 (2001), S. 80–83.
- [72] T. Smith, G. Lange und W. Marks. “Fractal methods and results in cellular morphology – dimensions, lacunarity and multifractals”. In: *Journal of Neuroscience Methods* 69.2 (1996), S. 123–136.
- [73] I. Stechkina und N. Fuchs. “Studies on fibrous aerosol filters—I. Calculation of diffusional deposition of aerosols in fibrous filters”. In: *Annals of occupational Hygiene* 9.2 (1966), S. 59–64.

-
- [74] N. A. Valous u. a. “Texture appearance characterization of pre-sliced pork ham images using fractal metrics: Fourier analysis dimension and lacunarity”. In: *Food Research International* 42.3 (2009), S. 353–362.
- [75] D. Walsh u. a. “The effect of solid and liquid aerosol particle loading on fibrous filter material performance”. In: *Journal of Aerosol Science* 27 (1996), S. 617–618.
- [76] X. Wei u. a. “Efficient removal of aerosol oil-mists using superoleophobic filters”. In: *Journal of Materials Chemistry A* 6.3 (2018), S. 871–877.
- [77] X. Wei u. a. “High-efficiency low-resistance oil-mist coalescence filtration using fibrous filters with thickness-direction asymmetric wettability”. In: *Advanced Functional Materials* 29.1 (2019), S. 1806302.
- [78] X. Wei u. a. “Substantial Improvement of Oil Aerosol Filtration Performance Using In-Plane Asymmetric Wettability”. In: *ACS Applied Materials & Interfaces* 12.25 (2020), S. 28852–28860.
- [79] R. N. Wenzel. “Resistance of solid surfaces to wetting by water”. In: *Industrial & Engineering Chemistry* 28.8 (1936), S. 988–994.
- [80] S. Wurster, J. Meyer und G. Kasper. “On the relationship of drop entrainment with bubble formation rates in oil mist filters”. In: *Separation and Purification Technology* 179 (2017), S. 542–549.
- [81] S. Wurster u. a. “Bubbling vs. blow-off—On the relevant mechanism (s) of drop entrainment from oil mist filter media”. In: *Separation and Purification Technology* 152 (2015), S. 70–79.
- [82] S. Wurster. “Entrainment von Öltropfen an der Rückwand eines Faserfilters”. Diss. Karlsruhe, 2017.
- [83] T. Young. “III. An essay on the cohesion of fluids”. In: *Philosophical transactions of the royal society of London* 95 (1805), S. 65–87.
- [84] C. Zou, Y. Shi und X. Qian. “Characterization of glass fiber felt and its performance as an air filtration media”. In: *Journal of Industrial Textiles* 0.0 (2020), S. 1528083720961410.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau eines Filterelements zur Druckluftentölung (Durchströmung von innen nach außen): Links: Ganzes Element, rechts: Schnitt durch Element. Mehrere Lagen Glasfasermedium zwischen zwei Lochblechen und Drainageschaum an Außenseite.	3
1.2	Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse beispielhaft für ein benetzbares (schwarz) und ein nicht-benetzbares (rot) Medium und schematische Darstellung der im Betrieb ablaufenden Prozesse. . .	8
2.1	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.	17
2.2	Prinzip der pneumatischen Flüssigkeitszerstäubung mit einem Collision-Zerstäuber. Rechts: Eingesetzter Zerstäuber.	18
2.3	Gemessene Partikelgrößenverteilung im Rohgas und angepasste Lognormalverteilung.	19
2.4	Filterkammer geschlossen sowie offen mit eingesetzter Filterhalterung.	20
2.5	Filterhalterung mit Medium und Stützgitter. Links: Anströmseite, rechts: Abströmseite.	21
3.1	REM Aufnahmen eines Glasfaserfiltermediums (Phil(mf2)) als Aufsicht (links) und im Querschnitt (rechts).	27
3.2	Aus μ CT-Schnittbildern erstellte 3D Rekonstruktion eines Glasfaserfiltermediums (Phil(mf2)).	28
3.3	Bestimmung von Faserdurchmesser und -orientierung aus μ CT-Schnittbildern.	29
3.4	Mit μ CT bestimmte Faserdurchmesser- (links) und Faserorientierungsverteilungen (rechts) von fünf untersuchten Medien.	29
3.5	3D Rekonstruktion eines Ausschnitts eines Filtermedium aus μ CT Daten (links), errechnete Porendurchmesser- und Faserorientierungsverteilung innerhalb des Mediums (rechts).	31

3.6	Kumulative Porendurchmesserverteilung der fünf untersuchten Medien, gewonnen aus μ CT Daten (links) und Kapillarflussporometrie (rechts).	33
3.7	3D Oberflächendiagramm eines Filtermediums mit Grauwerten (links) und schematische Darstellung der differentiellen Boxcounting-Methode anhand eines Gitterelements mit der Seitenlänge $s=4$ (rechts).	38
3.8	Lakunarität Λ und fraktale Dimension D_{BC} von Mustern zunehmender Inhomogenität. Die Anzahl an schwarzen und weißen Pixeln ist für sämtliche Muster gleich.	39
3.9	Durchlichtbilder der Medien Phil(mf2), Phil(f), Phil(inho), Phil(SM1) und Phil(SM2) (je eine Lage).	41
3.10	Lakunarität über Gitterelementseitenlänge für Durchlichtbilder für fünf verschiedene Medien.	42
3.11	Durchlichtbilder der Medien Phil(mf2), Phil(f), Phil(inho), Phil(SM1) und Phil(SM2) (je eine Lage) mit berechneter Boxcounting-Dimension und Lakunarität. Die Anzahl der Boxen über dem Logarithmus der Gitterelementseitenlänge ist unten rechts gegeben.	43
4.1	Kumulative Porengrößenverteilungen der vier verwendeten Medien mit unterschiedlichem Feinstfaseranteil.	47
4.2	Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse (links) sowie Fraktionsabscheidegrade (rechts) für Filterpakete bestehend aus jeweils sechs Lagen vier verschiedener Medien mit unterschiedlichem Feinstfaseranteil.	48
4.3	Drucksprung durch Filmbildung und Differenzdruckzunahme pro Millimeter Mediendicke durch Kanalbildung für die kommerziell eingesetzten benetzbaren Medien, welche in dieser Arbeit verwendet wurden.	49
4.4	Differenzdruck über kumulativer Ölmasse (links) sowie Fraktionsabscheidegrade (rechts) für jeweils sechs Lagen eines benetzbaren (Phil(mf2)) und eines nicht-benetzbaren Mediums (Phob(mf2)) gleicher Struktur.	51
4.5	Einzellagensättigungen und Durchlichtbilder jeweils einer Kannalage für ein benetzbares (Phil(mf2)) und ein nicht-benetzbares Medium (Phob(mf2)) gleicher Struktur.	52

4.6	Differenzdruck über kumulativer Ölmasse (links) sowie Fraktionsabscheidegrade (rechts) für sechs Lagen eines Mediums mit oleophobisiertem Grobfaseranteil (GrobPhobM) und eines Mediums mit oleophobisiertem Feinfaseranteil (FeinPhobM) bei ansonsten gleicher Faserzusammensetzung.	53
4.7	Einzellagensättigungen und Durchlichtbilder jeweils einer Kanallage (links) sowie Porendurchmesserverteilung (rechts) für ein Medium mit oleophobisiertem Grobfaseranteil (GrobPhobM) und ein Medium mit oleophobisiertem Feinfaseranteil (FeinPhobM) bei ansonsten gleicher Faserzusammensetzung. . . .	54
4.8	Differenzdruckverlauf abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse für sechs Lagen der drei unterschiedlich homogenen, extern bezogenen Medien. . . .	55
4.9	Abbruch der Beladung eines Filterpakets mit Öl: Differenzdruckkurve bis Abbruch und Durchlichtbilder der ersten drei Lagen.	56
4.10	Differenzdruckverlauf abzüglich des Anfangsdruckverlustes über kumulativer Ölmasse für sechs Lagen von Phil(mf2) und Kombinationen von jeweils einer Lage der zwei selbsthergestellten inhomogenen Medien mit fünf Lagen von Phil(mf2). . .	57
4.11	Links: Durchlichtbilder der beiden Medien Phil(SM1) und Phil(SM2) im trockenen Zustand; Mitte: zweite Lage des Lagenpakets (Phil(mf2)) nach den Versuchen; Rechts: Überlagerung beider Bilder. Der Schwellenwert bei der Binarisierung wurde so gewählt, dass dunkle Regionen der trockenen Lagen (schwarz) und helle Regionen der mit Öl beladenen Lagen (Ölgefüllte Bereiche/Kanäle) segmentiert wurden.	58
4.12	Fraktionsabscheidegrade im trockenen (durchgezogen) und im quasistationären (gestrichelt) Zustand für sechs Lagen von Phil(mf2) und Kombinationen von jeweils einer Lage der zwei selbsthergestellten inhomogenen Medien mit fünf Lagen von Phil(mf2).	59
4.13	Durchlichtbilder der beiden Medien Phil(SM1) und Phil(SM2) im trockenen Zustand und nach den Versuchen.	60
4.14	Differenzdruckverlauf abzüglich des Anfangsdruckverlustes über kumulativer Ölmasse für sechs Lagen von Phil(mf2), Phil(f) und Phil(inho) bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,03 m/s.	61

4.15	Oben: Einzellagensättigung der Medienpakete für Phil(mf2) (links) und Phil(inho) (rechts) mit schematischen Darstellungen der Flüssigkeitsverteilung. Unten: Durchlichtbilder der Einzellagen nach allen Versuchen mit einer Filteranströmgeschwindigkeit von 0,03 m/s.	62
4.16	Schematischer Aufbau einer einzelnen Lage bestehend aus zwei Strukturphasen.	64
4.17	Differenzdruckverläufe (links) über kumulativer Ölmasse sowie Fraktionsabscheidegrade (rechts) für drei Medien mit innerer Strukturphasengrenze jeweils in front-to-front und back-to-back Konfiguration.	65
5.1	Differenzdruckverlauf über kumulativer Ölmasse für Einlagenaufbauten verschiedener Medien.	68
5.2	Fraktionsabscheidegrade im trockenen und quasistationären Zustand für Einlagenaufbauten verschiedener Medien. Links: oleophile Medien; rechts: oleophobe Medien. Die Verschiebung der MPPS ist durch Pfeile gekennzeichnet.	69
5.3	Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration und Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse für oleophile Filterpakete mit unterschiedlicher Lagenzahl.	73
5.4	Einzellagensättigung der verschiedenen Filterpakete. Für das oleophile Medium wurde die Filmlage als Lage 10 definiert, für das oleophobe Lage 1.	74
5.5	Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration und Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse für oleophobe Filterpakete mit unterschiedlicher Lagenzahl.	75
5.6	Differenzdruck über kumulativer Ölmasse für oleophile (schwarz) und oleophobe (rot) Filterpakete mit jeweils einem groben und feinen Filtermedium. Zusätzlich ist unten rechts das Langzeitverhalten der oleophoben Kombinationen dargestellt.	77
5.7	Einzellagensättigung für oleophile (schwarz, links) und oleophobe (rot, rechts) Filterpakete mit jeweils einem groben und feinen Filtermedium.	78
5.8	Fraktionsabscheidegrade für oleophile (links) und oleophobe (rechts) Filterpakete mit jeweils einem groben und feinen Filtermedium.	79

5.9	Differenzdruck über kumulativer Ölmasse für Kombinationen von Phil(f) mit Phob(g) (schwarz) und Phob(f) mit Phil(g) (rot). Die Pfeile zeigen jeweils den wahrscheinlichen Übergang von Öl von dem anströmseitigen in das abströmseitige Medium.	81
5.10	Einzellagensättigung für Kombinationen von Phil(f) mit Phob(g) (schwarz) und Phob(f) mit Phil(g) (rot).	82
5.11	Differenzdruck über kumulativer Ölmasse für Kombinationen von Phil(f) mit Phob(g) (schwarz) und Phil(g) mit Phob(f) (rot) sowie zugehörige Tropfenanzahlkonzentrationen im Reingas.	83
5.12	Einzellagensättigung für Kombinationen von Phob(g) mit Phil(f) und Durchlichtbilder der jeweiligen Lagen an der Grenzfläche. Rechts sind die Umrisse der Kanäle nochmals visualisiert. Die Kanalumrisse in Phil(f) sind dabei in schwarz dargestellt, diejenigen in Phob(g) in rot.	84
5.13	Fraktionsabscheidegrade für Kombinationen von Phil(f) mit Phob(g) (links) und Phil(g) mit Phob(f) (rechts).	85
5.14	Schematische Darstellung der Flüssigkeitsverteilung innerhalb von Sechslagenpaketen bestehend aus jeweils zwei verschiedenen Medien.	86
5.15	Übersicht verwendeter Stützgitter	89
5.16	Differenzdruckverläufe von sechslagigen oleophilen Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächen (links) sowie zugehörige Differenzdrücke zu Beginn der Beladung in Abhängigkeit des durchströmten Flächenanteils (rechts).	90
5.17	Einzellagensättigung von sechslagigen oleophilen Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächen.	91
5.18	Differenzdruckverläufe von sechslagigen oleophilen Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern gleicher freier durchströmter Flächen und unterschiedlichen Öffnungsweiten und -form (links) sowie zugehörige Differenzdrücke zu Beginn der Beladung in Abhängigkeit des durchströmten Flächenanteils (rechts).	92

5.19	Durchlichtbilder der jeweils letzten (abströmseitigen) Lage von sechslagigen oleophilen Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern gleicher freier durchströmter Flächen und unterschiedlichen Öffnungsweiten und -form. Die Ölverteilung in den Lagen wurde durch Binarisierung der Bilder mit geeigneter Schwellwertanpassung visualisiert (untere Reihe)	93
5.20	Fraktionsabscheidegrade von sechslagigen oleophilen Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächen	94
5.21	Größenverteilungen von an der Rückseite sechslagiger oleophiler Filterpakete in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächen wiedereingetragenen Tropfen. R33(5,8) ist aufgrund der hohen Konzentrationen gesondert dargestellt.	95
5.22	Differenzdruckverläufe von sechslagigen oleophoben Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern unterschiedlicher freier durchströmter Flächen (links) sowie zugehörige Differenzdrücke zu Beginn der Beladung in Abhängigkeit des durchströmten Flächenanteils (rechts).	97
5.23	Differenzdruckverläufe von sechslagigen oleophoben Filterpaketen in Kombination mit Stützgittern gleicher freier durchströmter Flächen und unterschiedlichen Öffnungsweiten und -form (links) sowie zugehörige Differenzdrücke zu Beginn der Beladung in Abhängigkeit des Perforationsabstands (rechts).	98
5.24	Fraktionsabscheidegrade von sechslagigen oleophoben Filterpaketen in Kombination mit unterschiedlichen Stützgittern.	98
5.25	Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration und Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse für oleophile (links) und oleophobe (rechts) Filterpakete bei Beladung mit unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeiten.	100
5.26	Globale Sättigungen im quasistationären Zustand für oleophile und oleophobe Filterpakete bei Beladung mit unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeiten (links) und Beladungsraten (rechts).	101
5.27	Fraktionsabscheidegrade im trockenen und quasistationären Zustand für oleophile und oleophobe Filterpakete bei Beladung mit unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeiten.	102

5.28	Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration und Differenzdruck abzüglich des anfänglichen Differenzdrucks über kumulativer Ölmasse für oleophile (links) und oleophobe (rechts) Filterpakete bei Beladung mit unterschiedlichen Ölbeladungsraten.	103
5.29	Penetration im Verhältnis zur Anfangspenetration über kumulativer Ölmasse für oleophile und oleophobe Filterpakete bei Beladung mit unterschiedlichen Ölbeladungsraten.	104
6.1	Penetration und Differenzdruck im quasistationären Zustand sechslagiger Filtermedienaufbauten mit verschiedenen Benetzbarkeits- und Struktureigenschaften in Bezug auf Penetration und Differenzdruck von sechs Lagen des Mediums Phil(mf2).	106
6.2	Übersicht der Penetration und des Differenzdruckes im quasistationären Zustand von Filtermedienaufbauten bestehend aus Kombinationen unterschiedlicher Medien und Aufbauten mit einer Strukturphasengrenze innerhalb jeweils einer Lage in Bezug auf Penetration und Differenzdruck von sechs Lagen des Mediums Phil(mf2).	107
6.3	Übersicht der Penetration und des Differenzdruckes im quasistationären Zustand sechslagiger Filtermedienaufbauten mit unterschiedlichen Stützstrukturen in Bezug auf Penetration und Differenzdruck von sechs Lagen des Mediums Phil(mf2) (mit dem Gitter R33(1,8)).	108

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (MVM) am Karlsruher Institut für Technologie in den Jahren 2016 bis 2021. In dieser Zeit genoss ich die Unterstützung zahlreicher Leute, von denen hier nur einige genannt werden können.

Mein Dank gilt in erster Linie meinem Betreuer, Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittler, für das entgegengebrachte Vertrauen, den mir gewährten wissenschaftlichen Freiraum und die fachliche Unterstützung dieser Arbeit in allen Phasen.

Herrn Prof. Dr. Hans-Joachim Schmid möchte ich herzlich für die Übernahme der Zweibegutachtung dieser Arbeit und des Korreferats danken.

Herrn Dr.-Ing. Jörg Meyer, welcher stets meine erste Anlaufstelle bei Problemen war, möchte ich ganz besonders danken für seine Unterstützung bei schwierigen wissenschaftlichen Fragestellungen und seine hilfreichen Ratschläge.

Diese Arbeit wäre kaum möglich gewesen ohne die Unterstützung meiner Studenten bei Arbeiten im Labor und bei der Auswertung. Vielen Dank Enes Akdas, Annika Jung, Tobias Klaß und Nithurshaan Pathmanathan!

Meine Dankbarkeit gilt den Technikern sowie der mechanischen und elektrischen Werkstatt des MVM für die technische Unterstützung. Auch das Optik- und Fotolabor sowie die Partikelmesstechnik des MVM seien hier erwähnt. Ich danke zudem dem Sekretariat und der Verwaltung für die Unterstützung bei allen bürokratischen Angelegenheiten.

Ohne die Kooperation und Unterstützung der BinNova Microfiltration GmbH wäre ein großer Teil dieser Arbeit in der Form nicht möglich gewesen. Hervorzuheben seien hier insbesondere Wolfgang Heikamp, Steffen Reich und Jürgen Binzer. Vielen Dank für die Zusammenarbeit und die regelmäßigen Diskussionen!

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Bürokollegen Shukhrat Sobich und Peter Bächler sowie bei Almuth Schwarz für ihre Unterstützung in- und außerhalb des Instituts. Dasselbe gilt auch für zahlreiche andere Kollegen am MVM.

Herrn Prof. Dr. Kasper möchte ich danken dafür, dass er mich an das Institut und das Thema auf den richtigen Weg gebracht hat.

Mein Dank gilt nicht zuletzt meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden, die mich während meiner gesamten Ausbildung und auf dem Weg zur Promotion unterstützten, mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite standen und mir somit die notwendige Ruhe und Sicherheit für die Erstellung dieser Arbeit gaben.