

Einfluss abgeschiedener Ölstrukturen auf das Abscheideverhalten von dünnen oleophilen Wirrfaserschichten

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (DR.-ING.)

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

genehmigte

DISSERTATION

von

Christian Straube
aus Schwäbisch Gmünd

Tag der mündlichen Prüfung:

25.07.2024

Erstgutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittler

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2019 bis 2023 am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (MVM) des Karlsruher Instituts für Technologie. Ohne die Unterstützung zahlreicher Personen wäre ein erfolgreicher Abschluss der Dissertation nicht möglich gewesen. Ich möchte mich daher bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer, Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittler für das über die Jahre entgegengebrachte Vertrauen, die großen Freiräume in der wissenschaftlichen Durchführung dieser Arbeit und die vielen hilfreichen fachlichen Diskussionen bedanken. Darüber hinaus gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid für die Übernahme des Korreferats.

Ich danke herzlichst Herrn Dr.-Ing. Jörg Meyer, welcher meine erste Anlaufstelle bei Problemen aller Art war, seine Geduld bei der Vermittlung von, für mich, komplizierten Sachverhalten und die wertvolle Zeit für fachliche Diskussionen mit ihm.

Ohne die Unterstützung von Studierenden wäre die Arbeit in dieser Form nicht durchführbar gewesen. Mein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang meinem langjährigen studentischen Begleiter und schließlich Bürokollegen, Robin Mandic, für seine Unterstützung während der Bachelorarbeit, der Masterarbeit und seine Tätigkeiten als Hiwi. Außerdem möchte ich mich bei Guohui Yang, Yasmin Kafara-Kassi und Julia Michaelis bedanken.

Zudem trugen zahlreiche Kolleginnen und Kollegen am Institut zum Gelingen dieser Arbeit bei. Danke an Uwe Albrecht und Marco Hummel für die Konstruktion und Zeichnung von diversen Bauteilen, der mechanischen Werkstatt unter Olaf Jörg für deren Fertigung und der elektrischen Werkstatt unter Bernhard Schweigler und Stefan Kollbach für die Implementierung von elektrischen Bauteilen in die Laboranlage sowie Alexandr Lungul für stets schnelle und zuverlässige Anpassungen der Anlagensteuerung. Der IT mit Andreas Baum, Luna und Michael Neaga für die Unterstützung und Geduld bei banalen Fragen und häufig auftretenden Komplikationen bei der Verwendung von Computern. Vielen Dank an die PMT mit meinem Tischkickerkollegen Klaus Hirsch sowie Astrid Huber und Regina Mall für Messungen von Stoffeigenschaften wie

Dichten oder Viskositäten unterschiedlichster Flüssigkeiten. Der Verwaltung durch ihre schnelle und unkomplizierte Hilfsbereitschaft bei auftretenden Problemen. Ich danke unserer Sekretärin, Beate Wernick, für die vielen schönen und humorvollen Gespräche. An dieser Stelle möchte ich mich auch bei meinen Kollegen innerhalb und außerhalb der GPS-Gruppe für die vielen schönen Stunden beim Kaffee, Sport, bei Freizeitaktivitäten und Spaß auf Konferenzen bedanken. Diesbezüglich gilt mein Dank meinem langjährigen Bürokollegen Johannes Deichmann.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie herzlich für die Unterstützung während meinen vergangenen elf Jahren in Karlsruhe bedanken. Ohne euch wären das Studium und die Promotion nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Abkürzungen und Symbole	v
1 Motivation und Stand der Forschung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.2.1 Mechanismen bei der Abscheidung von Partikeln und Tropfen aus Gasen	3
1.2.2 Filtration von Ölnebel	8
2 Experimentelle Vorgehensweise	15
2.1 Verwendetes Filtermaterial und Arbeitsfluid zur Filtration von Ölnebel	15
2.1.1 Auswahl und Herstellung des eingesetzten Filtermaterials	15
2.1.2 Eingesetztes Arbeitsfluid	23
2.2 Experimenteller Versuchsaufbau	24
2.2.1 Versuchsaufbau zur Beladung von einzelnen Faserschichten mit Ölnebel	24
2.2.2 Versuchsaufbau zur Bestimmung von Abscheidegraden	28
2.2.3 Bestimmung von Tropfengrößenverteilungen und -konzentrationen im Aerosol	30
2.2.4 Rohgasbetrachtung	31
2.2.5 Versuchsdurchführung für Abscheidegradmessungen an dünnen Wirrfaserschichten	37
2.3 Mikro-Computertomographie	40
2.3.1 Aufbau und Funktion	41
2.3.2 Probenvorbereitung	43
2.3.3 Durchführung von μ -CT Messungen	44
2.3.4 Segmentierung von rekonstruierten Aufnahmen	47
3 Charakterisierung von abgeschiedenen Ölstrukturen	51
3.1 Ölbeladung von dünnen Wirrfaserschichten	51
3.2 Lokale und globale Betrachtung der Porosität und Sättigung	55
3.3 Identifizierung von abgeschiedenen Ölstrukturen	64

3.4	Vergleich von Ölmengenanteilen bei unterschiedlicher Sättigung	67
3.5	Vergleich von Öltropfenkonzentrationen und -verteilungen	68
3.6	Ölverteilung in Durchströmungsrichtung	73
3.7	Gasgeschwindigkeitseinfluss auf abgeschiedene Ölstrukturen	75
4	Abscheidegradmessungen an dünnen Wirrfaserschichten	
	unterschiedlicher Sättigung	81
4.1	Vorkonditionierung der dünnen Wirrfaserschichten	82
4.2	Tropfenpenetration bei unterschiedlicher Anzahl an Faserschichten in Reihe	83
4.3	Stabilität von abgeschiedenen Ölstrukturen bei erhöhten Gasgeschwindigkeiten und hohen Sättigungen	87
4.4	Einfluss von variierenden Gasgeschwindigkeiten und Sättigungszuständen auf den Fraktionsabscheidegrad	89
4.5	Einfluss von variierenden Gasgeschwindigkeiten und Sättigungszuständen auf den Gesamtabscheidegrad	96
4.6	Vergleich der gewonnen Ergebnisse dieser Arbeit mit der einschlägigen Literatur	98
	4.6.1 Vergleich von Fraktionsabscheidegraden	99
	4.6.2 Vergleich von Gesamtabscheidegraden	102
4.7	Differenzdruckbetrachtung über den dünnen Wirrfaseranordnungen	104
5	Zusammenfassung und Ausblick	109
5.1	Zusammenfassung	109
5.2	Ausblick	113
6	Summary	115
A	Anhang	119
A.1	Aufbau und Funktion eines Laser-Scanning-Mikroskops	119
A.2	Fraktionsabscheidegradmessungen von zusätzlichen Sättigungszuständen	120
	Abbildungsverzeichnis	123
	Tabellenverzeichnis	127
	Literaturverzeichnis	129

Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

μ-CT	Mikro-Computertomograph
calc	berechnet
DES	Di-Ethyl-Sebacat
DEHS	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOP	Di-Octyl-Phthalat
EN	Europäische Norm
exp	experimentell
FOV	Field of View
ISO	International Organization for Standardization
KF	Kleinflansch-Schnellverbindung
KI	Künstliche Intelligenz
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KNN	Künstliches neuronales Netz
LSM	Laser-Scanning-Mikroskop
ma.	massenbezogen
MPPS	Most Penetrating Particle Size
MVM	Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik
n.a.	Keine Daten oder Informationen vorhanden
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
REM	Rasterelektronenmikroskop
ROI	Region of Interest
SMPS	Scanning-Mobility-Particle-Sizer
TBP	Tri-Butyl-Phosphat
wdh	Wiederholungsmessung

Lateinische Symbole und Variablen

a	Konstante a für die Berechnung der Gleitkorrektur
A	Anströmfläche
b	Konstante b für die Berechnung der Gleitkorrektur
c	Konstante c für die Berechnung der Gleitkorrektur
C	Gleitkorrektur
d	Dicke
D	Diffusionskoeffizient
E	Gesamtabscheidegrad
h	Höhe
k	Boltzmannkonstante
K	Korrekturfaktor
Kn	Knudsen-Zahl
l	Länge
m	Masse
Δm	Massendifferenz
n	Anzahl an Wirrfaserschichten in Reihe
N	Tropfenkonzentration
O	Oberfläche
Δp	Differenzdruck
P	Penetration
Pe	Péclet-Zahl
q	Dichte-Verteilung
Q	Summenverteilung
R	Sperreffektparameter
Re	Reynolds-Zahl
S	Sättigung
St	Stokes-Zahl
T	Fraktionsabscheidegrad
u	Gasgeschwindigkeit
V	Volumen
w	Flächengewicht
x	Durchmesser

Griechische Symbole und Variablen

η	Auftreffwahrscheinlichkeit
θ	Haftwahrscheinlichkeit
λ	Mittlere freie Weglänge eines Gasmoleküls
μ	dynamische Viskosität
ν	Voxel
π	Kreiszahl Pi
ρ	Dichte
v	absolute Temperatur
Φ	Porosität
φ	Einzelfaser-Abscheidegrad
χ	Massenanteil
Ψ	Sphärizität

Allgemeine Tiefindizes

0	anzahlbezogen
3	massenbezogen
BP	Bypass
D	Diffusion
F	Faser
FK	Filterkammer
Feret, mean	mittlerer Wert nach Feret
Feret, min	minimaler Wert nach Feret
frei	freie Faseroberfläche
i	Größenklasse
K	Körper
Kontakt	Kontaktfläche zwischen Öl und Faser
L	Luft
MGF	Mikroglasfaser
P	Partikel
PETF	PET-Faser
PO	Probenhalter-Objektiv

PR	Plateau-Rayleigh
Rein	Reingas
Roh	Rohgas
RP	Röntgenquelle-Probenhalter
S	Sperreffekt
t	Tropfen
T	Trägheit
WFS	Wirrfaserschicht

1 Motivation und Stand der Forschung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Gasgetragene submikrone Öltröpfchen, sogenannte Ölnebel, treten beispielsweise in industriellen Anwendungen, wie der Kurbelgehäuseentlüftung oder bei der Erzeugung von Druckluft durch Schraubenkompressoren, als unerwünschtes Nebenprodukt auf [1, 2]. Diese Ölnebel stellen ein Risiko für Mensch und Umwelt sowie die Lebensdauer von Bauteilen dar, weshalb die Tröpfchen aus der kontinuierlichen Phase abgetrennt werden müssen [3].

Eine gängige und effiziente Methode, diese Tropfen vom Gasstrom zu trennen, ist die Verwendung von Koaleszenzfiltern aus Glasfaserpapieren. Industriell werden hierfür Lagenpakete aus mehreren Einzellagen (Lagendicke 0,5 - 1,0 mm) eines faserigen Mediums eingesetzt. Vorgänge auf mesoskopischer und makroskopischer Ebene bei der Filtration von gasgetragenen Tröpfchen waren bereits Gegenstand zahlreicher Publikationen, wie beispielsweise Agranovski et al. [4], Charvet et al. [5], Frising et al. [6], Raynor & Leith [7] oder die Dissertationen von Penner [8], Kolb [9] und Kampa [10], welche am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik am KIT angefertigt wurden. So lässt sich die Entwicklung des Druckverlusts über Koaleszenzfiltern bei der Beladung mit Ölnebel phänomenologisch mit dem Kanal-Film-Modell von Kampa et al. [11] erklären. Vorgänge auf submikroner und mikroskopischer Ebene bleiben hierbei jedoch weitgehend unbeantwortet. Bekannt ist, dass abgeschiedene Flüssigkeitsstrukturen die Form des Kollektors ändern und Einfluss auf die Abscheidung nehmen können [12]. Es finden sich in der Literatur diesbezüglich widersprüchliche Aussagen hinsichtlich des Einflusses von abgeschiedenen Flüssigkeitsstrukturen auf das Abscheideverhalten von Koaleszenzfiltern. In den Arbeiten von z.B. Agranovski et al. [4] und Conder & Liew [13] wird eine Erhöhung des Abscheidegrads mit zunehmender Ansammlung von Flüssigkeit im Filterinneren beobachtet. Gougeon et al. [14] und Payet et al. [15] berichten in ihren Studien vom Gegenteil. Demnach verschlechtert sich die Abscheidung bei zunehmender Flüssigkeitssättigung im Filter.

Ziel dieser Arbeit ist, in einem ersten Schritt, die Untersuchung der gebildeten Ölmorphologie

in dünnen, oleophilen Wirrfaserschichten bei unterschiedlichen Ölsättigungen mit Hilfe eines Mikro-Computertomographen (μ -CT). Damit sollen unterschiedliche Ölstrukturen bis zu einer minimalen Größe von etwa $2\ \mu\text{m}$ aufgelöst, identifiziert und analysiert werden. Anschließend folgt die Bestimmung des Einflusses dieser abgeschiedenen Flüssigkeitsstrukturen auf die Abscheideeffizienz (Gesamt- und Fraktionsabscheidegrad) bei unterschiedlichen Sättigungszuständen und Filteranströmgeschwindigkeiten. Damit sollen die widersprüchlichen Aussagen zum Einfluss von abgeschiedener Flüssigkeit in Koaleszenzfiltern auf den Abscheidegrad mit Fokus auf oleophile Filtermedien in der Literatur aufgeklärt und diese Wissenslücke geschlossen werden.

Die experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit erfolgen an eigens hergestellten dünnen Wirrfaservliesen, welche in ihrer Zusammensetzung und Porosität ähnlich zu industriell eingesetzten Filtermedien sind. Da die ersten Faserlagen der ersten Filterlage für die Abscheidung von gasgetragenen Tröpfchen von hauptsächlicher Bedeutung sind [7, 11, 12, 16], soll die Dicke der Wirrfaserschichten im Vergleich zu industriell eingesetzten Filterlagen reduziert werden.

Auf die Anforderung und Herstellung des verwendeten Filtermaterials sowie das eingesetzte Arbeitsfluid wird in Abschnitt 2.1 eingegangen. Im Anschluss wird der experimentelle Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung zur Ölbeladung der selbst hergestellten Wirrfaserschichten und die Messung von Abscheidegraden (Fraktions- und Gesamtabscheidegrade) an diesen Strukturen vorgestellt (Abschnitt 2.2). Aufbau und Funktion des verwendeten Mikro-Computertomographen sowie die Probenvorbereitung, die Durchführung und die Segmentierung von μ -CT Aufnahmen sind Gegenstand in Abschnitt 2.3. In Kapitel 3 wird die Ölabscheidung auf den dünnen Wirrfaserschichten, die Bestimmung von lokalen und globalen Porositäten sowie Sättigungen, die Identifizierung sowie der Vergleich von unterschiedlichen abgeschiedenen Ölstrukturen, die Ölverteilung in Durchströmungsrichtung und ein möglicher Gasgeschwindigkeitseinfluss auf abgeschiedene Ölstrukturen thematisiert. Abscheidegradmessungen an den dünnen Wirrfaserschichten bei unterschiedlichen Sättigungen und variierenden Anströmgeschwindigkeiten, ein ausführlicher Vergleich der gewonnenen Erkenntnisse mit der einschlägigen Literatur sowie die Entwicklung des Differenzdrucks über den Wirrfaseranordnungen sind Gegenstand von Kapitel 4. In Kapitel 5 folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit sowie ein Ausblick auf weiterführende Studien.

1.2 Stand der Forschung

Die Abscheidung von gasgetragenen festen Partikeln oder feinen Tröpfchen aus der Gasphase wurde über einen langen Zeitraum hinweg in zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen

behandelt. In diesem Abschnitt erfolgt eine Zusammenfassung und Erläuterung von Studien, die als relevant für das Thema dieser Arbeit angesehen werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Abscheidung von gasgetragenen Tröpfchen.

1.2.1 Mechanismen bei der Abscheidung von Partikeln und Tropfen aus Gasen

Grundvoraussetzung für eine Abscheidung von gasgetragenen Partikeln ist eine Relativbewegung zwischen Partikeln und einem geeigneten Kollektor. Vereinfacht lässt sich die Abscheidung von Partikeln am Modell einer isolierten Einzelfaser erklären. Neben dem Auftreffen einer Partikel auf einen Kollektor (Auftreffwahrscheinlichkeit), muss diese für eine Abscheidung auch dort haften bleiben (Haftwahrscheinlichkeit). Aus dem Produkt der Auftreffwahrscheinlichkeit η und Haftwahrscheinlichkeit θ ergibt sich der Einzelfaser-Abscheidegrad φ nach Formel 1.1. [17]

$$\varphi = \eta \cdot \theta \quad (1.1)$$

Betrachtet man die Abscheidung von festen Partikeln aus der Gasphase, kann es beispielsweise bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten zum Abprallen von Partikeln am Kollektor kommen [18, 19]. Bei Tröpfchenaerosolen wird hingegen stets eine Haftwahrscheinlichkeit von 100 % angenommen [20]. In guter Näherung kann daher davon ausgegangen werden, dass der Einzelfaser-Abscheidegrad bei der Abscheidung von Tröpfchen identisch zum Auftreffgrad ist:

$$\varphi \approx \eta \quad (1.2)$$

Bei der Strömung durch eine Faserschicht können Partikeln infolge mehrerer Transportmechanismen in Kontakt mit einer Faser kommen. Dabei lassen sich grundsätzlich drei Hauptmechanismen bei der Abscheidung von Partikeln aus Gasen unterscheiden: die Diffusionsabscheidung, die Trägheitsabscheidung und die Abscheidung infolge des Sperreffekts. Eine Abscheidung durch elektrostatische Kräfte spielt bei der Betrachtung von Ölaerosolen eine untergeordnete Rolle, da Ölnebel für gewöhnlich nur eine geringe elektrische Ladung aufweisen und Additive in Schmierstoffen aufgeladene Filterfasern bei Benetzung mit Öl entladen [1, 8]. Aufgrund der typischerweise auftretenden Tropfengrößen und Gasgeschwindigkeiten bei der Ölnebel filtration, kann auch eine Abscheidung infolge von Sedimentation vernachlässigt werden [8].

In Abbildung 1.1 ist exemplarisch ein schematischer Verlauf der Auftreffwahrscheinlichkeiten

infolge der Diffusion η_D , des Sperreffekts η_S und der Trägheit η_T , sowie des kombinierten Auftreffgrads η_{D+S+T} im Größenbereich von ca. 10 - 1000 nm dargestellt.

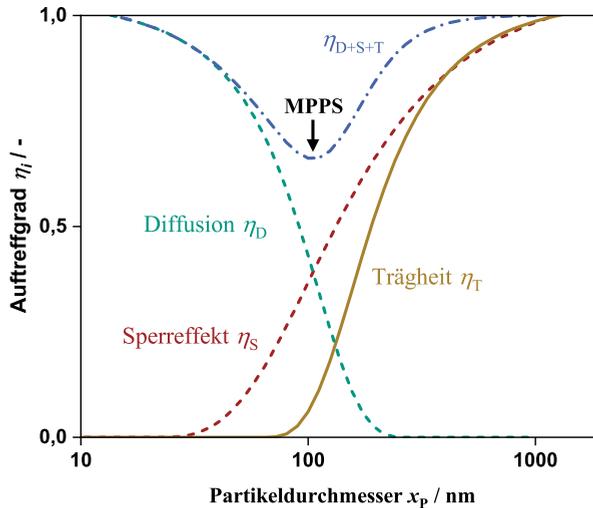


Abbildung 1.1: Schematischer Überblick über die relevanten Auftreffwahrscheinlichkeiten für Partikeln im Größenbereich 10 - 1000 nm. Das Minimum des kombinierten Auftreffgrads η_{D+S+T} kennzeichnet die *Most Penetrating Particle Size* (MPPS); nach [21, 22].

Auf die genauen Verläufe der Auftreffgrade in Abbildung 1.1 wird im Folgenden eingegangen.

Diffusionsabscheidung

Für sehr kleine Partikeln ($< 100 - 500$ nm) dominiert die Diffusionsabscheidung, welche maßgeblich vom Auftreffgrad infolge der Diffusion η_D abhängt (grüne Kurve in Abbildung 1.1) [17, 21]. Mit zunehmendem Partikeldurchmesser sinkt η_D . Partikeln erfahren dabei durch Stöße mit Molekülen eine unregelmäßige Zitterbewegung (Brown'sche Molekularbewegung), welche die Partikel auf den Kollektor treffen lässt. Die charakteristische dimensionslose Kennzahl zur Beschreibung der Diffusionsabscheidung ist die Péclet-Zahl Pe . η_D ist dabei proportional zu $Pe^{-\frac{2}{3}}$ [22].

Es gilt:

$$\eta_D \propto Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (1.3)$$

mit:

$$Pe = \frac{u \cdot x_F}{D} \quad (1.4)$$

Die Pe -Zahl ist abhängig von der Gasgeschwindigkeit u , dem Faserdurchmesser x_F sowie dem Partikel-Diffusionskoeffizient D (Formel 1.5):

$$D = \frac{k v}{3 \pi x_P \mu_L} C(x_P) \quad (1.5)$$

mit Partikeldurchmesser x_P , dynamischer Viskosität der Luft μ_L , der Gleitkorrektur $C(x_P)$, Boltzmannkonstante k und der absoluten Temperatur v .

Die Gleitkorrektur berücksichtigt den Schlupf von kleinen Partikeln und lässt sich durch Formel 1.6 ausdrücken.

$$C(x_P) = 1 + a \cdot Kn + b \cdot \exp\left\{\frac{-c}{Kn}\right\} \quad (1.6)$$

Die Konstanten a , b und c in Formel 1.6 finden sich für unterschiedliche Stoffsysteme in der Literatur [23, 24]. So sind diese Konstanten von Rader et al. [25] für Öltröpfchen in Luft bei einer Temperatur von 23°C zu $a = 1,207$, $b = 0,44$ und $c = 0,596$ bestimmt worden. Die Knudsen-Zahl Kn setzt die mittlere freie Weglänge eines Gasmoleküls λ in das Verhältnis zum Partikeldurchmesser (siehe Formel 1.7).

$$Kn = \frac{2\lambda}{x_P} \quad (1.7)$$

Folglich steigt η_D und damit die Diffusionsabscheidung in einem System sowohl mit zunehmender Verweilzeit (z.B. sinkende Gasgeschwindigkeit) als auch mit sinkendem Partikeldurchmesser.

Trägheitsabscheidung

Mit steigendem Partikeldurchmesser dominiert die Trägheitsabscheidung. Partikeln $> 1 \mu\text{m}$ werden nahezu komplett aufgrund ihrer Massenträgheit abgeschieden. Partikeln können dabei den Stromlinien der Luftströmung um einen Kollektor nicht mehr folgen und kommen durch ihre Massenträgheit mit dem Kollektor in Kontakt. Die Auftreffwahrscheinlichkeit infolge der Trägheit η_T (braune Kurve in Abbildung 1.1) ist eine Funktion der dimensionslosen Stokes-Zahl St (siehe Formel 1.9) und Reynolds-Zahl Re (siehe Formel 1.10).

$$\eta_T = f(St, Re) \quad (1.8)$$

mit

$$St = \frac{\rho_P x_P^2 u C(x_P)}{18 \mu_L x_F} \quad (1.9)$$

und

$$Re = \frac{u x_F \rho_L}{\mu_L} \quad (1.10)$$

Neben den bereits bekannten Größen ist ρ_P als die Partikeldichte und ρ_L als die Dichte der Luft definiert. Mit zunehmender Stokes- oder Reynolds-Zahl steigt η_T und damit die Trägheitsabscheidung an [5, 17, 26, 27]. Demnach erhöht sich eine Abscheidung aufgrund von Trägheit mit steigender Gasgeschwindigkeit und insbesondere mit zunehmendem Partikeldurchmesser.

Sperreffekt

Im Übergangsbereich zwischen Diffusions- und Trägheitsabscheidung ist hauptsächlich der Sperreffekt (Interzeption) von Relevanz. Der Auftreffgrad infolge des Sperreffekts η_S ist in Abbildung 1.1 in roter Farbe dargestellt. Durch den Sperreffekt werden Partikeln aufgrund ihrer geometrischen Form abgeschieden, da der Abstand zwischen der Stromlinie um den Kollektor und der Kollektoroberfläche geringer als der Radius der Partikel ist. Eine klare Differenzierung zwischen Trägheitsabscheidung und einer Abscheidung durch den Sperreffekt ist schwierig, da diese zwei Bereiche sehr eng beieinander liegen und sich überlagern [21, 22]. Bei steigendem Partikeldurchmesser ist die gesonderte Betrachtung des Sperreffekts von der Trägheitsabscheidung als kritisch zu betrachten, da große Partikeln (im Bereich der Trägheitsabscheidung) aufgrund ihrer Massenträgheit nicht mehr den Stromlinien um einen Kollektor folgen können.

Eine Abscheidung aufgrund der rein geometrischen Form einer Partikel ist in diesem Größenbereich somit nicht mehr gegeben. Daher finden sich in der Literatur auch kombinierte Modelle, welche die Abscheidung infolge von Trägheit und des Sperreffekts beschreiben [28, 29]. In Abbildung 1.1 ist die Abscheidung infolge des Sperreffekts und der Trägheit dennoch differenziert gekennzeichnet, um die Wirkung des Sperreffekts im Übergangsbereich zwischen Diffusions- und Trägheitsabscheidung besser illustrieren zu können. In der Literatur wird zur Beschreibung des Auftreffgrads durch den Sperreffekt η_S häufig eine Funktion des Sperreffektparameters R (Formel 1.12) verwendet. Dieser beschreibt das geometrische Verhältnis zwischen Partikel- und Faserdurchmesser. [17, 22]

$$\eta_S = f(R) \quad (1.11)$$

mit

$$R = \frac{x_P}{x_F} \quad (1.12)$$

Steigt der Sperreffektparameter an, so steigt auch der Auftreffgrad η_S und damit verbunden die Abscheidung aufgrund des Sperreffekts an. [30, 31, 32]

Kombinierter Auftreffgrad aus Diffusion, Sperreffekt und Trägheit

Unter Berücksichtigung von Diffusion, Trägheit und des Sperreffekts lässt sich der kombinierte Auftreffgrad η_{D+S+T} (blaue Kurve in Abbildung 1.1) wie folgt bestimmen [5]:

$$\eta_{D+S+T} = 1 - (1 - \eta_D)(1 - \eta_S)(1 - \eta_T) \quad (1.13)$$

Das Minimum im Verlauf des kombinierten Auftreffgrads η_{D+S+T} wird *Most Penetrating Particle Size* (MPPS) genannt und kennzeichnet die Partikelgröße, bei welcher am meisten Partikeln durch ein Filtermedium gelangen. Unterschiedliche Filtermaterialien und -konfigurationen können unterschiedliche MPPS-Werte aufweisen [21]. Bei der Ölnebelfiltration liegt die MPPS typischerweise bei einer Tropfengröße von ca. 100 nm.

Für η_D , η_S und η_T finden sich in der Literatur eine Vielzahl von Modellen zur Berechnung von Auftreff- bzw. Abscheidegraden (z.B. abhängig vom Partikelsystem, dem Fluid oder den Strömungsbedingungen) [26]. Im Kontext dieser Arbeit sind jedoch hauptsächlich qualitative

Einflüsse von z.B. steigenden oder sinkenden Partikeldurchmessern oder Anströmgeschwindigkeiten auf den Auftreffgrad und somit den quantitativ bestimmten Abscheidegrad von Relevanz, welche mit den vorgestellten Beziehungen für η_D , η_S und η_T gut zu diskutieren sind.

1.2.2 Filtration von Ölnebel

Zur Filtration von Ölnebel werden industriell Lagenpakete aus Wirrfaserpapieren (Lagendicke 0,5 - 1,0 mm) unterschiedlicher Benetzbarkeit verwendet. Es lässt sich zwischen benetzbaren (oleophilen) und nicht-benetzbaren (oleophoben) Medien unterscheiden. Industriell eingesetzte Filterlagen bestehen hauptsächlich aus Mikroglasfasern und teilweise geringen Anteilen an Kunststofffasern [1, 33, 34]. Ohne Oberflächenbehandlung sind sowohl Mikroglas- als auch Kunststofffasern mit Öl benetzbar.

Für unbeladene Filter lässt sich die Abscheidung flüssiger Partikeln, analog zur Abscheidung fester Partikeln, mittels Einzelfaser-Theorie beschreiben [21]. Dabei bilden sich entlang der Fasern keine porösen, dendritischen Strukturen [18, 35], sondern Ketten von Tropfen [36, 37, 38] und gesättigte Bereiche zwischen benachbarten Fasern aus [34]. Die ersten Faserlagen der ersten Filterlage sind für die Abscheidung von Tröpfchenaerosolen besonders relevant. Der Großteil der gasgetragenen Tropfen wird in diesem Bereich abgeschieden [7, 11, 12, 16]. Nach einer anfänglichen Ausbildung eines sehr dünnen Ölfilms auf den Fasern, welcher je nach Faserdurchmesser von einigen hundert Nanometern bis zu wenigen Mikrometern anwachsen kann [38, 39], bilden sich nach Plateau-Rayleigh [40] Tropfen aus. Mit zunehmender Beladung koaleszieren abgeschiedene Ölstrukturen zu größeren, vollständig mit Öl gesättigten Bereichen zwischen benachbarten Fasern. Diese Flüssigkeitsbrücken zwischen benachbarten Fasern werden Ölsegel genannt [34]. Bei weiterer Beladung bilden sich Ölkanäle (vollständig mit Öl gesättigte Bereiche) in Strömungsrichtung aus. Abgeschiedenes Öl wird durch die Luftströmung in diesen Kanälen zur Filterrückseite transportiert, wo es schließlich drainiert. Phänomenologisch lassen sich die Vorgänge bei der Abscheidung von Öltröpfchen durch das Kanal-Film-Modell von Kampa et al. [11] erklären. Dieses semi-empirische Modell ermöglicht beispielsweise die Beschreibung der Entwicklung des Differenzdrucks mit zunehmender Ölbeladung. Eine wesentliche Erkenntnis ist dabei, dass sich die Sättigung im Filter so einstellt, dass der notwendige Druckverlust für den Öltransport aufgebaut wird. In Abbildung 1.2 ist schematisch die zeitliche Entwicklung des Differenzdrucks für benetzbare (oleophile) und nicht-benetzbare (oleophobe) Filtermedien dargestellt.

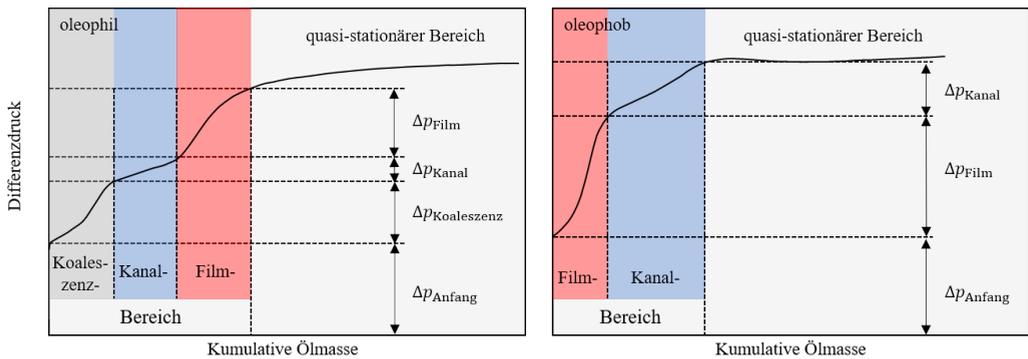


Abbildung 1.2: Schematische Entwicklung des Differenzdrucks für oleophile (links) und oleophobe (rechts) Filtermedien mit zunehmender Ölbeladung; nach Straube et al. [41].

Bei oleophilen Medien ist zu Beginn der Filtration (Anfangsdruckverlust Δp_{Anfang}) ein Anstieg im Differenzdruck zu beobachten, welcher auf eine Abscheidung von Flüssigkeit auf den ersten Faserlagen der ersten Filterlage, dem Koaleszenzbereich $\Delta p_{\text{Koaleszenz}}$, zurückzuführen ist (Abbildung 1.2 links). Während der Kanalbildungsphase Δp_{Kanal} steigt der Differenzdruck über dem Medium nahezu linear an. Erreicht das koaleszierte Öl die Filterrückseite ist ein quasi-stationärer Zustand des Filters erreicht. Die ankommende Ölmenge auf der Anströmseite ist hierbei identisch zur ablaufenden Ölmenge auf der Filterrückseite. Zusätzlich bildet sich ein Flüssigkeitsfilm auf der Abströmseite aus. Die Ausbildung dieses Ölfilms spiegelt sich in einem sprunghaften Anstieg des Differenzdrucks Δp_{Film} wieder.

Für oleophobe Filtermedien bildet sich dieser Flüssigkeitsfilm auf der Anströmseite, resultierend in einem sprunghaften Anstieg von Δp_{Film} zu Beginn der Ölbeladung, aus (Abbildung 1.2 rechts). Ähnlich zu oleophilen Medien, steigt der Differenzdruck auch bei oleophoben Medien während der nachfolgenden Kanalbildungsphase nahezu linear an. Sobald das Öl die Filterrückseite erreicht, ist der quasi-stationäre Zustand erreicht. Zusätzlich kann im quasi-stationären Zustand (für oleophile und oleophobe Medien) ein schleichender Anstieg des Differenzdrucks beobachtet werden, welcher auf das Ausbilden weiterer Ölkanäle sowie einer Umverteilung des abgeschiedenen Öls im Filtermedium zurückzuführen ist [42].

Das Kanal-Film-Modell [11] ist sinngemäß auch für Kombinationen aus benetzbaren und nicht-benetzbaren Medien anwendbar [11, 43, 44]. Die Gültigkeit des Modells wurde anhand verschiedener Filtermedien (benetzbar und nicht-benzetzbar, sowie Kombinationen), Ölviskositäten und -sättigungen sowie Anströmgeschwindigkeiten validiert [5, 33, 45, 46, 47, 48].

Neben der Penetration (Durchgang) von Öltröpfchen durch das Filtermedium, stellt der Wiedereintrag von abgeschiedenem Öl in das Reingas ein Problem bei der Filtration dar. Der Eintrag von Sekundäraerosolen (sogenanntes Entrainment) wurde bereits ausführlich von beispielsweise

Wurster et al. [49, 50, 51] untersucht. Durch den Einsatz von Nachabscheidevliesen kann Entrainment signifikant reduziert werden. Dennoch stellen Sekundäraerosole von hocheffizienten Filtern ein Problem dar. Der Großteil der Tröpfchen im Reingas ist dabei auf einen Wiedereintrag von bereits abgeschiedenem Öl zurückzuführen. Die Reduzierung von Entrainment bei der Filtration von Ölnebel ist weiterhin Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen und birgt großes Potential für die Entwicklung hocheffizienter Koaleszenzfilter [16]. Durch beispielsweise neuartige 3D gedruckte Geometrien von Stützstrukturen auf der Filterabströmseite, kann dieser Eintrag von Tröpfchen in das Reingas weiter gesenkt werden [41].

Wesentlich schwieriger als eine Beschreibung der Entwicklung des Differenzdrucks mit zunehmender Flüssigkeitsbeladung oder des Entrainments, ist ein Vergleich von Studien zur Beschreibung der Abscheideeffizienz mit zunehmender Beladung. So wird in der Literatur die Abscheideeffizienz einerseits als Gesamtabscheidegrad und andererseits als Fraktionsabscheidegrad ausgedrückt. Dabei werden Partikelsysteme in Bezug auf Masse oder Anzahl sowie unterschiedliche Größen von einigen zehn Nanometern bis hin zu einigen zehn Mikrometern verglichen. Weiterhin sind die untersuchten Filtermaterialien hinsichtlich deren Dicke, Faserdurchmesser, Benetzbarkeit oder Porosität teilweise stark unterschiedlich [5, 52, 53, 54, 55, 56].

In der Literatur finden sich darüber hinaus widersprüchliche Aussagen bezüglich des Einflusses von abgeschiedenen Flüssigkeitsstrukturen auf den Fraktions- bzw. Gesamtabscheidegrad von Koaleszenzfiltern. Tabelle 1.1 zeigt eine Übersicht ausgewählter experimenteller Arbeiten, welche unbeladene und beladene oleophile Koaleszenzfilter hinsichtlich einer Änderung (Anstieg gekennzeichnet durch \uparrow , Abnahme gekennzeichnet durch \downarrow) des Fraktionsabscheidegrads ($\eta_{D,S,T}$) bzw. Gesamtabscheidegrads (E_0) untersuchen. Neben der Änderung des Fraktions- bzw. Gesamtabscheidegrads mit zunehmender Flüssigkeitsbeladung (rechte Spalte), sind die aufgeführten Arbeiten nach dem verwendeten Fasermaterial, der globalen Porosität Φ_{global} (gravimetrisch bestimmt, siehe Abschnitt 2.1.1), dem Faserdurchmesser x_F , der Filterdicke d_{Filter} , der Filteranströmgeschwindigkeit u und dem eingesetzten Arbeitsmedium eingeteilt.

Arbeiten, welche den Fraktionsabscheidegrad mit zunehmender Flüssigkeitsbeladung untersuchen, sind in der letzten Spalte in Tabelle 1.1 gelb hinterlegt. In blauer Farbe sind Arbeiten hinterlegt, welche Ergebnisse zum Gesamtabscheidegrad mit zunehmender Flüssigkeitsbeladung präsentieren. Werden sowohl Fraktions- als auch Gesamtabscheidegrade in einer Arbeit vorgestellt, sind diese Einträge in Tabelle 1.1 grün hinterlegt.

Agranovski et al. [4] beobachten einen Anstieg des Fraktionsabscheidegrads im Bereich des Sperreffekts und des Trägheitsbereichs (0,21 - 2,7 μm) für einen mit Wasser beladenen Filter. Die Abscheideeffizienz steigt laut den Autoren hauptsächlich durch die Ausbildung von „Lufttunneln“ im Filterinneren an (bevorzugter Weg der Luft durch einen mit Flüssigkeit beladenen Filter). Filterfasern, welche diese Lufttunnel durchkreuzen, erhöhen nach dieser Hypothese eine

Tabelle 1.1: Auflistung ausgewählter Literatur zum Einfluss steigender Flüssigkeitsbelastung auf den Fraktionsabscheidegrad, Gesamtabscheidegrad bzw. den Fraktions- & Gesamtabscheidegrad von oleophilen Koaleszenzfiltern.

Autor	Faser- material	Φ_{global} [-]	x_F [μm]	d_{Filter} [μm]	u [cm s^{-1}]	Arbeits- medium	Beob. mit stei- gender Belastung
Agranovski et al. [4]	PP	0,89	12	6000	15	Wasser	$\eta_{S+T} \uparrow$
Charvet et al. [5]	Zellulose	0,72	n.a.	340	11 - 42	DEHS	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \uparrow$
Conder & Liew [13]	Edelstahl	0,89 - 0,98	4 - 22	1500 - 32500	10 - 100	Geraniol	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \uparrow$; $E_0 \uparrow$
Contal et al. [12]	n.a.	0,93	0,36 ^a	410	2,5 - 19	DOP	$E_0 \downarrow$ bis Filmbil- dung, dann $E_0 \uparrow$
		0,93	0,93 ^a	460			
		0,92	1,21 ^a	410			
		0,94	3,19 ^a	440			
Frising et al. [6]	Glas	0,92	4 - 22	409	5,8 - 25	DEHS	$E_0 \downarrow$ bis Filmbil- dung, dann $E_0 \uparrow$
Gougeon et al. [14]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	10	DES	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \downarrow$
Kolb et al. [57]	Glas	0,94	4 ^a	6400	25	Mineralöl	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \uparrow$
		0,93	2,9 ^a	5100			
		0,93	1,4 ^a	4200			
Payet et al. [15]	Glas	0,92	1 ^a	240	2 - 3,7	DOP, DES, TBP, Mineralöl	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \downarrow$; $E_0 \downarrow$
Penner et al. [33]	Glas	0,94	n.a.	2000 - 5000	10 - 40	Mineralöl	$E_0 \downarrow$ bis Filmbil- dung, dann $E_0 \uparrow$
Penner et al. [46]	Glas	0,93 - 0,94	0,4 - 5	650 - 750	25	Mineralöl	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \uparrow$
Raynor & Leith [7]	Glas	0,94	2,9	880	25	DEHS	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \uparrow$
		0,97	8,5				

^a Hierbei handelt es sich um berechnete, mittlere Faserdurchmesser nach Davies [58]

n.a.: Keine Daten oder Informationen vorhanden

DES: Di-Ethyl-Sebacat

DEHS: Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat

DOP: Di-Octyl-Phthalat

TBP: Tri-Butyl-Phosphat

Durchmischung des Aerosols. Folglich kommt es zu einer erhöhten Kontaktwahrscheinlichkeit aufgrund von Luftwiderstandskräften und Trägheitskräften zwischen Partikeln und den Wänden (teilgesättigte Bereiche) der Lufttunnel.

Messungen von Charvet et al. [5] mit benetzbaren Filtermedien zeigen, dass es während der Beladung mit Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) des Filters zu einer Verschlechterung der Diffusionsabscheidung kommt. Erklärt wird diese Beobachtung durch eine steigende Gasgeschwindigkeit im Filterinneren mit zunehmender Sättigung sowie einem steigenden Faserdurchmesser aufgrund von abgeschiedener Flüssigkeit. Beide Effekte führen zu einer erhöhten Pe -Zahl, was zu einer sinkenden Diffusionsabscheidung führt. Zudem beobachten Charvet et al. [5] eine Verbesserung der Trägheitsabscheidung, ebenfalls aufgrund steigender Gasgeschwindigkeiten und somit einer steigenden Re - bzw. St -Zahl mit zunehmender Beladung.

Auch Conder & Liew [13] und Raynor & Leith [7] berichten von einer Zunahme der Abscheideeffizienz im Trägheitsbereich und einer Abnahme im Diffusionsbereich bei Vorhandensein von Flüssigkeit (Conder & Liew [13]: Geraniol, Raynor & Leith [7]: DEHS und Hexadecan) im Filterinneren. Die Autoren erklären dies durch eine erhöhte effektive Packungsdichte mit zunehmender Flüssigkeitsbeladung, was zu einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit und dadurch zu einer erhöhten Abscheidung aufgrund von Trägheit und des Sperreffekts bzw. zu einer verringerten Diffusionsabscheidung führt. Conder & Liew [13] stellen zudem einen steigenden Gesamtabscheidegrad mit zunehmender Flüssigkeitsbeladung fest. Die Autoren vermuten, dass die Trägheitsabscheidung und die Abscheidung durch den Sperreffekt mit zunehmender Flüssigkeitsbeladung dominieren.

Contal et al. [12], Frising et al. [6] und Penner et al. [33] berichten von einer Abnahme des Gesamtabscheidegrads bei einsetzender Flüssigkeitsbeladung (Contal et al. [12]: Di-Octyl-Phthalat (DOP), Frising et al. [6]: DEHS, Penner et al. [33]: Mineralöl). Es wird eine Verschlechterung der Diffusionsabscheidung mit zunehmender Sättigung sowie eine Reduzierung der besonders wirksamen Kollektorfläche durch abgeschiedene Flüssigkeitsstrukturen vermutet. Kommt es bei ausreichend hoher Sättigung zur Bildung eines Flüssigkeitsfilms an der Filterrückseite, so steigt der Gesamtabscheidegrad stark an. Eine Erhöhung der Abscheidung aufgrund des Sperreffekts und der Impaktion wird hierfür vermutet. Bei dem von Contal et al. [12] angegebenen Faserdurchmesser handelt es sich um einen mittleren Faserdurchmesser, welcher durch Rückrechnung aus dem Differenzdruck der Filter nach Davies [58] bestimmt wurde (mittlere Faserdurchmesser bestimmt nach Davies [58] sind in Tabelle 1.1 mit einem ^a gekennzeichnet).

Kolb et al. [57] zeigen eine steigende Penetration von anfänglich unbeölten Filtern (Lagenpakete aus zehn Mikroglasfaserpapieren) im Vergleich zum quasi-stationären Zustand für Tröpfchen (Mineralöl) unter 100 nm (im Bereich der Diffusionsabscheidung) sowie eine Verschiebung der MPPS zu kleineren Partikelgrößen. Dies wurde sowohl für benetzbare als auch nicht-benetzbare

Medien beobachtet. Für nicht-benetzbare Medien zeigen die Autoren zusätzlich eine sinkende Penetration im quasi-stationären Zustand für Tröpfchen über 100 nm (im Trägheitsbereich und Bereich des Sperreffekts) im Vergleich zu einem unbeladenen Filtermedium. Die Ursache für diese Beobachtungen konnte von Kolb et al. [57] nicht vollständig geklärt werden. Die Autoren vermuten, dass die unterschiedliche Morphologie von abgeschiedenen Öltröpfchen auf benetzbaren und nicht-benetzbaren Fasern einen Einfluss auf die Abscheidung nimmt [37, 38]. Denkbar ist auch eine Reduzierung der besonders wirksamen Kollektorfläche durch abgeschiedene Ölstrukturen [14, 15, 33].

Analog zu den Ergebnissen von Kolb et al. [57] (Untersuchung von Lagenpaketen) zeigen auch Penner et al. [46] an industriellen Einzellagen (ebenfalls Mikroglassfaserpapiere) eine Verschiebung der MPPS hin zu kleineren Tropfengrößen und eine reduzierte Abscheideeffizienz im Bereich der MPPS im stationären Zustand im Vergleich zum anfänglich unbeölten Zustand (Arbeitsmedium Mineralöl). Penner et al. [46] zeigen gleichermaßen wie Kolb et al. [57] eine Abnahme der Diffusionsabscheidung und eine Zunahme der Abscheidung im Trägheitsbereich bei Erreichen des stationären Zustands im Vergleich zum unbeölten Filter.

Im Gegensatz zu den oben genannten Autoren beschreiben Gougeon et al. [14] eine Abnahme der Abscheideeffizienz im Bereich von $0,1 - 0,6 \mu\text{m}$ mit zunehmender Beladung mit Di-Ethyl-Sebacat (DES) im Filterinneren. Allerdings sind hierbei die Filtereigenschaften weitgehend unbekannt. Auch Payet et al. [15] berichten von einer Abnahme der Abscheideeffizienz für Tropfengrößen von $0,08 - 0,3 \mu\text{m}$ (hauptsächlich im Diffusionsbereich und Bereich der MPPS) bei steigender Flüssigkeitsbeladung im Filter. Die Autoren stellen dieses Verhalten für unterschiedliche Flüssigkeiten mit stark unterschiedlichen Viskositäten fest (DOP, DES, Tri-Butyl-Phosphat (TBP) und Mineralöl). Payet et al. [15] berichten zudem über eine globale Verschlechterung der Gesamtabseideeffizienz mit zunehmender Beladung. Erklärt werden diese Beobachtungen sowohl von Gougeon et al. [14] als auch Payet et al. [15] durch eine Erhöhung der Gasgeschwindigkeit im Filter und gleichzeitig durch eine Verringerung der verfügbaren Anzahl an abscheide-relevanten Fasern bei nennenswerter Akkumulation von Flüssigkeit im Filterinneren.

In den meisten bekannten Untersuchungen erfolgt ausschließlich ein Vergleich des trockenen, unbeölten Zustands eines Gesamtfilters (bis zu zehn Einzellagen als Lagenpaket mit Stützstruktur und ggf. Nachabscheidevlies) mit dem quasi-stationären Zustand. Der genaue Einfluss von abgeschiedenen Ölstrukturen mit zunehmender Ölsättigung und Filteranströmgeschwindigkeit auf den Abscheidegrad bleibt dabei jedoch unbeantwortet. Da Lagenpakete bei der Ölbeladung immer einen Sättigungsgradienten in Strömungsrichtung aufweisen und damit verbunden in verschiedenen „Tiefen“ sehr unterschiedliche Ölablagerungsstrukturen auftreten (z.B. Ölfilme auf

Grenzflächen oder Ölkanäle im Filterinneren), sollen in dieser Arbeit genau definierte, dünne Wirrfaserschichten mit möglichst homogenem Sättigungsverlauf in Strömungsrichtung verwendet werden. An diesen dünnen Schichten soll der Abscheidegrad (Fraktions- und Gesamtabscheidegrad) bei unterschiedlichen Sättigungszuständen und Filteranströmgeschwindigkeiten bestimmt werden. Hierfür soll ein breiter Parameterraum an dieser definierten Filterstruktur untersucht werden, da in der Literatur diesbezüglich nur einzelne Fragestellungen mit unterschiedlichen Ergebnissen zu finden sind. Mit den aus dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen soll die noch offene Fragestellung beantwortet werden, inwiefern abgeschiedene Ölstrukturen auf dünnen Wirrfaserschichten bei definierten Sättigungszuständen und bei variierenden Anströmgeschwindigkeiten den Abscheidegrad beeinflussen.

2 Experimentelle Vorgehensweise

Dieses Kapitel behandelt das generelle Vorgehen zur Gewinnung experimenteller Ergebnisse. Der erste Teil widmet sich den eingesetzten Wirrfaservliesen und deren Herstellung sowie dem verwendeten Arbeitsfluid (Abschnitt 2.1). Der experimentelle Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung zur Beladung der hergestellten Wirrfaseranordnungen sowie die Bestimmung von Abscheidegraden werden in Abschnitt 2.2 vorgestellt. Abschnitt 2.3 beschreibt den verwendeten Mikro-Computertomographen sowie die Durchführung und Segmentierung der μ -CT Aufnahmen.

2.1 Verwendetes Filtermaterial und Arbeitsfluid zur Filtration von Ölnebel

In Abschnitt 2.1.1 wird auf die Anforderungen der eingesetzten Wirrfaseranordnungen sowie deren Herstellung eingegangen. Im Anschluss wird das verwendete Arbeitsfluid (Multikomponentenmineralöl) vorgestellt (Abschnitt 2.1.2).

2.1.1 Auswahl und Herstellung des eingesetzten Filtermaterials

Eine Herausforderung dieser Arbeit stellt die Wahl eines geeigneten Filtermediums dar. Das Filtermaterial sollte einerseits eine ausreichende Dicke aufweisen, um die Bildung von abgetrennten Ölstrukturen zu ermöglichen, wie sie typischerweise in den ersten Faserschichten der ersten Filterlage von industriell hergestellten Filtermedien zu finden sind. Gleichzeitig muss das Filtermedium dünn genug sein, damit sich möglichst homogene Sättigungsverläufe in der Filtermatrix einstellen. Industriell eingesetzte Koaleszenzfilter bestehen in der Regel aus bis zu zehn Einzellagen (Lagendicke von ca. 0,5 - 1,0 mm) in einem Lagenpaket, einer Stützstruktur auf der Abströmseite zur Verbesserung der mechanischen Stabilität und ggf. Nachabscheidevliesen

zur Reduktion von Sekundäraerosolen (Wiedereintrag von Tröpfchen). Koaleszenzfilter weisen im Betrieb durch ihre Dicke immer Sättigungsgradienten aufgrund von sehr unterschiedlichen Ölablagerungsstrukturen (z.B. Ölfilm oder Ölkanäle) in Durchströmungsrichtung auf. Ölkanäle bilden sich in industriell eingesetzten Lagenpaketen bereits am Ende der ersten Filterlage aus [11]. Daher wird in dieser Arbeit bewusst ein Filtermaterial gewählt, welches wesentlich dünner ist als die in der Industrie üblicherweise verwendeten Filtermedien. Es ist außerdem erforderlich, dass das Filtermaterial in seiner gesamten Dicke im in dieser Arbeit verwendeten μ -CT vollständig abbildbar ist, um Ölstrukturen auf der An- und Abströmseite im Bereich weniger Mikrometer auflösen zu können. Da der *Field of View* (FOV) von hochauflösenden μ -CT Aufnahmen (im Folgenden auch Scans genannt) im Bereich von ca. $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ liegt und das Filtermaterial mittig in der zylindrischen Aufnahme abgebildet werden soll, ist eine Filterdicke zwischen $150 - 180\ \mu\text{m}$ als ideal zu betrachten. Die Dicke dieser Lagen ist wesentlich geringer als die von industriell eingesetzten Filtermedien, weshalb mit einer schlechteren Abscheideeffizienz pro Faserschicht zu rechnen ist. Aus diesem Grund werden die hergestellten Medien in dieser Arbeit als **(Wirr-) Faserschichten/-vliese** bezeichnet, um Verwechslungen mit Lagenpaketen oder dickeren Filterlagen, wie sie kommerziell eingesetzt werden, zu vermeiden. Faserschichten mit einer Dicke von $< 200\ \mu\text{m}$ sind kommerziell nicht zu erwerben und werden eigens für dieses Forschungsvorhaben hergestellt. Hierfür kommen vier unterschiedliche Fasermaterialien zum Einsatz. Drei Mikroglasfasertypen (alle von Unifrax I LLC, Tonawanda, N.Y., USA) mit unterschiedlichem Faserdurchmesser und ein Polymerfasertyp (ADVANSIA Manufacturing GmbH, Hamm) aus Polyethylenterephthalat (PET). In Tabelle 2.1 sind die verwendeten Fasermaterialien näher spezifiziert und es ist die Zusammensetzung der Fasermischung zur Herstellung der Wirrfaserschichten angegeben.

Tabelle 2.1: Eingesetzte Fasermaterialien und Zusammensetzung der Fasermischung zur Herstellung der dünnen Wirrfaserschichten.

Bezeichnung	nomineller Faserdurchmesser	Fasermischung	Fasermaterial
B-15	$1,48\ \mu\text{m}$	20 ma.-%	Borosilikat-Glas
B-26	$2,44\ \mu\text{m}$	40 ma.-%	Borosilikat-Glas
EC6-6	$5,50\ \mu\text{m}$	20 ma.-%	E-Glas (Material aus SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , B_2O_3 und MgO)
Adv271P	$13,60\ \mu\text{m}$	20 ma.-%	Polyethylenterephthalat (PET)

Die Auswahl der verwendeten Fasermischung orientiert sich an industriell hergestellten Filtermedien. Es werden 20 ma.-% B-15, 40 ma.-% B-26, 20 ma.-% EC6-6 und 20 ma.-% Adv271P eingesetzt (Dichte der Fasermischung ρ_F entspricht $2,28 \text{ g cm}^{-3}$). Die nominellen (laut Hersteller) Faserdurchmesser der verwendeten Fasern sind ebenfalls in Tabelle 2.1 gegeben. Um die oben genannten Voraussetzungen an die Wirrfaseranordnungen zu erfüllen, werden diese mit einem Flächengewicht w von 15 g m^{-2} hergestellt. Für eine bessere mechanische Stabilität werden die dünnen Faservliese bei deren Bildung auf einem Trägermaterial, mit vernachlässigbarem Abscheidegrad und Druckverlust, aus Polypropylen (PP) gelegt (Net 117, Intermas, Lomme Cedex, Frankreich). Die Maschenweite des Trägermaterials beträgt $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ und die Stegbreite $0,25 \text{ mm} \times 0,25 \text{ mm}$.

Zur Herstellung der Wirrfaserschichten wird ein institutseigener Blattbildner (Haage Rapid Koethen, pruefbau Dr.-Ing. H. Duerner GmbH, Peissenberg) mit Aufschlaggerät (AG04, pruefbau Dr.-Ing. H. Duerner GmbH, Peissenberg) verwendet. Der Blattbildner entspricht DIN EN ISO 5269-2 (DIN 54358) zur Herstellung von Prüfblättern aus unterschiedlichen Faserstoffen. Abbildung 2.1 zeigt Fotografien des eingesetzten Aufschlaggeräts und des Blattbildners.

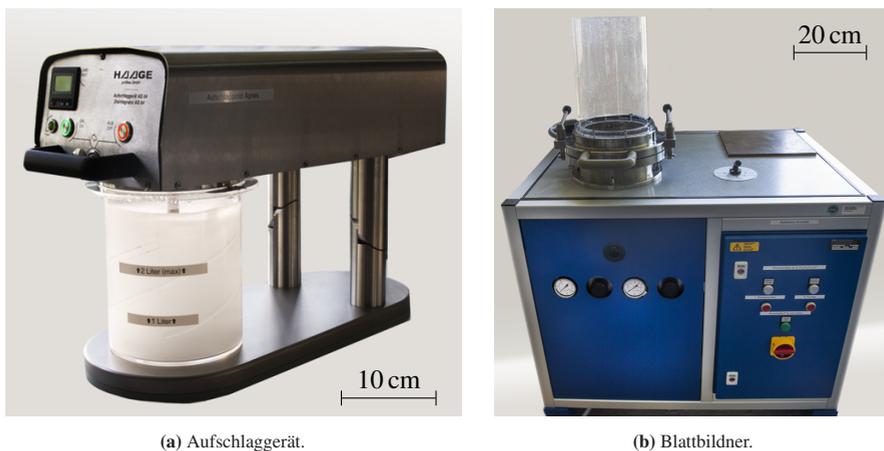
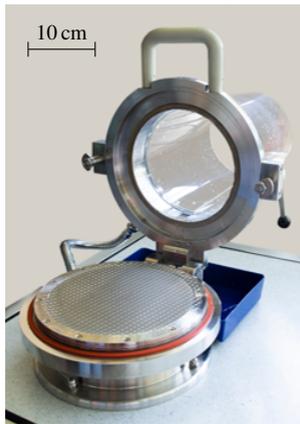


Abbildung 2.1: Fotografien des (a) Aufschlaggeräts und (b) des Blattbildners.

Die Fasermischung wird im Aufschlaggerät (Abbildung 2.1a) in 2 L demineralisiertem Wasser bei einem pH-Wert zwischen 2,8 und 3,0 für 20 min in eine Fasersuspension verteilt. Der pH-Wert wird mit verdünnter Schwefelsäure (0,05 molar) eingestellt (Mischungsverhältnis Wasser - Schwefelsäure 12:1), um die Fasern möglichst homogen zu verteilen. Über einen Dreiflügelpropeller, welcher in der geometrischen Achse des Aufschlagbehälters läuft, wird die Fasersuspension durchmischt. Der Aufschlagbehälter aus Acrylglas ist mit vier spiralförmigen Vierkant-Rippen an der Innenseite für eine ideale Durchmischung der Suspension ausgestattet.

Alle Bauteile entsprechen den Normabmessungen nach ISO 5263.

Im Anschluss wird die Fasersuspension entnommen und eine festgelegte Menge, entsprechend dem gewünschten Flächengewicht der Filterronden, für den Blattbildner (siehe Abbildung 2.1b) bereitgestellt. Die Blattbildungssäule besteht aus der Saugkammer (eingelassen im Blattbildungstisch), einem Füllzylinder aus Acrylglas, welcher sich nach hinten klappen lässt, und einem Stützsieb. In Abbildung 2.2 ist die Vorgehensweise beim Nasslegeprozess der selbst hergestellten Filterblätter illustriert.



(a) Einsetzen der Stützstruktur.



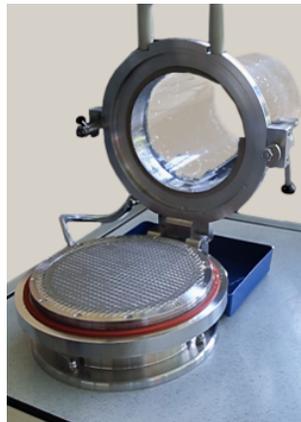
(b) Füllen des Zylinders und Faserzugabe.



(c) Sprudeln.



(d) Beruhigen und Ablassen des Wassers.



(e) Filtermaterial auf dem Stützsieb.



(f) Auflegen eines Trägerkartons.

Abbildung 2.2: Herstellungsprozess der dünnen Wirrfaseranordnungen. (a) Einsetzen der Stützstruktur und Schließen des Füllzylinders. (b) Der Füllzylinder wird mit Leitungswasser gefüllt und die Fasersuspension manuell hinzugegeben. (c) Die Suspension wird für eine homogene Durchmischung der Fasern aufgesprudelt. (d) Beruhigen für eine luftblasenfreie Suspensionssäule. (e) Ablassen des Wassers. Das Fasermaterial verbleibt im feuchten Zustand auf dem Stützsieb. (f) Aufgautschen eines Trägerkartons und finales Abziehen der Faseranordnung am PP-Stützgitter vom Stützsieb.

Zu Beginn der Herstellung der Faserschichten wird der Füllzylinder geöffnet und ein PP-Stützgitter, welches auf den Durchmesser des Stützsiebs zugeschnitten ist (20 cm), auf diesem Stützsieb aufgelegt (Abbildung 2.2a). Durch das Schließen des Füllzylinders erfolgt ein festes Anpressen des Stützgitters. Beim Füllvorgang des Füllzylinders mit Leitungswasser erfolgt die Zugabe der Fasersuspension aus dem Aufschlaggerät (siehe Abbildung 2.2b). Bei einem Fülllevel von ca. 7 L wird durch eingeblasene Druckluft die Suspensionssäule aufgesprudelt, um eine homogene Fasersuspension zu generieren (siehe Abbildung 2.2c). Es folgt eine kurze Beruhigungsphase (Abbildung 2.2d). Luftblasen, welche beim sofortigen Ablassen des Wassers durch das Stützsieb kleine Löcher in den Wirrfaseranordnungen hinterlassen würden, steigen während dieser Phase an die Oberfläche der Suspensionssäule. Im Anschluss folgt die Öffnung eines Ventils am Boden der Saugkammer und das Wasser fällt durch das feinmaschige Stützsieb. Die Fasern verbleiben bei diesem Vorgang homogen verteilt auf dem Stützsieb zurück (Abbildung 2.2e). Nachfolgend wird der Füllzylinder geöffnet und ein Trägerkarton auf dem Faservlies aufgelegt (Abbildung 2.2f). Im Anschluss wird mit Hilfe einer Gautschrolle ein gleichmäßiger Druck auf die feuchten Wirrfaserschichten ausgeübt (sog. Aufgautschen). Durch langsames und vorsichtiges Abziehen des PP-Stützgitters, wird das auf dem Stützgitter haftende Faservlies vom Stützsieb abgenommen. Mit einem Deckblatt wird das am Trägerkarton haftende Wirrfaservlies zusammen mit dem Stützgitter in einem Heizschrank bei 100°C getrocknet. Nach etwa 20 min kann das getrocknete Faservlies aus dem Heizschrank entnommen werden.

Aus jeder Charge (ein Aufschlagbehälter mit 2 L Suspension) werden acht Faservliese mit einem Flächengewicht von 15 g m^{-2} hergestellt, wofür eine Gesamtmasse von 4,147 g Fasermaterial im Aufschlaggerät verteilt werden. Diese Gesamtmasse beinhaltet von jedem Fasertyp 10 ma.-% zusätzliches Fasermaterial, da beim Aufschlagvorgang Faserablagerungen am Aufschlagbehälter, vor allem auf den Vierkant-Rippen, zu beobachten sind. Hauptsächlich die ersten und letzten Faserschichten einer Charge zeigten bei der gravimetrischen Bestimmung des Flächengewichts nach der Trocknung größere Schwankungen und wurden verworfen. Unzureichende Durchmischung des Fasermaterials, zu erkennen in leichter „Wolkenbildung“ zu Beginn des Aufschlagvorgangs sowie größere Mengen an abgeschiedenen Fasern im Aufschlagbehälter am Ende einer Charge sind mögliche Gründe für diese Beobachtungen. Nach der Trocknung werden Ronden mit einem Flächengewicht von $15 \pm 0,5 \text{ g m}^{-2}$ für die vorgestellten Untersuchungen dieser Arbeit ausgewählt, um gleichbleibende Filtereigenschaften zwischen den einzelnen Versuchsreihen sicherzustellen.

Aus den nassgelegten Wirrfaserronden werden nach dem Trocknungsprozess bis zu vier quadratische Faservliese (mit abgekanteten Ecken), passend für die spätere Verwendung in den Filterhaltern (siehe Abbildung 2.9), in den Abmessungen $7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$ ausgeschnitten. Das verwendete Faservlies ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

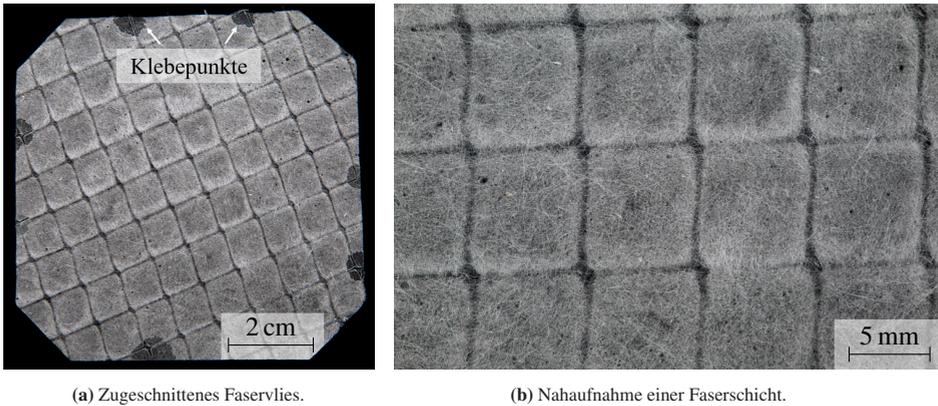


Abbildung 2.3: Fotografien der verwendeten Wirrfaserschichten mit einem Flächengewicht von 15 g m^{-2} , einer globalen Porosität von 95,9 % und einer Dicke von $160 \mu\text{m}$. (a) Zugeschnittenes Faservlies mit Klebepunkten an nicht durchströmbareren Bereichen. (b) Nahaufnahme einer Faserschicht. Blick auf die Anströmseite der Wirrfaserschicht; nach Straube et al. [59].

Mit Hilfe mehrerer Klebepunkte am äußersten Rand der Faserschichten (nicht durchströmbarer Bereich bei der Filtration) erfolgt ein festes Verbinden des Faservlieses mit der Stützstruktur (siehe Abbildung 2.3a). Als Klebstoff wird ein mittels UV-Licht (UV-Lichthärtungsgerät Emmi Curve, EMAG AG, Mörfelden-Walldorf) aushärtbares Monomer (NOA74, Norland Products Inc., Jamesburg, USA) verwendet. Die Fixierung des Faservlieses mit der Stützstruktur verhindert effektiv ein Ablösen oder Verschieben der Stützstruktur auf der Abströmseite der Faserschichten. Hierdurch ist eine deutliche Steigerung der mechanischen Stabilität der Faservliese zu erzielen.

Wie in Abbildung 2.3b zu erkennen, erscheint das selbst hergestellte Faservlies bei optischer Betrachtung makroskopisch sehr homogen. Es lassen sich auf dieser Ebene keine signifikanten Defekte aufgrund von beispielsweise Luftblasen bei der Filterherstellung, resultierend in Bereichen mit weniger Fasermaterial, erkennen. Da das Verarbeiten und Handling der dünnen Faserschichten bei vorsichtiger Handhabung zerstörungsfrei verläuft, kommen bei der Herstellung der Faserschichten keine Zusatzstoffe wie Binder oder Entschäumer zum Einsatz. Die hergestellten Faservliese weisen eine Dicke d_{WFS} von ca. $160 \mu\text{m}$ auf.

In dieser Arbeit wird zwischen globaler und lokaler Porosität bzw. Sättigung unterschieden. Globale Angaben beziehen sich dabei auf die Porosität bzw. Sättigung auf makroskopischer Ebene. Die Bestimmung der globalen Porosität bzw. Sättigung erfolgt gravimetrisch. Lokale Porositäts- bzw. Sättigungsangaben beziehen sich auf Werte, welche mit dem $\mu\text{-CT}$ auf mikroskopischer Ebene bestimmt werden. Die globale Porosität Φ_{global} (Hohlraumvolumen in den Wirrfaserschichten) lässt sich mit Formel 2.1 bestimmen.

$$\Phi_{\text{global}} = 1 - \frac{w}{\rho_F d_{\text{WFS}}} \quad (2.1)$$

Hierbei entspricht w dem Flächengewicht, ρ_F der Dichte der Fasermischung und d_{WFS} der Dicke der Wirrfaserschichten. Für die in dieser Arbeit verwendeten Faserschichten ergibt sich demnach eine globale Porosität von $\Phi_{\text{global}} = 0,959$.

Im Folgenden sollen die nominellen Faserdurchmesser aus den Datenblättern der verwendeten Mikroglas- und PET-Fasern (siehe Tabelle 2.1), mit experimentell ermittelten Faserdurchmessern von den selbst hergestellten und mit Öl beladenen Wirrfaservliesen nach der Untersuchung am μ -CT verglichen werden. Für die genaue Durchführung und Segmentierung der einzelnen Phasen einer μ -CT Aufnahme (Luft, Öl, Mikroglas- und PET-Fasern) sei auf Abschnitt 2.3 verwiesen.

In Abbildung 2.4 ist die anzahlbezogene Summenverteilung Q_0 von 550 experimentell ermittelten Faserdurchmessern dargestellt.

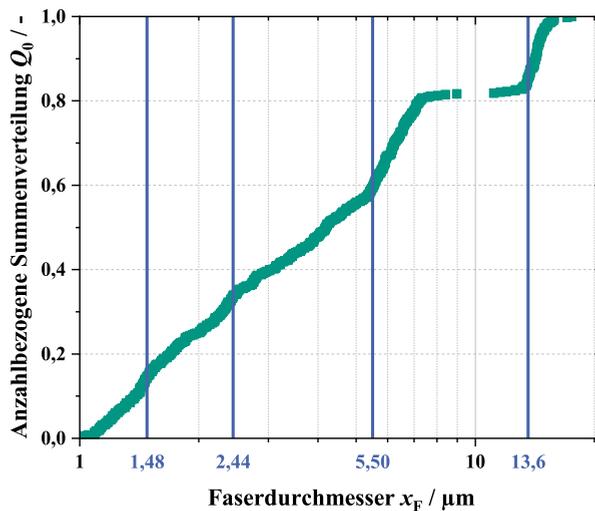


Abbildung 2.4: Vergleich von nominellen und experimentell ermittelten Faserdurchmessern.

Es sind Faserdurchmesser aus den angefertigten μ -CT Aufnahmen mit höchstmöglicher Auflösung (Aufnahme 2, 4, 5, 7, 10, 17, 18 und 19, siehe Kapitel 3, Tabelle 3.1 und 3.4) von zufällig orientierten Fasern mit Hilfe eines Messwerkzeugs der verwendeten Computersoftware zur Verarbeitung der μ -CT Aufnahmen (Dragonfly[®], siehe 2.3.4) dargestellt.

In Abbildung 2.4 sind die nominellen Faserdurchmesser als vertikale Linien (blau) gekennzeichnet. Es ist zu beachten, dass die verwendeten Glasfasern in Bezug auf deren Faserdurchmesser eine Normalverteilung (Gauß'sche Verteilung) aufweisen und es vom Hersteller keine detaillierten Informationen zur Faserverteilung gibt (Abweichungen von $\pm 200\%$ vom nominellen Faserdurchmesser können auftreten). Daher ist die exakte Unterscheidung zwischen Fasern mit einem nominellen Durchmesser von $1,48\ \mu\text{m}$, $2,44\ \mu\text{m}$ und $5,50\ \mu\text{m}$ schwierig. Dies lässt sich an der stetig ansteigenden anzahlbezogenen Summenverteilung der Faserdurchmesser von ca. $1 - 5\ \mu\text{m}$ beobachten. Eine genaue Zuordnung von lokal steileren Anstiegen zu nominellen Faserdurchmessern der Faserhersteller bis zu einem Faserdurchmesser von ca. $5,5\ \mu\text{m}$ ist daher schwierig. Bei einem Faserdurchmesser von ca. $5,5 - 7\ \mu\text{m}$ ist ein leicht steilerer Anstieg der Q_0 -Verteilung im Vergleich zu kleineren Faserdurchmessern zu beobachten. Dies lässt darauf schließen, dass in diesem Größenbereich besonders viele Fasern mit ähnlichem Durchmesser vorliegen. Fasern mit einem experimentell ermittelten Durchmesser zwischen $5,5$ und $7\ \mu\text{m}$ lassen sich demnach einem nominellen Faserdurchmesser von $5,50\ \mu\text{m}$ zuordnen. Eine Erklärung für experimentell größer bestimmte Faserdurchmesser im Vergleich zu nominellen Durchmessern in diesem Größenbereich ist eine mögliche, breite Verteilung der Durchmesser der Glasfasern. Zudem werden in dieser Arbeit ausschließlich beölte Wirrfaseranordnungen mit dem $\mu\text{-CT}$ untersucht. Eine leichte Überschätzung des experimentell ermittelten Faserdurchmessers kann demnach auch auf dünne filmähnliche Ölstrukturen auf den Fasern zurückgeführt werden, welche aufgrund ihrer geringen Dicke vom $\mu\text{-CT}$ nicht als Öl, sondern als Fasermaterial identifiziert werden (siehe Abschnitt 3.2).

Zwischen einer Größe von etwa 9 und $11\ \mu\text{m}$ sind bei der experimentellen Auswertung der Faserdurchmesser keine Fasern zu finden. Ab einem Durchmesser von ca. $11\ \mu\text{m}$ werden ausschließlich PET-Fasern identifiziert. Für diese Fasern ist ein eindeutig s-förmiger Verlauf der Q_0 -Verteilung zu beobachten ($11\ \mu\text{m} \leq x_F \leq 17\ \mu\text{m}$). Am Wendepunkt dieser s-förmigen Kurve ist ein mittlerer Durchmesser der PET-Fasern von etwa $14,4\ \mu\text{m}$ bestimmbar. Für die Faserverteilung der PET-Fasern gibt der Hersteller einen Qualitätsbereich von $\pm 0,6\ \mu\text{m}$ des nominellen Faserdurchmessers ($13,60\ \mu\text{m}$) an, welcher bei der experimentellen Auswertung leicht überschritten wird. Ein möglicher Grund hierfür könnten ebenfalls kleine Ölstrukturen auf den PET-Fasern sein, welche aufgrund der ähnlichen Dichte von Öl und PET auf $\mu\text{-CT}$ Aufnahmen kaum zu unterscheiden sind.

2.1.2 Eingesetztes Arbeitsfluid

Als Öl kommt ein Standard-Kompressoröl zum Einsatz (Multikomponentenmineralöl, Roto Inject Fluid Ndurance, Atlas Copco Airpower n.v., Wilrijk, Belgien). Die scherratengetriggerte Viskositätsbestimmung unter Verwendung eines Rheometers im Temperaturbereich von 6 - 40°C ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

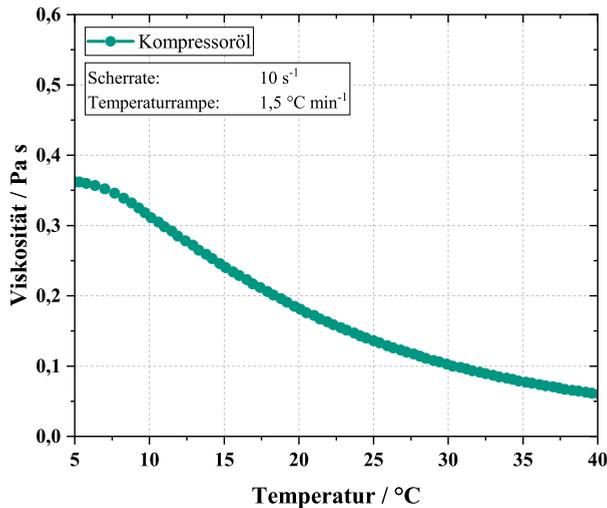


Abbildung 2.5: Dynamische Viskosität des eingesetzten Kompressoröls im Temperaturbereich von 6 - 40°C.

Es ist zu beobachten, dass die dynamische Viskosität des Kompressoröls mit zunehmender Öltemperatur kontinuierlich abnimmt. Die mit einem Biegeschwinger (Densito 30PX, Mettler-Toledo International Inc., Columbus, USA) bei 20°C bestimmte Dichte des Öls beträgt identisch zur Herstellerangabe 870 kg m^{-3} . Im Datenblatt ist die Oberflächenspannung des Öls angegeben zu 30 mN m^{-1} bei Umgebungsdruck und einer Temperatur von 20°C. Die experimentell ermittelte Oberflächenspannung bei einer Temperatur von 20°C entspricht $30,8 \text{ mN m}^{-1}$, gemessen mit der Methode des hängenden Tropfens [60, 61], und stimmt damit gut mit den Herstellerangaben von 30 mN m^{-1} überein. Der Dampfdruck des Öls beträgt laut Hersteller $< 0,5 \text{ Pa}$ bei 20°C. Verdunstungseffekte des eingesetzten Multikomponentenmineralöls während der Tropfenerzeugung und Filtration können über die Kelvin-Gleichung abgeschätzt werden. Dies wurde in der Vergangenheit bereits von Kampa [10] und Cooper et al. [62], für Versuchsbedingungen wie sie

in dieser Arbeit vorzufinden sind (Umgebungstemperatur und -druck), durchgeführt. Öltröpfen liegen demnach bereits ab einer Größe von etwa 1 nm stabil in der Gasphase vor. [10, 62]

2.2 Experimenteller Versuchsaufbau

In dieser Arbeit finden experimentelle Untersuchungen an zwei unterschiedlichen Versuchsaufbauten statt. Für die Abscheidung von Ölnebel auf einzelnen Faserschichten und der Analyse von abgeschiedenen Ölstrukturen kommt eine 3D gedruckte **Beladungskammer** zum Einsatz (Abschnitt 2.2.1). Für die Messung von Abscheidegraden (Fraktions- und Gesamtabscheidegrade) an mehreren dünnen (vorbeladenen) und in Reihe geschalteten Wirrfaservliesen wird eine neuartige **Filterkammer** sowie eine Absaugung des Großteils des Volumenstroms aus dem Zerstäuber zur Reduktion der Tropfenkonzentration im Rohgas verwendet (Abschnitt 2.2.2). Die Vorstellung des eingesetzten Messgeräts zur Bestimmung von Tropfengrößenverteilungen im Aerosol erfolgt in Abschnitt 2.2.3. In Abschnitt 2.2.4 wird das durch den Zerstäuber generierte Aerosol im Hinblick auf einen konstanten Rohgasmassenstrom und eine möglichst (zeitlich) unveränderte Tropfengrößenverteilung sowie auf mögliche Partikelverluste in der Versuchsanlage untersucht, was beides zur korrekten Bestimmung von Abscheidegraden berücksichtigt werden muss. Die experimentelle Vorgehensweise zur Bestimmung von Abscheidegraden ist Gegenstand von Abschnitt 2.2.5.

2.2.1 Versuchsaufbau zur Beladung von einzelnen Faserschichten mit Ölnebel

Der Aufbau der Ölnebel-Filtrationsanlage unterscheidet sich von den bisher verwendeten Laboranlagen von Penner [8], Kolb [9] oder Kampa [10] hauptsächlich in der Aufnahme der dünnen Faserschichten in der Beladungs- bzw. Filterkammer. Wie eingangs erwähnt, wird die Versuchsanlage in zweifacher Weise verwendet. Zum einen werden einzelne Faservliese mit Ölnebel in der Beladungskammer beladen (Gegenstand dieses Abschnitts). Zum anderen finden in einer neuartigen Filterkammer Abscheidegradmessungen an mehreren Einzelschichten der Wirrfaservliese in Reihe statt (Gegenstand im folgenden Abschnitt 2.2.2). Die Versuchsaufbauten unterscheiden sich hauptsächlich durch den Einsatz der Beladungs- bzw. Filterkammer. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2.6 dargestellt und wird im Folgenden beschrieben.

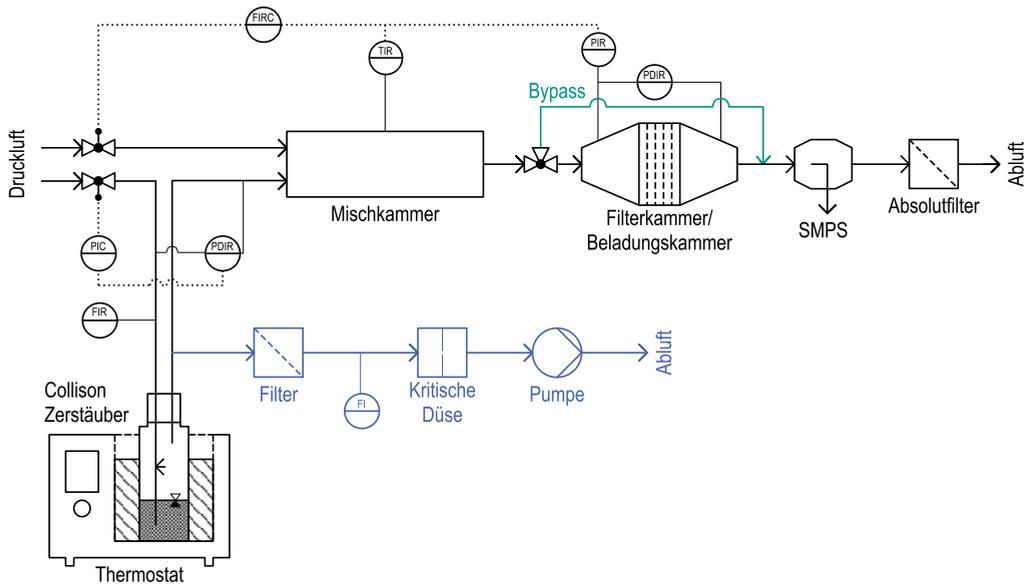


Abbildung 2.6: Experimenteller Versuchsaufbau zur Beladung dünner Wirrfaserschichten mit Ölnebel und zur Bestimmung von Abscheidegraden; nach Straube et al. [63].

Die Generierung von Ölaerosol für das Beladen der Wirrfaserschichten (Verwendung der Beladungskammer) als auch für die Bestimmung von Abscheidegraden (Verwendung der Filterkammer) erfolgt mit einem Collison Zerstäuber [64, 65]. Collison Zerstäuber zeichnen sich durch eine einfache Bedienung und schlichte Bauweise aus und werden mit Druckluft betrieben (pneumatische Zerstäubung, Zweistoffdüse). Durch Scherkräfte in der Düse aufgrund einer Zweiphasenströmung (Luft und Flüssigkeit) wird ein Tröpfchenaerosol erzeugt. Eine Abscheidung von großen Tropfen erfolgt an einem zylindrischen Prallblech gegenüber der Düsenöffnung. Für die Beladungsversuche wird ein Zerstäuberkopf mit drei Steigröhrchen verwendet (vgl. [8, 10]). Abgeschiedene Flüssigkeit läuft über das Prallblech in einen zylindrischen Vorratsbehälter zurück. Der Vorratsbehälter ist mit etwa 200 mL des eingesetzten Mineralöls gefüllt. Für eine konstante Tropfengrößenverteilung sowie einen konstanten Ölmassenstrom im Rohgas ist die Ansaugung blasenfreier Flüssigkeit über die Steigröhrchen essenziell. Daher sind diese mit Silikonschläuchen verlängert, sodass möglichst homogen temperierte und blasenfreie Flüssigkeit angesaugt wird. Zylindrische Vorratsbehälter bieten den Vorteil, dass bei einem vergleichsweise geringen Volumen, eine hohe Flüssigkeitssäule im Behälter zur Verfügung steht im Vergleich zu konischen Gefäßen (vgl. [8, 9, 10]). Darüber hinaus lässt sich das Öl in zylindrischen Vorratsbehältern über die komplette Flüssigkeitssäule homogen temperieren. Eine Fotografie des eingesetzten Zerstäubers ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Der Zerstäuber ist in

einem Thermostat (Kälte-Umwälzthermostat F25, JULABO Labortechnik GmbH, Seelbach) bei einer konstanten Wasserbadtemperatur von 22°C angebracht. Über ein elektropneumatisches Druckregelventil (ITV 1030, SMC Pneumatik GmbH, Engelsbach) wird der Differenzdruck über dem Zerstäuber konstant auf 0,5 bar eingestellt. Mit Hilfe eines Differenzdrucksensors (Omega Engineering Inc., Norwalk, USA) erfolgt die Differenzdruckmessung über dem Zerstäuber. Zusätzlich wird der Massenstrom an partikelfreier Druckluft durch den Zerstäuber mit einem Massendurchflussmesser (GE50A013204EBV020, MKS Instruments Inc., Andover, USA) bestimmt. Alle Daten werden über eine digitale Anlagensteuerung (LabVIEW, Version 2017, National Instruments Corporation, Austin, USA) überwacht, gesteuert und aufgezeichnet. Durch eine konstante Temperierung des Zerstäubers über die Wasserbadtemperatur und einen konstanten Differenzdruck über diesem, lässt sich ein konstanter Rohgasmassenstrom und eine möglichst (zeitlich) unveränderte Tropfengrößenverteilung sicherstellen. Nach dem Zerstäuber folgt eine optional zuschaltbare Absaugung eines Teils des Aerosolstroms zur Reduzierung der Tröpfchenkonzentration (blau gekennzeichnet in Abbildung 2.6). Die Absaugung besteht dabei aus einem Filter zur Abscheidung von Öltröpfchen, einer kritischen Düse und einer Membranpumpe (8011 ZVP, Rietschle GmbH, Memmingen), welche den Großteil des Aerosolstroms aus dem Zerstäuber und damit aus dem System ausleitet. Zusätzlich wird der abgesaugte Volumenstrom mit einem Massendurchflussmesser (41401, TSI Instruments Ltd., High Wycombe, UK) überwacht, um konstante Verdünnungsverhältnisse und Anströmgeschwindigkeiten an der Filterkammer zu gewährleisten. Diese Absaugung wird ausschließlich bei der Bestimmung von Abscheidegraden eingesetzt und wird im nachfolgenden Abschnitt ausführlich behandelt (Abschnitt 2.2.2).

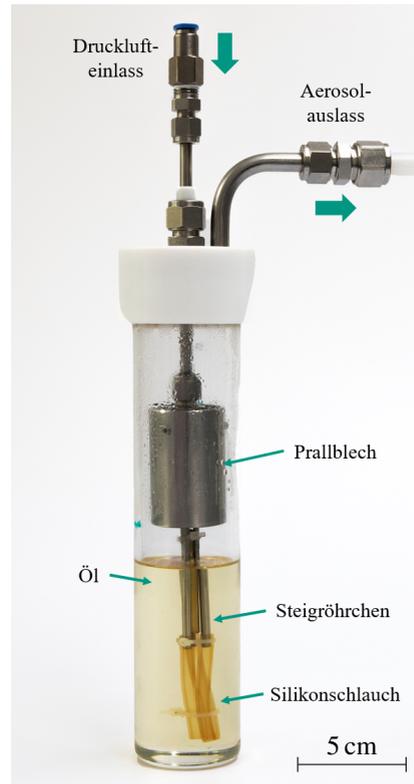


Abbildung 2.7: Fotografie des Collision Zerstäubers.

Über Schlauchleitungen gelangt der erzeugte und nicht ausgeleitete Ölnebel in eine Mischkammer. Dort wird das Aerosol mit partikelfreier Druckluft aus einem Massendurchflussregler (GM100A013105KBMN020, MKS Instruments Inc., Andover, USA) gemischt. Bis zum Erreichen eines konstanten Rohgasmassenstroms und einer möglichst (zeitlich) unveränderten Tropfengrößenverteilung erfolgt eine Aerosolführung über einen Dreiwegehahn (Kugelhahn) in einen Bypass um die Beladungskammer. Über ein T-Stück wird der Aerosolstrom nach der Beladungskammer wieder zurückgeführt (grün dargestellt in Abbildung 2.6). Eine Fotografie der Beladungskammer ist in Abbildung 2.8 zu sehen.

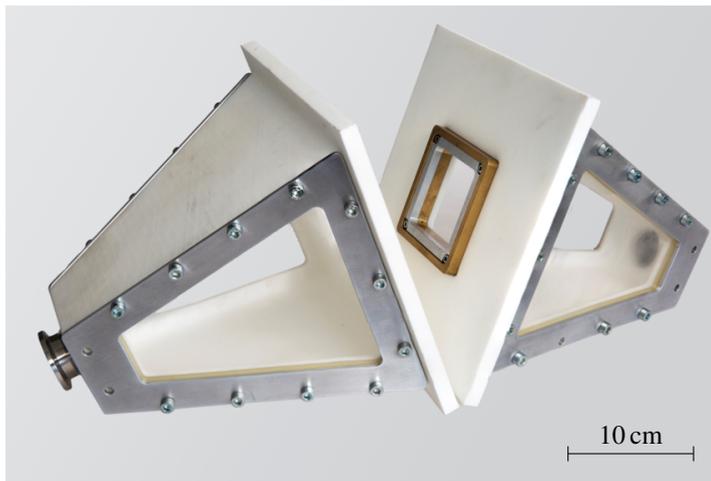


Abbildung 2.8: Verwendete Beladungskammer zur Vorbeladung je einer dünnen Wirrfaserschicht mit Ölnebel. Zwei Seiten jedes Pyramidenstumpfes bestehen aus Acrylglas zur visuellen Beobachtung der Wirrfaseranordnungen im laufenden Betrieb; nach Straube et al. [63].

Auf je zwei Seiten jedes Pyramidenstumpfes sind Acrylglasplatten eingesetzt. Diese ermöglichen einen optischen Zugang im laufenden Betrieb. Die Pyramidenstümpfe sind mittels Klemmzwingen fest miteinander verbunden. Je eine Faserschicht wird in entsprechenden Filterhaltern zwischen den Pyramidenstümpfen befestigt. Ein Filterhalter besteht aus einem Messingrahmen, welcher als Auflage für ein Faservlies dient, und einem Klemmrahmen aus Aluminium. Das Faservlies wird zwischen Messingrahmen und Klemmrahmen eingespannt und der Messingrahmen mit dem Klemmrahmen verschraubt. In Abbildung 2.9 sind Fotografien eines in dieser Arbeit verwendeten Filterhalters dargestellt.

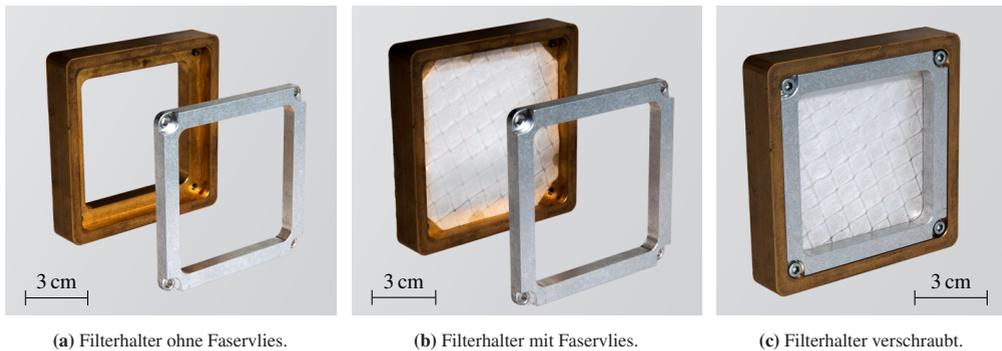


Abbildung 2.9: Bilder der verwendeten Filterhalter, (a) ohne eingesetztes Wirrfaservlies, (b) mit eingesetztem Wirrfaservlies und (c) im verschraubten Zustand.

Abbildung 2.9a zeigt den Messingrahmen mit Klemmrahmen und Abbildung 2.9b den Filterhalter mit eingesetztem Faservlies. In Abbildung 2.9c ist der verschraubte Filterhalter mit Faservlies zwischen Messingrahmen und Klemmrahmen zum Einsatz in der Beladungskammer bzw. Filterkammer zu sehen.

Der Differenzdruck über den Wirrfaseranordnungen wird fortlaufend mit einem Differenzdrucksensor aufgezeichnet (MMD-WU2.5V10H3D6T1A3CE, Omega Engineering Inc., Norwalk, USA). Der Absolutdruck vor den Wirrfaserschichten (PXM319-002A10V, Omega Engineering Inc., Norwalk, USA) und die Temperatur an der Mischkammer (TEMOD-IC PT1000, B+B Thermo-Technik GmbH, Donaueschingen) werden zum Einstellen einer konstanten Anströmgeschwindigkeit an den Faservliesen ebenfalls aufgezeichnet. Nach der Beladungskammer folgt eine isokinische Probenahme zum Messgerät (SMPS, siehe Abschnitt 2.2.3). Im Anschluss an die Probenahme werden gasgetragene Tröpfchen in einem Absolutfilter abgeschieden, bevor die Ausleitung des Abgases erfolgt.

2.2.2 Versuchsaufbau zur Bestimmung von Abscheidegraden

Für die Bestimmung von Abscheidegraden (Fraktions- und Gesamtabscheidegrade) an unbeladenen und beladenen Faservliesen wird eine neuartige Filterkammer verwendet. Mit dieser Kammer ist es möglich bis zu zehn Wirrfaservliese in Reihe zu schalten. Eine Reihenschaltung ermöglicht die Bestimmung von Abscheidegraden an den Wirrfaserschichten, da einzelne Faserschichten aufgrund ihrer geringen Dicke einen zu geringen Abscheidegrad aufweisen (siehe Abschnitt 4.2). Darüber hinaus ist die Ölkonzentration signifikant zu reduzieren, um während Abscheidegradmessungen die Kollektorfläche, also die Morphologie von abgeschiedenen

Flüssigkeitsstrukturen und der unbeölten Fasern, nicht zu verändern. Aus diesem Grund wird eine aktive Absaugung implementiert, welche den Großteil des Aerosolstroms aus dem Zerstäuber ausleitet. Im Vergleich zum Versuchsaufbau zur Beladung einzelner Wirrfaserschichten, unterscheidet sich die apparative Umsetzung für Abscheidegradmessungen grundsätzlich in dieser zusätzlichen Absaugung des Ölaerosols direkt nach dem Zerstäuber (blau dargestellt in Abbildung 2.6) und in der Aufnahme der dünnen Wirrfaserschichten in einer neuartigen Filterkammer. Alle Experimente zur Bestimmung von Abscheidegraden an den dünnen Wirrfaserschichten werden bei einer Wasserbadtemperatur von 8°C und einem Differenzdruck über dem Zerstäuber von 0,6 bar durchgeführt. Zusätzlich wird nur ein Steigröhrchen im Zerstäuber zur Ansaugung von Flüssigkeit verwendet. Die Kombination aus leicht erhöhtem Differenzdruck über dem Zerstäuber, zusammen mit der Reduzierung der Anzahl an Steigröhrchen und wesentlich geringerer Wasserbadtemperatur im Vergleich zu den Ölbeladungsversuchen (siehe vorheriger Abschnitt) ist erforderlich, da sich hierdurch geringe Ölbeladungsraten bei konstanten Tropfengrößenverteilungen erzielen lassen. Die Bestimmung der Ölbeladungsrate erfolgt gravimetrisch, indem ein hocheffizienter Filter, bestehend aus mehreren Filterlagen, für einen definierten Zeitraum mit Ölnebel beladen wird. Aus der abgeschiedenen Ölmenge ist im Anschluss ein Zurückrechnen auf die Ölbeladungsrate möglich. Durch die beschriebenen Maßnahmen zur Konzentrationsenkung des Ölaerosols, lässt sich die Ölbeladungsrate von $204\text{ g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ (Wasserbadtemperatur 22°C , Zerstäuberdruck 0,5 bar, drei Steigröhrchen) auf $2,1\text{ g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ (Wasserbadtemperatur 8°C , Zerstäuberdruck 0,6 bar, ein Steigröhrchen und Absaugung) senken. Ein Vergleich der Tropfengrößenverteilungen für beide Betriebspunkte findet sich in Abschnitt 2.2.4.

Da sich mit zunehmender Filtrationszeit auch bei geringen Ölkonzentrationen neue Ölstrukturen auf Filterfasern ausbilden oder bestehende Flüssigkeitsstrukturen signifikant verändern können, werden die zu untersuchenden Faservliese bei der Bestimmung von Fraktionsabscheidegraden nur für kurze Zeit mit Ölnebel beladen. Bis zum Erreichen einer stabilen Tropfengrößenverteilung und eines stabilen Ölmassenstroms erfolgt die Aerosolführung wiederum im Bypass um die Filterkammer.

Die Filterkammer unterscheidet sich von der Beladungskammer hauptsächlich in der Aufnahme der einzelnen Wirrfaseranordnungen und ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

Die für diese Arbeit entwickelte Filterkammer verfügt über eine hohe Flexibilität bezüglich der Aufnahme der dünnen Wirrfaseranordnungen. Es können bis zu zehn Faservliese in Reihe geschaltet werden. In Abbildung 2.10b sind exemplarisch sechs Filterhalter vor der Filterkammer positioniert. Vier weitere Filterhalter befinden sich in der Filterkammer. Der Abstand zwischen den einzelnen Wirrfaseranordnungen im eingebauten Zustand (incl. Flachdichtung zwischen den Filterhaltern) in der Filterkammer beträgt ca. 16 mm. Dieser Abstand gewährleistet, dass sich die Faservliese bei einer Reihenschaltung bezüglich des Abscheideverhaltens möglichst wenig

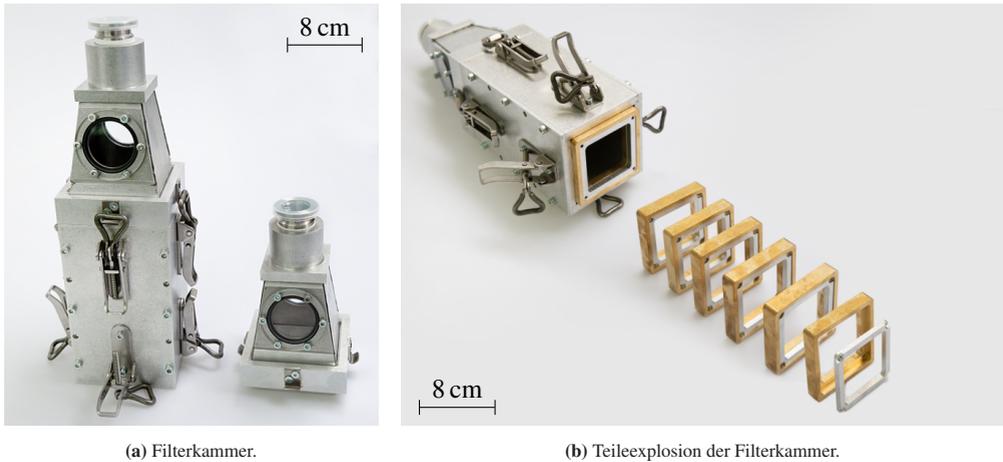


Abbildung 2.10: Fotografie der verwendeten Filterkammer zur Filtration von Ölnebel. (a) Filterkammer bestehend aus zwei Pyramidenstümpfen und einem Mittelteil zur Aufnahme von bis zu zehn Filterhaltern. Die Pyramidenstümpfe und das Mittelteil werden über Schnellspanner verbunden. (b) Teileexplosion der Filterkammer; nach Straube et al. [63].

beeinflussen (gleiche Abscheidung pro Lage, siehe Abschnitt 4.2). Schnellspanner, welche die Pyramidenstümpfe und das Mittelteil verbinden, erlauben eine schnelle und einfache (De-) Montage der Filterhalter. Acrylglasscheiben auf zwei Seiten jedes Pyramidenstumpfes ermöglichen eine visuelle Beobachtung der Faservliese im eingebauten Zustand. Die Pyramidenstümpfe und das Mittelteil sind aus Aluminium gefertigt. Über einen ISO-KF 25 Anschluss ist eine Integration der Filterkammer in die Versuchsanlage problemlos möglich.

Im Anschluss an die Filterkammer befindet sich, identisch zu Versuchsreihen zur Beladung einzelner Wirrfaseranordnungen unter Verwendung der Beladungskammer, eine isokinetische Probenahme zum Messgerät. Der übrige Aerosolstrom durchströmt auch in diesem Aufbau einen Absolutfilter, bevor er als Abgas ausgeleitet wird.

2.2.3 Bestimmung von Tropfengrößenverteilungen und -konzentrationen im Aerosol

Öltröpfchen im Bereich der MPPS penetrieren leichter durch die Wirrfaseranordnungen als kleinere (im Bereich der Diffusionsabscheidung) oder größere Tröpfchen (im Bereich der Trägheitsabscheidung und des Sperreffekts). Öltröpfchen $> 1 \mu\text{m}$ werden nahezu komplett aufgrund von Trägheit in den Wirrfaserschichten abgeschieden. Deshalb ist der Tröpfchengrößenbereich 30–800 nm von hauptsächlichem Interesse für das Abscheideverhalten von Ölnebeln. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ausschließlich ein Scanning-Mobility-Particle-Sizer (SMPS),

bestehend aus einer Kr^{85} Quelle zur Neutralisierung der Partikeln, einem Kondensationskernzähler (Condensation Particle Counter, TSI Modell 3775 high) und einem differentiellen Mobilitätsanalysierer (Differential Mobility Analyzer, Modell Hauke Vienna Long) verwendet. Dabei klassiert das SMPS Partikeln nach ihrem elektrischen Mobilitätsdurchmesser. [66, 67]

2.2.4 Rohgasbetrachtung

Ein konstanter Rohgasmassenstrom und eine möglichst (zeitlich) unveränderte Tropfengrößenverteilung sind essenziell für den Vergleich abgeschiedener Flüssigkeitsstrukturen, zur Einstellung von definierten Sättigungen und für die Bestimmung von Abscheidegraden. Daher wird der Zerstäuber zur Generierung von Tröpfchenaerosolen in einem Thermostat konstant temperiert und der Differenzdruck über dem Zerstäuber konstant gehalten.

Rohgasbetrachtung bei der Beladung dünner Wirrfaserschichten mit Ölnebel

Für die Vorbeladung der dünnen Faserschichten auf definierte Sättigungszustände, wird der Differenzdruck über dem Zerstäuber stets konstant auf 0,5 bar und die Wasserbadtemperatur auf 22°C eingestellt. In Abbildung 2.11 ist das Rohgas für die Beladung der dünnen Wirrfaserschichten mit Ölnebel bei einer Anströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1} dargestellt. Diese experimentellen Untersuchungen erfolgen beim Durchströmen der 3D gedruckten Beladungskammer, ohne dass sich eine Wirrfaserschicht in dieser befindet.

In Abbildung 2.11a ist die Anzahlverteilung des Ölnebels dargestellt, in Abbildung 2.11b die Anzahldichteverteilung q_0 . Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar. Es ist exemplarisch der Mittelwert aus 45 Versuchen (Versuche aus unterschiedlichen Monaten und Jahreszeiten) aufgezeichnet. Leichte Schwankungen der Anzahlverteilung im Rohgas sind auf Temperaturunterschiede im Labor zwischen Sommer und Winter ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) zurückzuführen. Die Anzahlverteilung ist annähernd log-normalverteilt mit einem anzahlbezogenen Modalwert von ca. 400 nm bei einer geometrischen Standardabweichung von 1,84. Die Ölkonzentration beträgt 72 mg m^{-3} und die Ölbeladungsrate an den Wirrfaseranordnungen in der Filterkammer $204\text{ g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$. Die Anzahldichteverteilung in Abbildung 2.11b zeigt eine leicht bimodale Ausprägung. Neben dem globalen Modalwert bei etwa 250 nm zeigt sich ein zweiter Peak bei ca. 60 nm. Dieser Peak ist auf die Bildung von Satellitentropfen beim Zerstäubungsvorgang zurückzuführen. Bei der Zerstäubung von Flüssigkeit entstehen Satellitentropfen infolge eines Ungleichgewichts in den kapillaren Kräften während des Aufbruchs des Primärtropfens. Dieses Phänomen ist eng mit

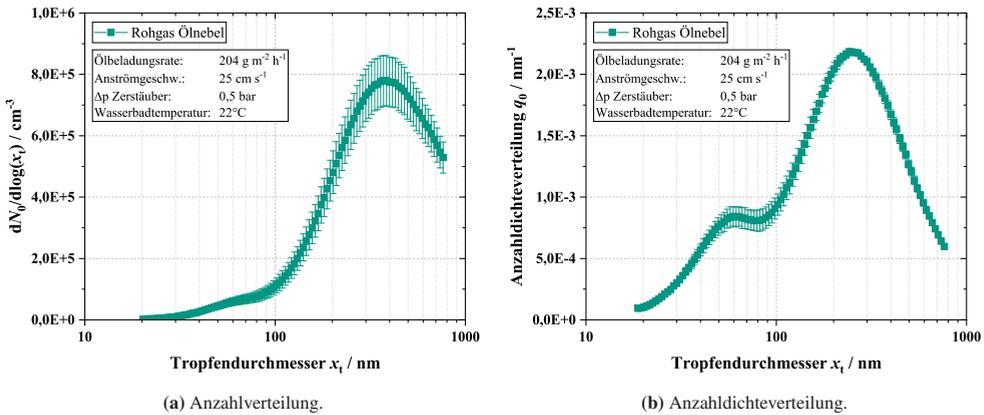
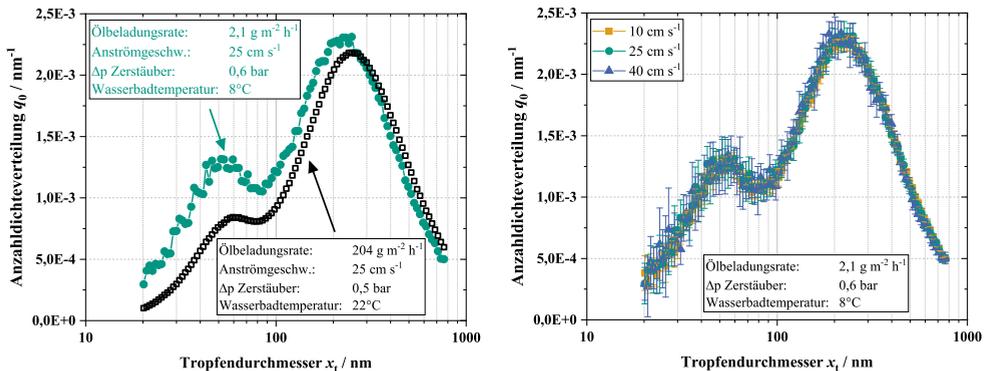


Abbildung 2.11: Tropfengrößenverteilungen des Rohgases bei der Beladung von Wirrfaservliesen mit Ölnebel. (a) Anzahlverteilung und (b) Anzahldichteverteilung bei einem Differenzdruck über dem Zerstäuber von 0,5 bar, einer Anströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1} und einer Ölbeladungsrate von $204 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; nach Straube et al. [68].

verschiedenen Parametern verbunden, wie z.B. der Oberflächenspannung der Flüssigkeit, den Strömungsbedingungen oder der Geometrie des Zerstäubers. [69, 70]

Rohgasbetrachtung bei der Bestimmung von Abscheidegraden

Analog zur Vorsättigung der Wirrfaseranordnungen, muss auch für die Bestimmung von Fraktions- und Gesamtabscheidegraden der Rohgasmassenstrom und die Tropfengrößenverteilung über mehrere Minuten eine hohe Konstanz aufweisen. Da mit dem verwendeten SMPS Rohgas und Reingas nicht parallel gemessen werden können, ist zur Bestimmung von Abscheideeffizienzen für jede Größenklasse ein stabiles Aerosol von grundlegender Wichtigkeit. Ferner sollen während der Abscheidegradbestimmung keine neuen Ölstrukturen auf den Filterfasern entstehen oder bereits gebildete Ölstrukturen verändert werden. Dazu ist neben einem konstanten Rohgasmassenstrom und einer möglichst (zeitlich) unveränderten Tropfengrößenverteilung auch eine geringe Tropfenkonzentration im Rohgas erforderlich. Durch die beschriebenen Maßnahmen im vorherigen Abschnitt (Kühlung des Zerstäubers, Absaugung eines Großteils des Aerosols aus dem Zerstäuber und Reduzierung der Steigröhrchen) kann die Ölkonzentration signifikant gesenkt werden. In Abbildung 2.12a sind die Anzahldichteverteilungen des Rohgases bei der Beladung der Wirrfaservliese (hohe Ölbeladungsrate) mit dem Rohgas bei der Bestimmung von Abscheidegraden (niedrige Ölbeladungsrate) verglichen. Auch bei diesen Versuchsreihen erfolgt eine direkte Aerosolführung durch die Filterkammer ohne eingebaute Faservliese.



(a) Anzahldichteverteilung bei hoher und niedriger Ölbeladungsrate.

(b) Anzahldichteverteilung bei niedriger Ölbeladungsrate und unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten.

Abbildung 2.12: Tropfengrößenverteilungen des Rohgases für die Bestimmung von Abscheidegraden. (a) Vergleich der Anzahlverteilungen zwischen hohen ($204 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) und niedrigen ($2,1 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) Ölbeladungsraten und (b) Vergleich der Anzahldichteverteilungen bei einer Ölbeladungsrate von $2,1 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ und Anströmgeschwindigkeiten von $10, 25$ und 40 cm s^{-1} ; nach Straube et al. [63].

Dabei ist die q_0 -Verteilung des Rohgases für die Beladung der Faservliese (Kurve mit schwarzen Quadraten bei einer Ölbeladungsrate von $204 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) bereits aus Abbildung 2.11b bekannt. Durch die signifikante Reduzierung der Temperatur des Zerstäubers im Wasserbad, zusammen mit dem veränderten Zerstäuberdruk und der Verwendung nur eines anstelle von drei Steigröhrchen im Zerstäuber, weist die q_0 -Verteilung des Rohgases für Abscheidegradmessungen (Ölbeladungsrate $2,1 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) einen erhöhten Feinanteil (Tropfen $< 100 \text{ nm}$) im Vergleich zum Rohgas für die Ölbeladung der Wirrfaserschichten auf. Dieser Feinanteil ist auf eine vermehrte Bildung von Satellitentropfen bei diesem Betriebszustand im Vergleich zu einer Ölbeladungsrate von $204 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ zurückzuführen [69, 70]. Die rechten Flanken beider Verteilungen sind hingegen sehr ähnlich in ihrem Verlauf.

In Abbildung 2.12b sind die q_0 -Verteilungen des Rohgases für Abscheidegradmessungen bei Filteranströmgeschwindigkeiten von $10, 25$ und 40 cm s^{-1} verglichen (bei konstanter Ölbeladungsrate). Wiederum erfolgt eine Durchströmung der Filterkammer ohne eingebautes Faservlies. Es ist zu erkennen, dass die q_0 -Verteilungen für unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten sehr ähnlich verlaufen. Abscheidegradmessungen bei unterschiedlichen Gasgeschwindigkeiten lassen sich demnach problemlos miteinander vergleichen. Der globale Modalwert der q_0 -Verteilung liegt bei ca. 230 nm . Die überwiegend für Tropfengrößen $< 100 \text{ nm}$ ausgeprägten Fehlerbalken in Abbildung 2.12b sind auf geringe Tropfenanzahlen in diesen Größenklassen zurückzuführen. Bei experimentellen Versuchen zur Bestimmung von Abscheidegraden wird die Tropfengrößenverteilung beim Durchströmen des Bypasses aufgezeichnet, um keinen zeitlichen Versatz zwischen Roh- und Reingasmessung aufgrund von Ein- bzw. Ausbau der Faservliese zu erhalten.

Mögliche Partikelverluste im Rohgas beim Durchströmen des Bypasses sind folglich bei der Bestimmung von Abscheidegraden zu berücksichtigen. Um diese Partikelverluste im Bypass zu quantifizieren, ist vorab eine Messreihe zur Bestimmung der Tröpfchenkonzentration beim Durchströmen des Bypasses und beim Durchströmen der Filterkammer ohne eingesetztes Wirtfaservlies notwendig.

Bei der späteren Bestimmung von Abscheidegraden, werden für jeden zu untersuchenden Betriebszustand insgesamt neun SMPS-Messungen aufgezeichnet (drei Rohgasmessungen gefolgt von drei Reingasmessungen und nochmals drei Rohgasmessungen, siehe Abschnitt 2.2.5). Für die Quantifizierung von Partikelverlusten im Bypass wird eine doppelte Messdauer im Vergleich zu Abscheidegradmessungen, also insgesamt 18 SMPS-Messungen, gewählt. Durch Abbildung der doppelten Messdauer sind neben möglichen Partikelverlusten im Bypass auch mögliche zeitliche Änderungen der Anzahlkonzentration identifizierbar. Die Ergebnisse zu diesen SMPS-Messreihen sind in Abbildung 2.13a dargestellt.

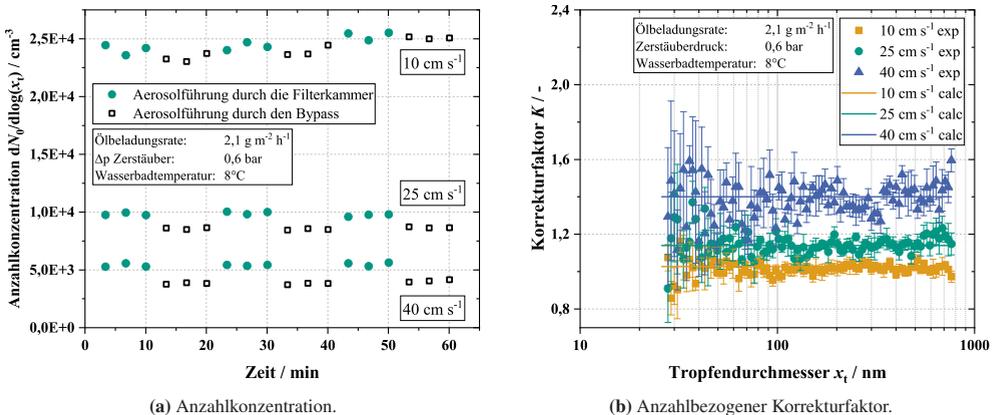


Abbildung 2.13: (a) Öltröpfchenkonzentration bei einer Aerosolführung durch die Filterkammer bzw. des Bypasses. (b) Experimentelle Daten (exp) zur Bestimmung eines Korrekturfaktors über alle Größenklassen zur Berechnung der Tropfenkonzentration im Rohgas beim Durchströmen des Bypasses. Lineare Ausgleichsgeraden (calc) kennzeichnen die gefundenen Korrekturfaktoren für Anströmgeschwindigkeiten von 10 cm s^{-1} (orange), 25 cm s^{-1} (grün) und 40 cm s^{-1} (blau); nach Straube et al. [63].

Bei Betrachtung der Öltröpfchenkonzentration (Abbildung 2.13a) ist zu erkennen, dass beim Durchströmen des Bypasses im Vergleich zur direkten Durchströmung der Filterkammer weniger Partikeln vom SMPS gemessen werden. Mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit sinkt die Anzahlkonzentration aufgrund zunehmender Verdünnung mit partikelfreier Druckluft. Zusätzlich werden bei relativer Betrachtung der Tropfenkonzentrationen mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit mehr Tröpfchen im Bypass abgeschieden. Eine geringere Anzahl von Tropfen beim Durchströmen des Bypasses im Vergleich zur direkten Durchströmung durch die

Filterkammer, lässt sich aufgrund der veränderten Aerosolführung zum, im und aus dem Bypass erklären. Bei der Einleitung in den Bypass erfolgt eine Umlenkung des Aerosols um 90° in einem Dreiwegehahn. Ein T-Stück leitet das Aerosol vom Bypass wiederum im 90° Winkel hinter der Filterkammer zurück. Sowohl der Dreiwegehahn als auch das T-Stück begünstigen eine Abscheidung von Partikeln > 100 nm durch Trägheit aufgrund von Strömungsumlenkungen. Des Weiteren verlängert sich die zurückgelegte Strecke der Tröpfchen beim Durchströmen des Bypasses im Vergleich zur geradlinigen Durchströmung durch die Filterkammer. Dies führt dazu, dass Partikeln, insbesondere mit einem Durchmesser < 100 nm (im Bereich der Diffusionsabscheidung), bevorzugt an den Wänden der Rohr- und Schlauchleitungen im Bypass abgeschieden werden [71]. Um Fraktionsabscheidegrade aus den gemessenen Tropfengrößenverteilungen im Rohgas durch den Bypass und dem Reingas beim Durchströmen der Filterkammer mit eingesetzten Wirrfaserschichten bestimmen zu können, muss die Tropfenkonzentration je Größenklasse durch den Bypass korrigiert werden.

Für die Bestimmung eines Korrekturfaktors K wird die Tropfenkonzentration je Größenklasse für den Fall der direkten Durchströmung der Filterkammer $N_{0,FK}(x_i)$ ohne eingebaute Faservliese, durch die Tropfenkonzentration je Größenklasse beim Durchströmen des Bypasses $N_{0,BP}(x_i)$ dividiert (Formel 2.2).

$$K = \frac{N_{0,FK}(x_i)}{N_{0,BP}(x_i)} \quad (2.2)$$

Abbildung 2.13b zeigt auf, dass sich die Tropfenkonzentration im Rohgas beim Durchströmen des Bypasses über nahezu alle Größenklassen mit einem annähernd konstanten Faktor korrigieren lässt. Die ansteigenden Fehlerbalken in den Größenklassen kleiner 100 nm resultieren aus einer geringen Partikelanzahl pro Klasse. Dies ist mit steigender Anströmgeschwindigkeit aufgrund einer weiter sinkenden Anzahlkonzentration noch deutlicher zu beobachten. Zur Bestimmung von Korrekturfaktoren, um Partikelverluste beim Durchströmen des Bypasses auszugleichen, wird der Mittelwert aller Gesamtanzahlkonzentrationen beim Durchströmen der Filterkammer durch die Gesamtanzahlkonzentrationen beim Durchströmen des Bypasses geteilt. Lineare Ausgleichsgeraden für Filteranströmgeschwindigkeiten von 10, 25 und 40 cm s^{-1} in Abbildung 2.13b kennzeichnen diese ermittelten Korrekturfaktoren. Für eine Anströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} lässt sich ein Korrekturfaktor von $K = 1,03$ (orange), für 25 cm s^{-1} ein Faktor von $K = 1,14$ (grün) und bei 40 cm s^{-1} ein Faktor von $K = 1,40$ (blau) bestimmen. Es kann festgehalten werden, dass mit steigender Anströmgeschwindigkeit, aufgrund steigender Abscheidung im Bypass über alle Größenklassen, auch der Korrekturfaktor ansteigt.

Bei Betrachtung von Abbildung 2.13a zeigt sich bei einer Anströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} zudem eine leichte und kontinuierliche Zunahme der Tropfenkonzentration mit zunehmender

Messdauer. Eine kontinuierliche Zu- oder Abnahme der Tröpfchenkonzentration kann auf geringfügige Änderungen der Öltemperatur (wenige °C) im temperierten Zerstäuber zurückgeführt werden. Es ist denkbar, dass mit einsetzender Zerstäubung des Öls minimale Temperaturunterschiede durch die eingeblasene Druckluft im Zerstäuber zu Temperaturgradienten im Öl führt. Folglich steigt (Öl wird wärmer) oder sinkt (Öl kühlt ab) die Tropfenkonzentration langsam bis zum Erreichen eines stabilen Temperaturgleichgewichts im Zerstäuber. Um Fehler bei der Bestimmung von Fraktionsabscheidegraden aufgrund von zeitlich steigenden oder fallenden Tröpfchenkonzentration zu minimieren, wird das Rohgas dreifach vor und zusätzlich dreifach nach den Messungen des Reingases (ebenfalls drei aufeinander folgende Messungen) aufgezeichnet. Für jede Abscheidegradmessung erfolgen demnach neun SMPS-Messungen. Es ist zu beachten, dass nur kontinuierlich steigende oder fallende Konzentrationsänderungen durch diese Methodik ausgeglichen werden können. Fluktuationen der Tropfenkonzentration im Rohgas zwischen einzelnen SMPS-Messungen sind mit dieser Methode nicht zu korrigieren, konnten im Rahmen dieser Arbeit jedoch auch nicht beobachtet werden.

Für die Berechnung von Fraktionsabscheidegraden $T(x_t)$ sind die drei Messungen des Reingases zu $\bar{N}_{0,\text{Rein}}(x_t)$ zu mitteln und durch den Durchschnitt aller Messungen des Rohgases $\bar{N}_{0,\text{Roh}}(x_t)$ gemäß Gleichung 2.3 zu teilen.

$$T(x_t) = 1 - \frac{\bar{N}_{0,\text{Rein}}(x_t)}{\bar{N}_{0,\text{Roh}}(x_t) \cdot K} \quad (2.3)$$

Analog lässt sich der anzahlbezogene Gesamtabscheidegrad E_0 bestimmen. Hierfür wird die Summe der Tropfenkonzentrationen über alle vom SMPS aufgezeichneten Größenklassen für das Roh- und Reingas gebildet (Formel 2.4).

$$E_0 = 1 - \frac{\sum \bar{N}_{0,\text{Rein}}(x_t)}{\sum \bar{N}_{0,\text{Roh}}(x_t) \cdot K} \quad (2.4)$$

Die Korrektur der Tropfenkonzentration im Rohgas ist nur zulässig, wenn die SMPS-Messungen ohne Unterbrechung und mit gleichem zeitlichem Abstand hintereinander durchgeführt werden. Es sind immer gleich viele SMPS-Messungen für die Reingasbestimmung sowie für die Rohgasbestimmungen vor und nach der Reingasbestimmung durchzuführen. In dieser Arbeit werden ausschließlich Messreihen mit je drei Messpunkten für Rohgas, Reingas und wieder Rohgas betrachtet (neun SMPS-Messungen mit einer Gesamtdauer von etwa 30 min). Durch die Korrektur der Tropfenkonzentration beim Durchströmen des Bypasses, lassen sich Abscheidegrade

an den unbeladenen und beladenen dünnen Wirrfaserschichten wiederholbar und korrekt bestimmen. Die genaue Vorgehensweise zur Bestimmung von Abscheidegraden wird im folgenden Abschnitt 2.2.5 vorgestellt.

2.2.5 Versuchsdurchführung für Abscheidegradmessungen an dünnen Wirrfaserschichten

Abscheidegradmessungen (Fraktions- und Gesamtabscheidegrade) werden in dieser Arbeit für Anströmgeschwindigkeiten von 10, 25 und 40 cm s⁻¹ sowie globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0$ (unbeladene oleophile Faservliese) bis zu $S_{\text{global}} = 0,80$ untersucht. Für die Bestimmung der globalen Sättigung (Formel 2.5) werden die Faserschichten vor und nach jedem Versuch gewogen.

$$S_{\text{global}} = \frac{\Delta m_{\text{Öl}}}{\rho_{\text{Öl}} A_{\text{WFS}} d_{\text{WFS}} \Phi_{\text{global}}} \quad (2.5)$$

Hierbei entspricht $\Delta m_{\text{Öl}}$ der Masse an abgeschiedenem Öl auf dem Faservlies, $\rho_{\text{Öl}}$ der Dichte des Öls, A_{WFS} der Anströmfläche der Wirrfaserschicht, d_{WFS} der Dicke der Faserschicht und Φ_{global} der globalen Porosität der Wirrfaserschicht (vgl. Formel 2.1).

Abbildung 2.14 gibt einen schematischen Überblick über die experimentelle Vorgehensweise zur Bestimmung von Abscheidegraden an den dünnen Wirrfaservliesen mit steigender globaler Sättigung.

Vor der Durchführung von Abscheidegradmessungen an den Faserschichten werden diese in einem Isopropanolbad vorkonditioniert (ausgewaschen). Durch ein Auswaschen der Wirrfaseranordnungen in Isopropanol werden mögliche Ladungen auf Fasern neutralisiert [72]. Die Vorkonditionierung der dünnen Wirrfaserschichten wird ausführlich in Abschnitt 4.1 behandelt.

Im Anschluss an das Konditionieren der dünnen Wirrfaseranordnungen im Isopropanolbad können maximal bis zu zehn einzelne Faserschichten in der verwendeten Filterkammer in Reihe geschaltet werden. Bei einer Ölbeladungsrate von 2,1 g m⁻² h⁻¹ (Wasserbadtemperatur 8°C, Differenzdruck über dem Zerstäuber (ein Steigröhrchen) 0,6 bar und Absaugung des Großteils des Volumenstroms aus dem Zerstäuber) folgen SMPS-Messungen bei der niedrigsten Filteranströmgeschwindigkeit von 10 cm s⁻¹, (je drei Messungen des Rohgases vor und nach drei aufeinander folgenden Reingasmessungen). Im Anschluss wird die Anströmgeschwindigkeit der Wirrfaseranordnungen auf 25 cm s⁻¹ erhöht. Wiederum folgen SMPS-Messungen des Roh- und Reingases, bevor die Filteranströmgeschwindigkeit ein letztes Mal auf 40 cm s⁻¹ gesteigert wird. Nach

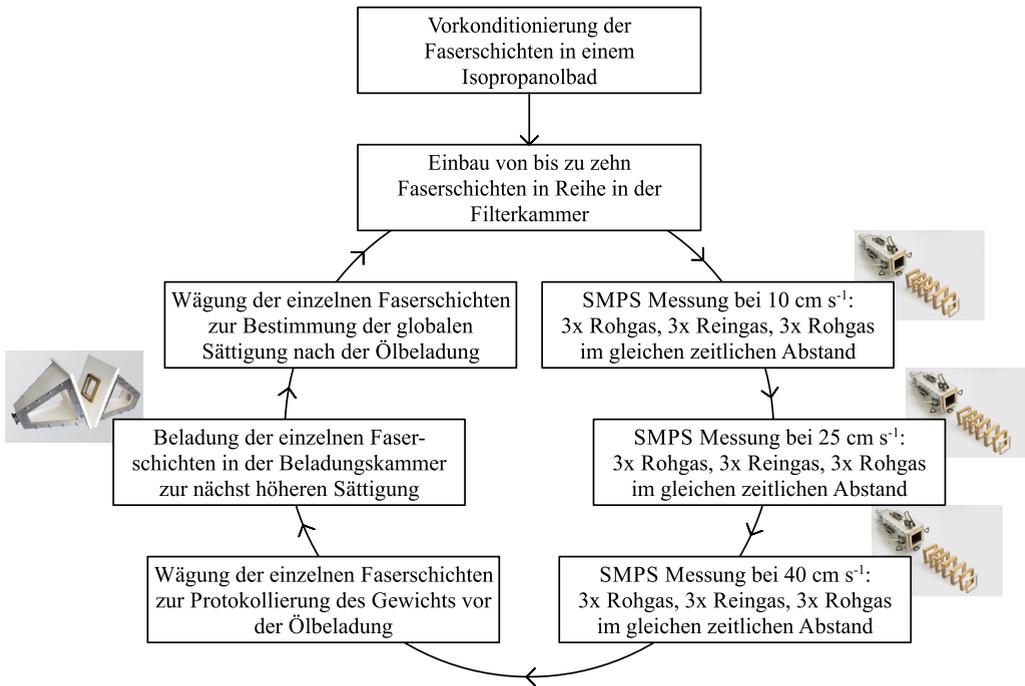


Abbildung 2.14: Schematischer Überblick über die experimentelle Vorgehensweise zur Bestimmung von Abscheidegraden; nach Straube et al. [63].

den Messreihen bei Anströmgeschwindigkeiten von 10 und 25 cm s^{-1} bleiben die Wirrfaserschichten in der Filterkammer verbaut und werden nicht demontiert oder gewogen. Erst nach Ende der Messreihe bei einer Filteranströmgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} werden die Faserschichten einzeln ausgebaut und gewogen, um etwaige Gewichtszunahmen zu protokollieren. Es sei erwähnt, dass bei der erzielten, sehr geringen Ölbeladungsrate von 2,1 $\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ während den Abscheidegradmessungen (Gesamtbeladungsdauer für alle drei Gasgeschwindigkeiten ca. 30 min) keine nennenswerten Gewichtszunahmen der Wirrfaserschichten beobachtet wurden. Gewichtsänderungen konnten nur im Bereich der Messungenauigkeit der Waage festgestellt werden ($\pm 1 \text{ mg}$).

Nach der Wägung der individuellen Faserschichten werden diese einzeln in der Beladungskammer auf einen höheren Sättigungszustand beladen. Hierfür wird die Ölbeladungsrate auf 204 $\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ erhöht (Wasserbadtemperatur 22°C, Differenzdruck über dem Zerstäuber 0,5 bar und drei Steigröhrchen). Im Anschluss an die Beladung wird jedes Faservlies zur Kontrolle erneut gewogen. Sobald alle Faserschichten einen höheren Sättigungszustand erreicht haben, werden diese wieder in gleicher Reihenfolge in die Filterkammer eingebaut. Anschließend wird der

Messzyklus unter Verwendung des SMPS für alle zu untersuchenden Filteranströmgeschwindigkeiten erneut gestartet.

Sind Messungen bei der höchsten zu untersuchenden globalen Sättigung ($S_{\text{global}} = 0,80$) durchgeführt, werden die einzelnen Wirrfaservliese in bereitgestellten Isopropanolbädern vorsichtig ausgewaschen. Hierfür stehen mehrere Isopropanolbäder zur Verfügung und die Faserschichten werden sukzessive in Gefäße mit weniger Ölverunreinigungen weitergereicht. Zuletzt werden die Faserschichten in einem nicht mit Öl kontaminierten Bad von letzten Ölresten befreit. Es kann dabei nicht ausgeschlossen werden, dass kleine Ölstrukturen auf den Fasern oder an Faserkreuzungen verbleiben. Ein möglicher Einfluss dieser Rückstände auf das Abscheideverhalten war im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht zu beobachten.

Zusätzlich wurden Aufnahmen mit einem Laser-Scanning-Mikroskop (LSM) von einem Wirrfaservlies vor und nach einem Auswaschvorgang in Isopropanol aufgenommen, um Strukturänderungen auf mikroskopischer Ebene identifizieren zu können. Das LSM eignet sich für einen zerstörungsfreien Vergleich von Wirrfaseranordnungen vor und nach einem Auswaschvorgang, da die Wirrfaserschichten für die Untersuchung am LSM im Vergleich zum μ -CT nicht zerschnitten werden müssen. Das verwendete LSM (VK-X 100K, Keyence Corporation, Osaka, Japan) bietet die Möglichkeit hochauflösende, dreidimensionale Oberflächeninformationen einer Probe in wenigen Minuten zu gewinnen. Quantitative Vergleiche von beispielsweise Ölstrukturen sind hingegen mit diesem Mikroskop nicht möglich. Für detaillierte Informationen über den Aufbau und die Funktionsweise des verwendeten LSMs sei auf den Anhang A.1 verwiesen.

In Abbildung 2.15 ist ein vorkonditioniertes Faservlies vor und nach dem Auswaschen in einem Isopropanolbad und anschließender Trocknung mit einem Heißluftfön dargestellt. Die gezeigten Aufnahmen sind mit Hilfe des $20\times$ Objektivs aus dem Objektivrevolver des LSMs angefertigt.

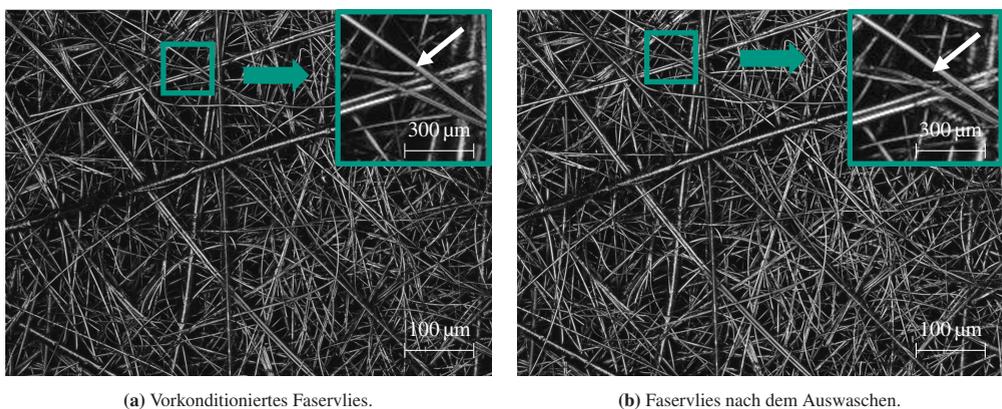


Abbildung 2.15: LSM-Aufnahmen eines Wirrfaservlieses (a) im vorkonditionierten Zustand vor und (b) nach einem Auswaschvorgang in Isopropanol. Die Aufnahmen wurden mit einem $20\times$ Objektiv angefertigt.

Es sind in Abbildung 2.15a im Vergleich zu Abbildung 2.15b nur minimale strukturelle Unterschiede ersichtlich. Im grün markierten Bereich lässt sich eine Faser beobachten, welche sich vor dem Auswaschen oberhalb einer weiteren Faser und nach dem Auswaschen unterhalb dieser Faser befindet (siehe weißer Pfeil). Andere markante Faserstrukturen, wie Faserkreuzungen von Fasern mit dickeren Faserdurchmessern, lassen sich auf beiden Abbildungen ohne augenscheinliche strukturelle Veränderung identifizieren. Ein Auswaschen von einzelnen Fasern an dieser untersuchten Wirrfaseranordnung lässt sich nicht erkennen. Es ist somit festzuhalten, dass der Auswaschprozess der Wirrfaseranordnungen keinen signifikanten Einfluss auf die Faseranordnungen nimmt. Folglich sind Abscheidegrade vor und nach einem Einlegen und Auswaschen der Wirrfaservliese, ohne eine Rücksichtnahme auf strukturelle Änderungen durch die Isopropanolbäder problemlos vergleichbar.

2.3 Mikro-Computertomographie ¹

Der Einsatz eines Mikro-Computertomographen (μ -CT) ermöglicht eine zerstörungsfreie und dreidimensionale Strukturanalyse einer Probe. Im Vergleich zu zweidimensionalen Abbildungsmethoden, wie z.B. der Rasterelektronenmikroskopie (REM), ist bei der Verwendung eines μ -CTs kein Hochvakuum notwendig und die eingetragene Energie auf die Probe ist wesentlich geringer. Flüssige Proben oder Probenbestandteile können beispielsweise nicht oder nur sehr begrenzt unter erheblichem technischem Aufwand (z.B. Environmental-Scanning-Electron-Microscope) mit Elektronenmikroskopen untersucht werden, da flüssige Bestandteile bei zu hohen Temperaturen oder zu niedrigen Drücken verdunsten können. Aus diesen Gründen wurde in dieser Arbeit auf ein μ -CT zurückgegriffen.

Abschnitt 2.3.1 widmet sich dem Aufbau und der Funktionsweise eines μ -CTs. In Abschnitt 2.3.2 wird die Präparation einer Wirrfaserprobe für die Untersuchung am μ -CT beschrieben, in Abschnitt 2.3.3 die Durchführung der μ -CT Messungen und in Abschnitt 2.3.4 die Segmentierung der rekonstruierten Aufnahmen.

¹ Teile dieses Abschnitts sind in Straube et al. [34] publiziert

2.3.1 Aufbau und Funktion

Bei der Mikro-Computertomographie wird die Transmission von Röntgenstrahlen durch eine Probe detektiert. Abhängig von der Ordnungszahl und der Dicke der untersuchten Materialien werden Photonen entweder vollständig absorbiert (Photoelektrischer Effekt) oder verlieren an Energie (Compton-Effekt) [73]. Materialien höherer Ordnungszahl reduzieren die Röntgenstrahlung stärker als Materialien mit niedrigerer Ordnungszahl. Mikro-Computertomographen mit zweistufiger Vergrößerung (geometrisch und optisch) werden Röntgenmikroskope genannt. In Abbildung 2.16 ist das Funktionsprinzip eines Röntgenmikroskops, wie es in dieser Arbeit zum Einsatz kommt, schematisch dargestellt.

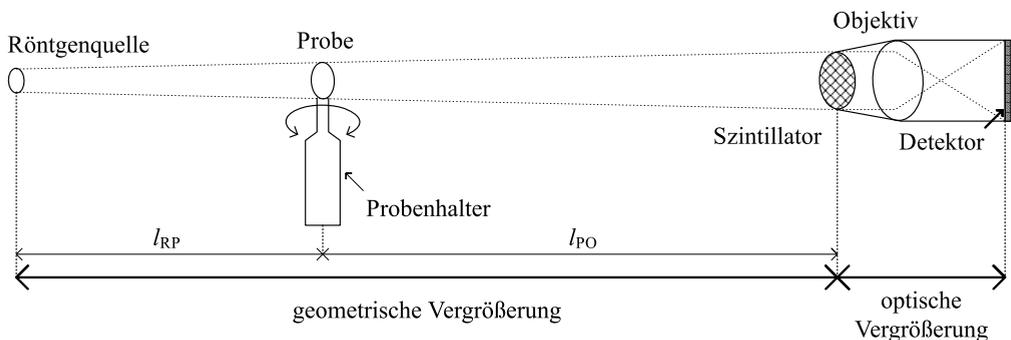


Abbildung 2.16: Funktionsprinzip eines Mikro-Computertomographen mit zweistufiger Vergrößerung.

Röntgenstrahlung wird beim Durchgang durch die Probe material- und dickenabhängig abgeschwächt. Ein Szintillator wandelt die abgeschwächte Röntgenstrahlung (Wellenlänge üblicherweise < 10 nm) in sichtbares Licht um. Nach dem Objektiv folgt ein Detektor, welcher das einfallende Licht verarbeitet. Die Probe dreht sich während einer Messung um 360° , sodass 2D Röntgentransmissionsbilder (Projektionen) aus diversen Drehwinkeln aufgenommen werden. Der Detektor befindet sich auf derselben Ebene wie die Röntgenquelle. Röntgenmikroskope verfügen über zwei Möglichkeiten der Vergrößerung. Über den Strahlensatz kann eine geometrische Vergrößerung über folgenden Zusammenhang erreicht werden:

$$\text{geom. Vergrößerung} = \frac{l_{RP} + l_{PO}}{l_{RP}} \quad (2.6)$$

Demnach steigt die geometrische Vergrößerung bei einer Verkürzung der Länge l_{RP} zwischen Röntgenquelle und Probe oder einer Vergrößerung der Strecke l_{PO} zwischen Probe und Objektiv.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit einer optischen Vergrößerung durch den Einsatz von unterschiedlichen Objektiven.

In dieser Arbeit kommt ein Röntgenmikroskop (ZEISS Xradia 520 Versa, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Oberkochen) mit vier unterschiedlichen Objektiven (0,4, 4, 20 und 40 \times), angebracht an einem Objektivrevolver, zum Einsatz. Die maximale theoretische Auflösung beträgt in etwa 700 nm, bei einer minimalen Voxelgröße von 70 nm. Je nach Beschaffenheit der Probe sind Objekte ab einer Größe von ca. 10 Voxel aufzulösen [34].

Abbildung 2.17 zeigt eine Fotografie des verwendeten μ -CTs.

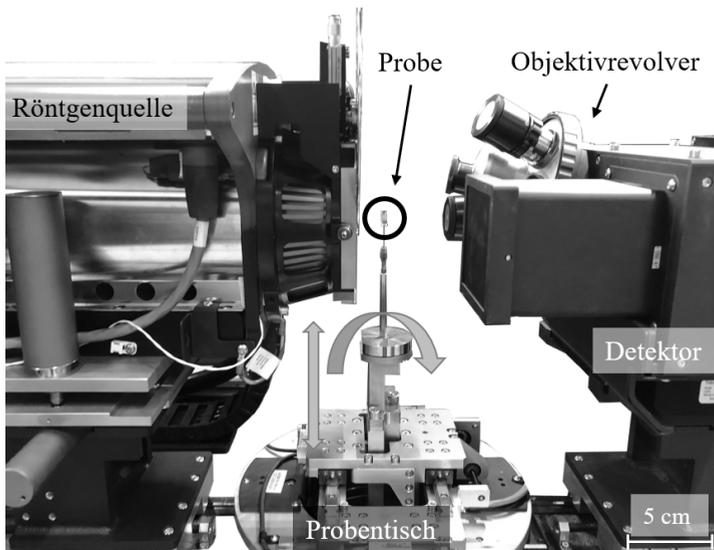


Abbildung 2.17: Fotografie des verwendeten Mikro-Computertomographen; nach Straube et al. [34].

Die Röntgenquelle befindet sich auf der linken Seite des Versuchsaufbaus. Zwischen Quelle und Detektor ist der Probenstisch angebracht. Auf diesem Probenstisch ist die zu untersuchende Probe auf einer Probenhalterung fixiert. Der Probenstisch lässt sich axial und vertikal verschieben, um die Probe bei der Aufnahme richtig zu positionieren. Während der Messung rotiert dieser zusätzlich um die eigene Achse. Die abgeschwächte Röntgenstrahlung gelangt über ein Objektiv weiter zum Detektor.

2.3.2 Probenvorbereitung

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt ausschließlich die Untersuchung von oleophilen ölbeladenen Wirrfaseranordnungen. Abgeschiedene Ölstrukturen sowie Filterfasern mit einer Größe von wenigen Mikrometern sind nahe an der unteren Auflösungsgrenze des μ -CTs. Für eine angestrebte, geringe und realistische Voxelgröße von etwa 200 nm, darf die Probe daher eine horizontale Ausdehnung von 10 mm nicht überschreiten, um Röntgenquelle und Detektor für eine maximale Auflösung so nah wie möglich an der Probe zu positionieren. Die verwendeten Wirrfaserschichten mit einer geringen Dicke (ca. 160 μ m), aber einer Kantenlänge von ca. 7 cm \times 7 cm müssen hierfür zugeschnitten und präpariert werden. In Abbildung 2.18 ist ein präparierter Probenausschnitt für die Untersuchung am μ -CT dargestellt. Es werden für diesen Zweck Wirrfaserproben, in etwa in der Mitte der Wirrfaserschicht, mit Hilfe von Pinzetten und einer Schere ausgeschnitten. Diese Ausschnitte werden im weiteren Verlauf als **Probenausschnitte** bezeichnet.

Die weitmaschige Stützstruktur auf der Abströmseite der Faserschichten wird hierfür beim Ausschneiden des Probenausschnitts ohne Beschädigung des Faservlieses abgetrennt. Die Messzeit einer hochauflösenden Aufnahme beträgt je nach Anzahl der Projektionen bis zu 20 h. In dieser Zeit darf sich die Probe nicht verschieben oder ausdehnen, da der Scan infolge von minimaler Bewegung der Probe bereits unbrauchbar wird und verworfen werden muss. Für eine möglichst hohe Auflösung und gleichzeitig der Möglichkeit mehrere, nicht überlappende Aufnahmen von einem Probenausschnitt anfertigen zu können, ist die Größe der Probenausschnitte für alle untersuchten Wirrfaserschichten zu

ca. 10 mm \times 6 mm (Höhe \times Breite) gewählt worden. Um einen Kontakt mit abgeschiedenen Ölstrukturen beim Präparieren der Probenausschnitte durch die eingesetzten Pinzetten zu vermeiden, werden die Ausschnitte in einem ersten Schritt auf eine Breite von etwa 10 mm zugeschnitten und erst im weiteren Verlauf auf ca. 6 mm eingekürzt. Durch das Entfernen der Stützstruktur auf der Abströmseite der Wirrfaserschichten ist die Stabilität der Probenausschnitte stark reduziert. Aus diesem Grund werden die Probenausschnitte für die Untersuchungen am μ -CT mit einem Stützmaterial verstärkt. Zu diesem Zweck kommen Polyimid-Ronden (Kapton[®], Xenocs

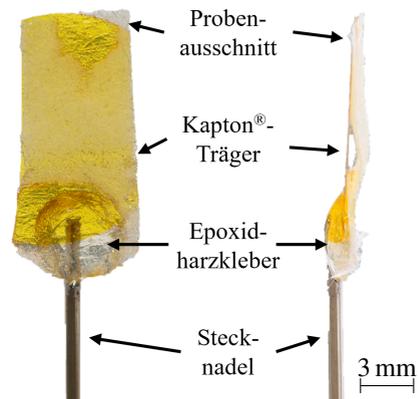


Abbildung 2.18: Präparierter Probenausschnitt für die Untersuchung am μ -CT.

SAS, Grenoble, Frankreich) mit einem Durchmesser von 7 mm und einer Dicke von 50 μm zum Einsatz. Polyimid-Träger sind für Röntgenstrahlen nahezu transparent und werden häufig als Trägermaterial für $\mu\text{-CT}$ Aufnahmen verwendet [74, 75]. Mit Hilfe eines Epoxidharzklebstoffs (UHU Plus Schnellfest, UHU GmbH & Co. KG, Bühl) erfolgt eine Fixierung der Ober- und Unterseite der Probenausschnitte mit dem Trägermaterial (Kapton[®] ist an der gelblichen Färbung in Abbildung 2.18 zu erkennen). Die sorgsame Präparierung der Probe wird zeitnah nach der Beladung mit Öl durchgeführt. Die Probenausschnitte werden zwischen Ausbau und Präparation nicht auf Oberflächen abgelegt und es werden ausschließlich Randbereiche der ausgeschnittenen Probe mit Pinzetten berührt, um eine Veränderung der abgeschiedenen Ölmorphologie während dieser Phase auf ein Minimum zu reduzieren. Dabei wird die Abströmseite der Probenausschnitte mit den Kapton[®]-Ronden verklebt. Anschließend wird das Kapton[®] mit einer Stecknadel, ebenfalls mit Hilfe des Epoxidharzklebstoffs, fest verbunden. Diese Stecknadel kann bei der späteren $\mu\text{-CT}$ Messung simpel am Probenhalter eingespannt werden. In einem letzten Schritt wird der Filterausschnitt und die Kapton[®]-Ronde auf eine Breite von ca. 6 mm zugeschnitten, um bei der Messung am $\mu\text{-CT}$ den Abstand zwischen Röntgenquelle und Detektor so gering wie möglich zu halten. Herstellungsbedingt zeigen die Probenausschnitte leichte Wölbungen zwischen den Stegen der weitmaschigen PP-Stützstruktur auf (siehe Abbildung 2.18 rechts). Diese Wölbungen können bei $\mu\text{-CT}$ Aufnahmen ausgenutzt werden, da diese Positionen nicht in Kontakt mit dem Kapton[®] stehen und somit ausschließlich das Wirrfaservlies ohne eine weitere Phase (in diesem Fall Kapton[®]) auf hochauflösenden Aufnahmen abgebildet werden kann. Durch $\mu\text{-CT}$ Aufnahmen von Bereichen, welche nicht in Kontakt mit Kapton[®] stehen, kann folglich eine mögliche und nachträgliche Veränderung der abgeschiedenen Ölmorphologie während der Probenvorbereitung durch das Entfernen der PP-Stützstruktur oder das Ankleben des Trägermaterials (Kapton[®]) ausgeschlossen werden.

2.3.3 Durchführung von $\mu\text{-CT}$ Messungen

Für Messungen am $\mu\text{-CT}$ bedarf es einer Vorlaufzeit für die Beladung der Wirrfaserschichten und der Probenvorbereitung. Es wurde daher versucht, mit möglichst wenig Messzeit am Röntgenmikroskop eine maximale Menge an verwertbaren Daten zu generieren. Daten können nicht verwertet werden, wenn sich beispielsweise die Probe während einer $\mu\text{-CT}$ Aufnahme minimal bewegt oder es zu einem Ausfall der Röntgenquelle kommt. Weiterhin muss vor jeder hochauflösenden Aufnahme sichergestellt werden, dass sich der zu untersuchende Probenausschnitt zentral im FOV befindet. Der FOV von hochauflösenden $\mu\text{-CT}$ Aufnahmen, wie er für diese Arbeit benötigt wird, liegt bei etwa $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$. Um abstehende Fasern auf der Anströmseite bzw. Abströmseite der Wirrfaserschichten auflösen zu können, muss sich das Faservlies (Dicke

der dicht gepackten Faserschicht ca. $160\ \mu\text{m}$) möglichst zentral im FOV befinden. Aufnahmen mit nur teilweise abgebildeten Bereichen des Probenausschnitts (z.B. fehlende Information in Durchströmungsrichtung) sind im weiteren Verlauf nicht analysierbar und müssen verworfen werden. In diesem Kontext ist auch die vertikale Ausrichtung des Probenausschnitts entscheidend für die spätere Qualität des $\mu\text{-CT}$ Scans. Ist der Probenausschnitt schief auf der Stecknadel befestigt, sind zwangsläufig Bereiche der Wirrfaserschichten nicht auf dem Scan abzubilden, da große Teile der Strukturinformationen auf der Anström- und Abströmseite verloren gehen.

Um der Problematik eines schlecht justierten Probenausschnitts bei einem hochauflösenden Scan entgegenzuwirken, wird in einem ersten Schritt für jeden Probenausschnitt ein Übersichtsscan aufgenommen. Diese Übersichtsscans erlauben eine exakte Festlegung der Positionen von nachfolgenden hochauflösenden Aufnahmen. Übersichtsscans werden in dieser Arbeit bei einer Beschleunigungsspannung von $80\ \text{kV}$, einer Leistung der Röntgenquelle von $7\ \text{W}$ und dem $4\times$ Objektiv durchgeführt. Die Belichtungszeit für diese Aufnahmen beträgt in der Regel $0,5\ \text{s}$ bei 501 Projektionen, woraus sich eine Messdauer von ca. $30\ \text{min}$ ergibt. In Abbildung 2.19 ist ein exemplarischer Übersichtsscan (Probenausschnitt G) dargestellt. Für weiterführende Informationen zu den angefertigten Probenausschnitten sei auf Abschnitt 3.1 verwiesen.

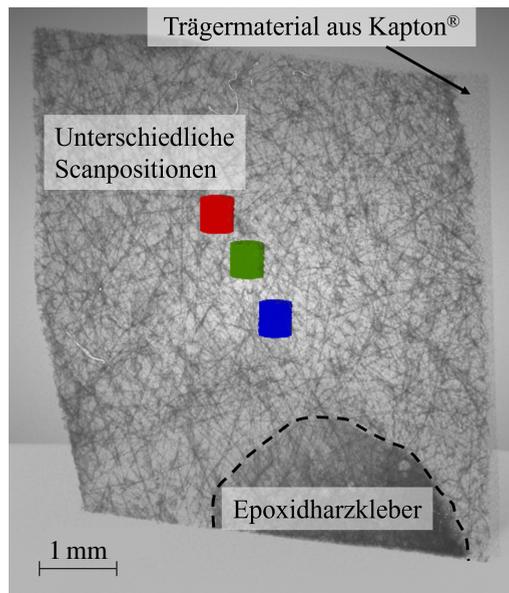


Abbildung 2.19: Übersichtsscan eines Probenausschnitts (Probenausschnitt G, siehe Abschnitt 3.1) aus einer Wirrfaserschicht; nach Straube et al. [68].

Im Hintergrund von Abbildung 2.19 ist das Kapton[®] Trägermaterial zu erkennen sowie am unteren Bildrand eine Klebestelle des verwendeten Epoxidharzklebers. Die Größe des Übersichtsscans entspricht in etwa $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$. Mit Hilfe dieser Aufnahme können die Positionen von hochauflösenden μ -CT Scans exakt festgelegt werden. Die Positionen werden für alle durchgeführten Scans subjektiv und nicht überlappend in etwa im Zentrum des Übersichtsscans gewählt. Für den vorgestellten Probenausschnitt in Abbildung 2.19 (Probenausschnitt G), sind die hochauflösenden Aufnahmen exemplarisch farblich (rot, grün und blau) markiert. Aufgrund der zu geringen Auflösung der Übersichtsscans sind Ölstrukturen in diesen Aufnahmen nicht oder nur kaum zu erkennen.

Nach jedem Übersichtsscan folgt ein Warm-up Scan. Warm-up Scans werden in der Regel bei einer reduzierten Anzahl an Projektionen (< 2001) und reduzierter Belichtungszeit (4,5 - 7 s) im Vergleich zu hochauflösenden Scans (mindestens 2001 Projektionen und Belichtungszeiten > 20 s) aufgenommen. Bei dem in dieser Arbeit verwendeten μ -CT ist eine Anzahl an Projektionen endend auf den Wert 1 gerätespezifisch für 360° Aufnahmen einer Probe. Warm-up und hochauflösende Scans werden mit dem $40\times$ Objektiv bei einer Beschleunigungsspannung von 50 kV und einer Leistung der Röntgenquelle von 4 W durchgeführt. Durch Warm-up Scans wird eine thermische Ausdehnung der Probe während eines hochauflösenden Scans verhindert. Dabei wird der Warm-up Scan bei einem Binning 2 (Binning: Zusammenfassen von benachbarten Voxel) durchgeführt, wohingegen die höchste Auflösung bei einem Binning von 1 zu erzielen ist. Bei einem Binning 2 wird eine 2×2 Voxelmatrix (jeweils zwei Voxel breit, hoch und tief) zu einem Voxel zusammengefasst [76]. Dadurch verdoppelt sich die Voxelgröße bei einer gleichzeitigen Reduzierung der Messdauer um den Faktor 4. Die Messdauer für Warm-up Scans beläuft sich auf ca. 2,5 - 5 h. Eine Verdopplung der Voxelgröße führt zu einer reduzierten, maximalen Auflösung (Faktor 2). Aus diesem Grund werden hauptsächlich Aufnahmen mit einem Binning 1 für Detailanalysen von abgeschiedenen Ölstrukturen verwendet (Messdauer bis zu 20 h).

Im Anschluss an den Warm-up Scan werden, je nach Verfügbarkeit des Röntgenmikroskops, mehrere hochauflösende Scans (Binning 1 oder Binning 2) durchgeführt. Bei mehreren Aufnahmen pro Probenausschnitt, werden diese an unterschiedlichen, nicht überlappenden Positionen aufgenommen (siehe exemplarisch in Abbildung 2.19).

Die aufgenommenen Projektionen werden vom μ -CT zu 16 bit 2D Graustufenschnittbildern rekonstruiert, welche sich am Ende jeder Messung als gestapeltes Paket an Dateien im Tagged Image File Format (TIFF) exportieren lassen. Jedes Schnittbild entspricht einem horizontalen Schnitt durch den gesamten Scan mit einer Dicke von einem Voxel. Abhängig von der Ordnungszahl und Materialdicke wird ein Graustufenwert für jedes Voxel ausgewählt. Verschiedene

Materialien einer Probe können somit unterschieden werden. Das gestapelte Datenpaket beinhaltet demnach die 3D Information eines jeden Scans und kann mit geeigneter Software (z.B. Dragonfly[®], siehe nachfolgendes Kapitel) verarbeitet und segmentiert werden. [77]

2.3.4 Segmentierung von rekonstruierten Aufnahmen

Die Segmentierung eines μ -CT Scans ist der entscheidende Schritt, um unterschiedliche Materialien einer Probe differenzieren und analysieren zu können. Unterscheiden sich die Stoffe oder Materialien einer Probe maßgeblich in der Ordnungszahl und es ist ein eindeutiger Kontrast zwischen den unterschiedlichen Phasen auf den Graustufenschnittbildern zu erkennen, kann die Segmentierung über einen einfachen Schwellenwert erfolgen. In der Regel erfolgt dabei die Festlegung eines Graustufen-Schwellenwerts. Ausgehend von diesem Schwellenwert wird jedes Voxel binarisiert. [78, 79, 80]

Aufgrund des geringen Kontrastes zwischen Öl und den in den Faservliesen verwendeten PET-Fasern, ist eine Segmentierung über einen Schwellenwert nicht möglich. Aus diesem Grund wird bei der Segmentierung der μ -CT Scans in dieser Arbeit auf ein Programm basierend auf künstlicher Intelligenz (KI) zurückgegriffen. Hierfür wird ein Deep Learning Tool der Software Dragonfly[®] (Object Research Systems (ORS) Inc., Montreal, Kanada) verwendet. Es werden die Versionen 2021.2, 2021.3 und 2022.2 der Software eingesetzt. Das verwendete Deep Learning Tool arbeitet mit einem künstlichen neuronalen Netz (KNN), mit dessen Hilfe sich mehrere Klassen (unterschiedliche Materialien) segmentieren lassen. Die Segmentierungen dieser Arbeit sind mit der *U-Net* Architektur von Ronneberger et al. [81] angefertigt worden, welche für die Segmentierung medizinischer Bilder entwickelt wurde. Für weiterführende Informationen über die Funktionsweise der *U-Net* Architektur sei auf die Arbeit von Ronneberger et al. [81] verwiesen. Für diese Art der Segmentierung müssen für jeden Datensatz (also jede μ -CT Aufnahme) Trainingsdaten für die KI zur Verfügung gestellt werden. Im Kontext dieser Arbeit müssen auf den 2D Graustufenbildern die unterschiedlichen Klassen Luft, Mikroglasfasern, PET-Fasern und Öl manuell in *Regions of Interest* (ROIs) markiert werden. Im Anschluss wird das KNN mit Hilfe dieser Datensätze trainiert. Je mehr Trainingsdatensätze verfügbar sind, desto höher ist die Qualität der späteren Segmentierung durch weniger falsch klassifizierte Voxel. Besonderer Fokus ist dabei auf die Unterscheidung zwischen PET-Fasern und Öl zu legen, da sich diese Materialien kaum in ihrem Grauwert unterscheiden. Durch Spiegeln und Drehen der manuell bereitgestellten Datensätze, kann die Anzahl an Trainingsdaten durch die Software erweitert werden (*Data Augmentation*). Für das Training der KI werden die 2D Trainingsdatensätze in quadratische Patches mit einer Größe von 80×80 Voxel aufgeteilt. Jeweils 128 Patches werden im Anschluss zufällig

in sogenannten Batches gestapelt und durch das KNN geleitet. Eine Trainingsschleife ist beendet, wenn alle Trainingsdatensätze vollständig das KNN durchlaufen haben. Nach spätestens 100 Schleifen ist das Training beendet. [81, 82]

In Abbildung 2.20 ist exemplarisch ein 16 bit Graustufenschnittbild einer ölbeladenen Wirrfaserschicht mit einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,06$ (Aufnahme 5, siehe Tabelle 3.1) vor und nach der Segmentierung dargestellt.

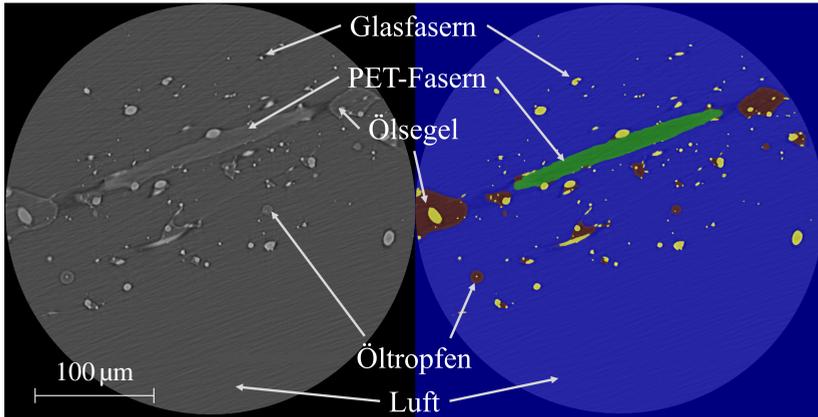


Abbildung 2.20: Links: 16 bit Graustufenschnittbild nach der Rekonstruktion. Rechts: Schnittbild nach der Segmentierung. Glasfasern sind in gelber, Öl in brauner, PET-Fasern in grüner und Luft ist in blauer Farbe dargestellt (globale Sättigung $S_{\text{global}} = 0,06$, Anströmgeschwindigkeit 25 cm s^{-1} und Ölbeladungsrate $204 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$); nach Straube et al. [34].

Wie zu erkennen ist, sind Grauwerte von PET-Fasern (eine Faser, etwa horizontal im Schnittbild ausgerichtet) sehr ähnlich zu Grauwerten von abgeschiedenen Ölstrukturen, insbesondere zu größeren vollständig mit Öl gesättigten Bereichen zwischen Fasern - sogenannte Ölsegel. Aus diesem Grund ist eine Segmentierung mittels Schwellenwerten nicht möglich. Nach ausreichender Bereitstellung von Datensätzen für das Trainieren des KNN, können alle 2D Schnittbilder segmentiert werden (Abbildung 2.20 rechts). Auf dem segmentierten Bild ist zu erkennen, dass die KI gut zwischen PET-Fasern und Ölstrukturen unterscheiden kann. Im Anschluss an die Segmentierung können die unterschiedlichen Klassen separat analysiert werden. Durch Betrachtung von ausschließlich Mikroglasfasern, PET-Fasern und Öl, lässt sich ein 3D-Bild des Scans mit Hilfe der Dragonfly[®] Software erzeugen (Abbildung 2.21).

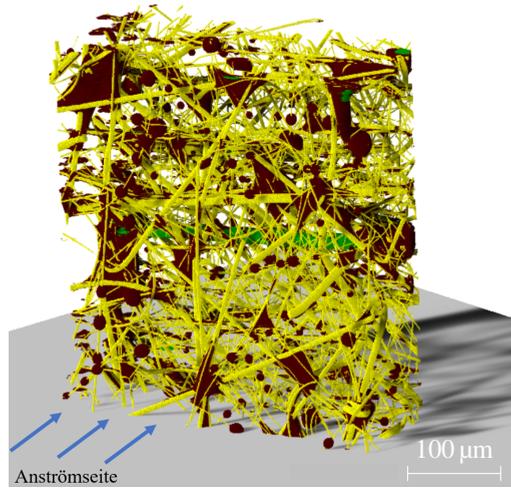


Abbildung 2.21: 3D-Bild einer Faserschicht nach der Segmentierung. $S_{\text{global}} = 0,06$ (Aufnahme 5), Anströmgeschwindigkeit 25 cm s^{-1} und Ölbeladungsrate $204 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; nach Straube et al. [34].

In der 3D-Ansicht lässt sich gut die horizontal ausgerichtete PET-Faser (grün), in etwa in der Mitte des Scans, welche sich auch in Abbildung 2.20 erkennen lässt, wiederfinden. Mikroglasfasern sind in gelber Farbe und Öl in brauner Farbe markiert. Ölstrukturen lassen sich in einem nachgeschalteten Prozess analysieren. Hierfür stehen umfangreiche Analyse-Werkzeuge der Dragonfly[®] Software zur Verfügung. Einzelne Objekte können mit Informationen wie Voxelanzahl, Oberfläche, Volumen, minimalem oder mittlerem Feret Durchmesser exportiert werden. Der minimale Feret Durchmesser $x_{\text{Feret,min}}$ ist der kürzeste Abstand zwischen zwei beliebigen Punkten entlang der Grenzfläche eines Objekts [83]. Für die Berechnung des mittleren Feret Durchmessers $x_{\text{Feret,mean}}$ wird der Durchmesser eines Objekts aus einer ausreichenden Anzahl an unterschiedlichen Winkeln bestimmt und ein Mittelwert gebildet. In der Dragonfly[®] Software erfolgen die Messungen für den mittleren Feret Durchmesser in Intervallen von 5 Grad [84]. Nach dem Export aller Objekte einer Klasse, können diese auf vorher festgelegte Merkmale (z.B. Sphärizität) klassifiziert werden. So kann zwischen kugelförmigen (z.B. abgeschiedenen Tropfen auf Fasern) und komplexeren Strukturen (z.B. Ölsegeln) unterschieden werden. Die Sphärizität Ψ gibt dabei das Verhältnis der Oberfläche einer perfekten Kugel zur Oberfläche eines beliebigen Körpers gleichen Volumens zu der Kugel an und ist wie folgt zu berechnen:

$$\Psi = \frac{\pi^{\frac{1}{3}} (6 V_K)^{\frac{2}{3}}}{O_K} = \frac{\sqrt[3]{36 \pi V_K^2}}{O_K} \quad (2.7)$$

Dabei entspricht V_K dem Volumen und O_K der Oberfläche des Körpers. Durch das Sphärizitätskriterium lassen sich im weiteren Verlauf beispielsweise abgeschiedene Öltröpfchen auf Wirrfaseranordnungen mit unterschiedlicher Sättigung analysieren und vergleichen.

3 Charakterisierung von abgeschiedenen Ölstrukturen ²

Dieses Kapitel widmet sich der Identifizierung und Analyse von abgeschiedenen Ölstrukturen in Wirrfaserschichten im Bereich weniger Mikrometer. Der Fokus liegt dabei auf fünf ausgewählten Beladungszuständen. Dafür werden die eigens hergestellten unbeladenen Wirrfaservliese bis zu einer globalen Sättigung (bestimmt durch Wägung nach der Ölbeladung) von $S_{\text{global}} = 0,02, 0,04, 0,06, 0,10$ und $0,20$ beladen und Ölabscheideraten bestimmt (Abschnitt 3.1). Es folgt ein Vergleich zwischen der lokalen Porosität bzw. Sättigung (ermittelt mittels μ -CT) und der globalen Porosität bzw. Sättigung (gravimetrisch ermittelt, Abschnitt 3.2). Im Anschluss werden unterschiedliche abgeschiedene Ölstrukturen identifiziert (Abschnitt 3.3) und differenziert (Abschnitt 3.4). In Abschnitt 3.5 erfolgt eine vergleichende Analyse der abgeschiedenen Öltröpfen hinsichtlich deren Konzentrationen und Verteilungen bei unterschiedlichen Beladungszuständen. Ein Vergleich der Ölverteilung in den Wirrfaseranordnungen in Richtung der Aerosolströmung für unterschiedliche Sättigungszustände ist Gegenstand von Abschnitt 3.6.

3.1 Ölbeladung von dünnen Wirrfaserschichten

Die untersuchten Faservliese werden bis zu globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,02$ (entspricht einer Ölbeladungszeit von ca. 1 min), $0,04$ (Ölbeladungszeit ca. 2 min), $0,06$ (Ölbeladungszeit ca. 3 min), $0,10$ (Ölbeladungszeit ca. 5 min) und $0,20$ (Ölbeladungszeit ca. 10 min) mit Ölnebel in der Beladungskammer beladen und anschließend am μ -CT hinsichtlich der lokalen Ölverteilung untersucht.

Vor der Untersuchung am μ -CT werden die eigens hergestellten Wirrfaservliese mit und ohne Unterbrechungen mit Ölnebel beladen, um sicherzustellen, dass die Ölabscheiderate für jede Wirrfaserschicht als konstant anzusehen ist, die Wirrfaserschichten untereinander vergleichbar

² Teile dieses Kapitels sind in Straube et al. [68] publiziert.

sind und ein konstanter Rohgasmassenstrom und eine möglichst (zeitlich) unveränderte Tropfen­größenverteilung vorliegt. Bei der Beladung der Faservliese ohne Unterbrechung werden jeweils neue Faserschichten bis zur entsprechenden globalen Sättigung mit Ölnebel beaufschlagt und für jede Beladungsstufe mindestens eine Dreifachbestimmung durchgeführt. In Abbildung 3.1 ist die gravimetrisch bestimmte globale Sättigung über der Ölbeladungszeit für die fünf betrachteten Ölbeladungszustände, sowohl für eine Ölbeladung ohne Unterbrechung (grün gekennzeichnet) als auch einer Ölbeladung mit Unterbrechung (schwarz gekennzeichnet), aufgetragen.

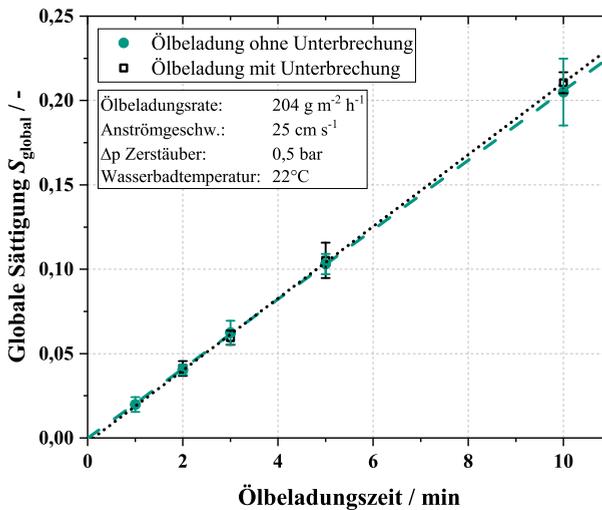


Abbildung 3.1: Globale Sättigung der eingesetzten Wirrfaserschichten bei einer Beladung mit Ölnebel mit und ohne Unterbrechungen; nach Straube et al. [68].

Die untersuchten Wirrfaserschichten zeigen eine durch Wägung bestimmte globale Sättigung nach der Ölbeladung ohne Unterbrechung zwischen 0,02 und 0,22 auf (grüne Punkte). Die vordefinierten Beladungszustände lassen sich demnach mit ausreichender Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit (ersichtlich in den geringen Fehlerbalken) reproduzieren. Es ist in Abbildung 3.1 zudem eine annähernd lineare Steigung mit einer durchschnittlichen Ölabscheiderate an den Wirrfaseranordnungen von etwa $163 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ erkennbar. Die lineare Ausgleichsgerade der kontinuierlich beladenen Faservliese (grüne Linie) und die kleinen Fehlerbalken in Abbildung 3.1 zeigen, dass die dünnen Wirrfaseranordnungen untereinander vergleichbar sind, da die Menge an abgeschiedenem Öl zu jedem Zeitpunkt in allen Experimenten nahezu identisch ist.

Darüber hinaus enthält Abbildung 3.1 auch Datenpunkte, die einer Beladung mit Unterbrechungen entstammen (z.B. wurden Wirrfaseranordnungen nach 1 min Ölbeladung ausgebaut und gewogen, wieder eingebaut und für eine weitere Minute beladen), um zu zeigen, dass die Ölabscheiderate für den gewählten Zeitraum für jedes Faservlies konstant ist (schwarze Quadrate in Abbildung 3.1 mit einer schwarzen Ausgleichsgeraden). Die Experimente sind ebenfalls mindestens dreifach wiederholt, um statistische Schwankungen auf ein Minimum zu reduzieren. Auch bei dieser Versuchsreihe ist deutlich erkennbar, dass die Abscheidung je Zeitschritt als konstant anzusehen ist und die eingesetzten Wirrfaserschichten ein nahezu identisches Abscheideverhalten aufweisen. Die durchgeführten Vorversuche demonstrieren, dass die Faservliese untereinander vergleichbar und die Ölabscheideraten konstant sind sowie ein konstanter Rohgasmassenstrom und eine zeitlich unveränderte Tropfengrößenverteilung im Rohgas vorliegt.

Im Folgenden werden die fünf unterschiedlichen Sättigungszustände ($0,02 \leq S_{\text{global}} \leq 0,20$) am μ -CT untersucht. Dabei werden teilweise mehrere hochauflösende Aufnahmen von einem Probenausschnitt angefertigt (vgl. Übersichtsscan Abbildung 2.19). In Abbildung 3.2 ist eine Übersicht über die durchgeführten Aufnahmen gegeben.

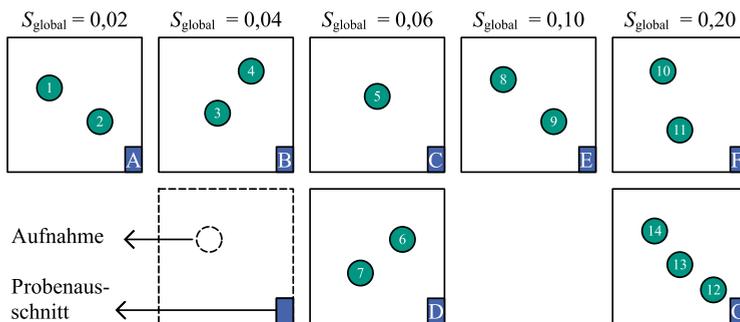


Abbildung 3.2: Übersicht über die aufgenommenen μ -CT Scans zur Charakterisierung von abgeschiedenen Ölstrukturen. Grüne Kreise illustrieren schematisch die Position der hochauflösenden μ -CT Aufnahmen, etwa in der Mitte jedes Probenausschnitts; nach Straube et al. [68].

Insgesamt werden gewonnene Ergebnisse aus 14 hochauflösenden μ -CT Aufnahmen in diesem Abschnitt präsentiert. Zwei Aufnahmen stammen jeweils von Probenausschnitt A ($S_{\text{global}} = 0,02$), Probenausschnitt B ($S_{\text{global}} = 0,04$) und Probenausschnitt E ($S_{\text{global}} = 0,10$). Für einen Beladungszustand von $S_{\text{global}} = 0,06$ werden drei Aufnahmen von zwei Probenausschnitten individuell und zeitlich versetzt beladener Wirrfaseranordnungen (eine Aufnahme von Probenausschnitt C und zwei Aufnahmen von Probenausschnitt D) vorgestellt und für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$ werden insgesamt fünf Aufnahmen ausgewertet (zwei Aufnahmen von Probenausschnitt F und drei Aufnahmen von Probenausschnitt G). Probenausschnitt F und G stammen von zwei unterschiedlichen und zeitlich versetzt beladenen Faservliesen. In Tabelle 3.1 sind die

Versuchsparameter und ermittelten Werte für die lokale Porosität Φ_{lokal} sowie lokale Sättigung S_{lokal} (siehe Abschnitt 3.2) der durchgeführten μ -CT Aufnahmen zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Übersicht über Parameter und Ergebnisse aus den μ -CT Aufnahmen der ölbeladenen Wirrfaserschichten.

S_{global}	Aufnahme	Proben- ausschnitt	Binning	Beleuchtungs- zeit	Voxel- größe	Φ_{lokal}	S_{lokal}
[-]	[-]	[-]	[-]	[s]	[nm]	[-]	[-]
0,02	1	A	2	7	353,9	0,964	0,008
	2 ^b	A	1	29	176,9	0,954	0,004
0,04	3	B	2	4,5	374,4	0,947	0,031
	4 ^b	B	1	23	187,2	0,954	0,023
0,06	5 ^b	C	1	25	193,5	0,971	0,025
	6	D	2	5	373,3	0,968	0,063
	7	D	1	20	186,7	0,967	0,037
0,10	8 ^b	E	2	4,5	376,6	0,965	0,051
	9	E	2	4,5	376,6	0,968	0,061
0,20	10 ^b	F	1	26	194,3	0,961	0,394
	11	F	2	6	374,4	0,952	0,057
	12	G	2	6	371,1	0,953	0,143
	13	G	2	6	371,1	0,947	0,098
	14	G	2	6	371,1	0,936	0,296

^b Ausgewählt für Detailanalyse der abgeschiedenen Ölstrukturen

μ -CT Aufnahmen, welche in Tabelle 3.1 mit einem ^b markiert sind (grau hinterlegt), werden für die detaillierte Betrachtung von abgeschiedenen Ölstrukturen in Abschnitt 3.4 und 3.5 herangezogen. Diese Aufnahmen sind hauptsächlich bei einem Binning 1 (halbe Voxelgröße im Vergleich zu Binning 2) angefertigt, um eine höchstmögliche Auflösung sicherzustellen, die nahe an der maximalen Auflösungsgrenze des Versa 520 Systems liegt. Allgemein ist festzuhalten, dass kleine Ölstrukturen auf oder zwischen Fasern im Bereich weniger Mikrometer mit höchster Auflösung (Binning 1) besser zu segmentieren und zu analysieren sind als bei einem Binning 2. Aufgrund der hohen Transmission von Röntgenstrahlung bei Öl, sind abgeschiedene Ölstrukturen erst ab einer Größe von ca. fünf bis zehn Voxeln aufzulösen. Mikroglasfasern hingegen zeigen im Vergleich zu Öl eine deutlich höhere Absorption der Röntgenstrahlen, wodurch eine Größe von nur drei bis fünf Voxeln für eine zuverlässige Erkennung erforderlich sind. Da die Messzeit von μ -CT Aufnahmen bei einem Binning 1 viermal länger dauert als Aufnahmen bei einem Binning 2, wurden weniger Scans bei einem Binning 1 durchgeführt, um Messzeit am

μ -CT möglichst effektiv zu nutzen. Aufnahmen mit einem Binning 2 werden hauptsächlich für die Bestimmung der lokalen Porosität und lokalen Sättigung herangezogen (Abschnitt 3.2). Bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}}=0,10$ sind nur zwei Aufnahmen mit einem Binning 2 verwertbar, da die Röntgenquelle mehrfach während der Messung ausfiel. Aus diesem Grund wird Aufnahme 8 für die Detailanalyse von abgelagerten Ölstrukturen herangezogen. Im Vergleich zu Aufnahme 9 zeigt Aufnahme 8 eine bessere Qualität und einen höheren Kontrast zwischen Mikroglas- bzw. PET-Fasern, Öl und Luft, weshalb dieser Scan für die Detailanalyse der Ölstrukturen in Abschnitt 3.4 und 3.5 ausgewählt wird.

3.2 Lokale und globale Betrachtung der Porosität und Sättigung

In diesem Abschnitt werden die lokale und globale Porosität bzw. Sättigung miteinander verglichen. Zur Bestimmung der Porosität und Sättigung auf lokaler Ebene dienen die Auswertungen von segmentierten μ -CT Aufnahmen. Die globale Porosität der Wirrfaseranordnungen wurde bereits in Abschnitt 2.1.1 (Formel 2.1) zu $\Phi_{\text{global}}=0,959$ bestimmt. Die Ermittlung der globalen Sättigung der einzelnen Beladungszustände wurde in Abschnitt 3.1 beschrieben.

Die lokale Porosität lässt sich mit Hilfe einer quaderförmigen virtuellen Box bestimmen, welche den dichtest gepackten Bereich einer Wirrfaseranordnung einer segmentierten μ -CT Aufnahme einschließt. Diese virtuelle Box wird im weiteren Verlauf als **Referenzvolumen** bezeichnet. Dieses Referenzvolumen ist dabei subjektiv gewählt, sodass es den Großteil der Fasern der Wirrfaserschichten umschließt. Aus diesem Grund ist es nicht vermeidbar, dass einzelne Fasern aus dem Quader herausragen. Dies ist insbesondere auf der Anströmseite der Faserschichten, aufgrund des Nasslegeverfahrens bei der Herstellung der Wirrfaservliese, zu beobachten. Die subjektive Wahl des Quaders ist auf das Fehlen einer geeigneten Funktion in der Dragonfly[®] Software zurückzuführen. Daher ist es nicht möglich einen Quader, z.B. basierend auf der Packungsdichte in Richtung der Durchströmungsrichtung der Faserschichten, zu definieren.

In Abbildung 3.3 ist exemplarisch ein segmentierter μ -CT Scan (Aufnahme 4) mit virtuellen Boxen für die Bestimmung der Porosität und der Sättigung dargestellt. Die Abbildungen sind mit Hilfe der Dragonfly[®] Software angefertigt.

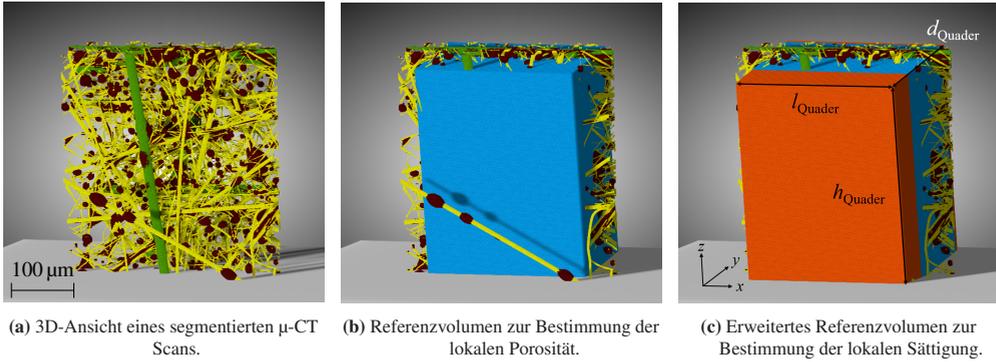


Abbildung 3.3: (a) Segmentierter μ -CT Scan von Aufnahme 4 (globale Sättigung $S_{\text{global}} = 0,04$, Anströmgeschwindigkeit 25 cm s^{-1} und Ölbeladungsrate $204 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). (b) Referenzvolumen zur Bestimmung der lokalen Porosität. (c) Erweitertes Referenzvolumen zur Bestimmung der lokalen Sättigung; nach Straube et al. [68].

Abbildung 3.3a zeigt eine 3D-Ansicht des segmentierten μ -CT Scans von Aufnahme 4 mit einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,04$. Mikroglasfasern sind in gelber, PET-Fasern in grüner und Ölstrukturen in brauner Farbe markiert. Das gewählte Referenzvolumen zur Bestimmung der lokalen Porosität ist in Abbildung 3.3b illustriert (virtuelle blaue Box). Zur Bestimmung der lokalen Porosität wird die Summe der Voxel an Mikroglasfasern v_{MGF} und an PET-Fasern v_{PETF} durch die Summe aller Voxel (v_{MGF} , v_{PETF} , Luft v_{Luft} und Öl $v_{\text{Öl}}$) im Referenzvolumen (blaue Box) dividiert und von 1 subtrahiert (Formel 3.1).

$$\Phi_{\text{lokal}} = 1 - \frac{v_{\text{MGF}} + v_{\text{PETF}}}{v_{\text{Luft}} + v_{\text{Öl}} + v_{\text{MGF}} + v_{\text{PETF}}} \quad (3.1)$$

Die lokalen Porositäten der 14 ausgewerteten μ -CT Aufnahmen können in Tabelle 3.1 eingesehen werden. Sie schwanken zwischen $\Phi_{\text{lokal}} = 0,936$ und $0,971$. Der Mittelwert der lokalen Porosität dieser Aufnahmen beträgt dabei $\bar{\Phi}_{\text{lokal}} = 0,958$ (Standardabweichung $\pm 0,0098$) und liegt somit in einem identischen Größenbereich zur globalen Porosität mit $\Phi_{\text{global}} = 0,959$. Folglich weisen die Wirrfaserschichten auf lokaler und globaler Ebene eine sehr hohe Homogenität auf. Vergleichbare Faservliese auf mikro- und makroskopischer Ebene sind Grundvoraussetzung für einen zuverlässigen Vergleich abgeschiedener Flüssigkeitsstrukturen, was durch den Abgleich von lokaler und globaler Porosität gezeigt werden konnte.

In einem nächsten Schritt erfolgt die Berechnung der lokalen Sättigung der untersuchten μ -CT Aufnahmen mit Hilfe von Formel 3.2.

$$S_{\text{lokal}} = \frac{v_{\text{Öl},2}}{v_{\text{Luft}} + v_{\text{Öl}}} \quad (3.2)$$

Für eine korrekte Berechnung ist dabei erforderlich, dass Ölstrukturen, welche sich auf Fasern vor und hinter des blauen Referenzvolumens (Abbildung 3.3b) befinden, ebenfalls bei der Berechnung Berücksichtigung finden. Bei der gravimetrischen Bestimmung der Sättigung werden diese Strukturen gleichermaßen mitgewogen, weshalb ein Addieren von abgeschiedenen Ölstrukturen außerhalb des Referenzvolumens für eine korrekte Bestimmung der lokalen Sättigung notwendig ist. Dazu wird das Referenzvolumen in y -Richtung erweitert (sowohl anström- als auch abströmseitig), sodass diese neue virtuelle Box alle Fasern mit abgeschiedenen Ölstrukturen einschließt. Im Anschluss kann mit Hilfe der Dragonfly[®] Software das Ölvolumen $v_{\text{Öl},2}$ im neuen, **erweiterten Referenzvolumen** (Abbildung 3.3c blaue und orangene Box) bestimmt werden. Zur Berechnung der lokalen Sättigung ist dazu $v_{\text{Öl},2}$ durch das unbeölte Hohlraumvolumen im Referenzvolumen (blaue Box) zu teilen (Summe aus v_{Luft} und $v_{\text{Öl}}$). In Abbildung 3.4 ist die lokale und globale Sättigung der untersuchten μ -CT Aufnahmen in Abhängigkeit der Ölbeladungszeit verglichen. Die global bestimmte Sättigung ist dabei bereits bekannt aus Abbildung 3.1 für eine Ölbeladung der dünnen Wirrfaserschichten ohne Unterbrechung.

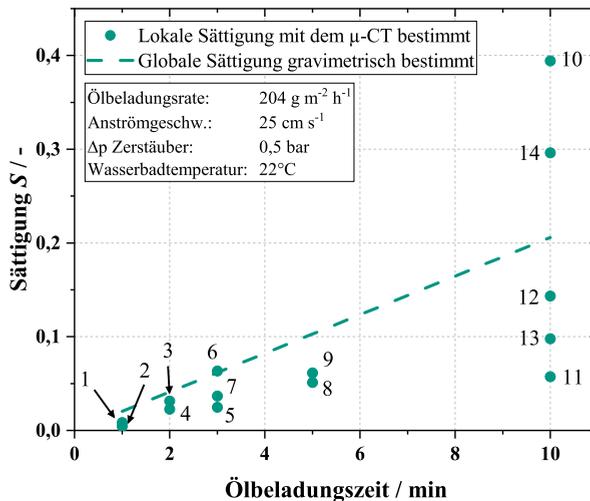


Abbildung 3.4: Lokale Sättigungen der untersuchten μ -CT Aufnahmen. Zusätzlich ist die globale Sättigung als Ausgleichsgerade für eine Beladung der Faservliese ohne Unterbrechung gegeben. Ölbeladungsrate $204 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ und Anströmgeschwindigkeit 25 cm s^{-1} ; nach Straube et al. [68].

Es ist zu erkennen, dass die lokale Sättigung bis zu einer Ölbeladungszeit von 5 min (entspricht $S_{\text{global}} = 0,10$) im Mittel stetig ansteigt. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass bei globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,10$ nur kleine Unterschiede in der lokalen Ölverteilung auftreten. Weiterhin fällt auf, dass die lokalen Sättigungen für Ölbeladungszeiten von 1, 2, 3 und 5 min unterhalb der globalen Sättigung liegen. Einzig Aufnahme 6 zeigt eine leicht höhere lokale Sättigung im Vergleich zur globalen Sättigung. Eine niedrigere lokale Sättigung verglichen mit der globalen Sättigung ist mit der unteren Auflösungsgrenze des μ -CTs erklärbar, da Ölstrukturen und mögliche Ölfilme auf Fasern mit einer Größe $< 2 \mu\text{m}$ mit dem μ -CT aufgrund der hohen Transmission von Öl nur schwer aufzulösen sind [34]. Zusätzlich stützen die experimentell größer bestimmten Faserdurchmesser (mittels μ -CT) im Vergleich zu den nominellen Faserdurchmessern (laut Hersteller) aus Abschnitt 2.1.1 (Abbildung 2.4) die These, dass kleine, filmähnliche Ölstrukturen auf Fasern vom μ -CT fälschlicherweise als Fasermaterial klassifiziert werden können.

Durch Rechnung ist eine mittlere Ölschichtdicke $d_{\text{Ölschicht}}$ auf der freien Faseroberfläche O_{frei} im erweiterten Referenzvolumen der Mikroglas- und PET-Fasern, welche nicht durch Ölstrukturen blockiert sind, abschätzbar. Für diese Annahme gilt die Voraussetzung, dass die Ölmenge, die sich aus der Differenz zwischen lokal identifizierter und global bestimmter Ölmenge ergibt, gleichmäßig auf der freien unbeöhlten Faseroberfläche (identifiziert mit dem μ -CT) verteilt. Die benötigten Oberflächen zur Berechnung der freien Faseroberfläche sind am vereinfachten Beispiel eines exemplarischen tonnenförmigen Öltropfens (charakteristisch für benetzbare Fasern [85]), schematisch in Abbildung 3.5 dargestellt.

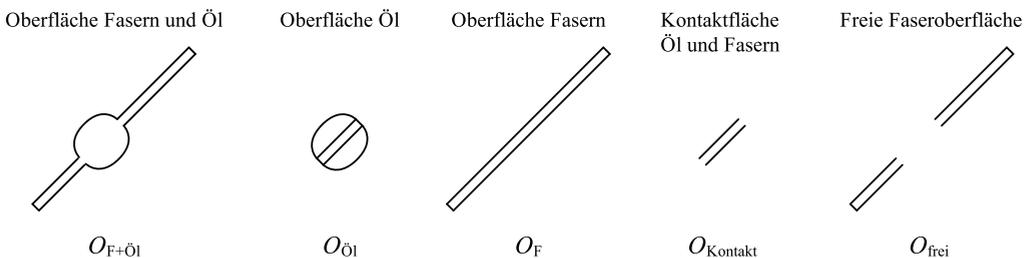


Abbildung 3.5: Schematischer Überblick über die benötigten Oberflächen zur Bestimmung der freien Faseroberfläche.

Aus der Dragonfly[®] Software lässt sich nach der Segmentierung die vereinte Oberfläche von Öl und Fasern $O_{F+\text{Öl}}$ sowie die getrennten Oberflächen von Öl $O_{\text{Öl}}$ und Fasern O_F (jeweils Mikroglas- und PET-Fasern) exportieren. Zur Bestimmung der freien Oberfläche muss von der vereinten Oberfläche von Fasern und Öl $O_{F+\text{Öl}}$ die Oberfläche der identifizierten Ölstrukturen $O_{\text{Öl}}$ abgezogen werden. Da Ölobjekte auf Fasern eine gemeinsame Oberfläche besitzen, die Kontaktfläche zwischen Öl und Faser O_{Kontakt} , ist diese Fläche final zu addieren (siehe Formel 3.3).

$$O_{\text{frei}} = O_{\text{F+Öl}} - O_{\text{Öl}} + O_{\text{Kontakt}} \quad (3.3)$$

In einem nächsten Schritt erfolgt die Bestimmung der Kontaktfläche zwischen Öl und Fasern (O_{Kontakt}). Dazu wird die Oberfläche der Ölstrukturen $O_{\text{Öl}}$ und die Oberfläche der Fasern O_{F} addiert sowie die vereinte Oberfläche von Fasern und Öl $O_{\text{F+Öl}}$ subtrahiert. Da sowohl das Öl als auch die Fasern eine gemeinsame Kontaktfläche aufweisen, bedarf es einer Division des gesamten Ausdrucks durch einen Faktor 2 (siehe Formel 3.4).

$$O_{\text{Kontakt}} = \frac{O_{\text{Öl}} + O_{\text{F}} - O_{\text{F+Öl}}}{2} \quad (3.4)$$

Zur Abschätzung einer mittleren Ölschichtdicke $d_{\text{Ölschicht}}$ auf der freien Faseroberfläche O_{frei} werden zusätzlich das identifizierte Ölvolumen im erweiterten Referenzvolumen $V_{\text{Öl,lokal}}$ (ebenfalls aus der Dragonfly[®] Software) sowie die lokalen und globalen Sättigungen der jeweiligen μ -CT Aufnahme aus Tabelle 3.1 benötigt. Die mittlere Ölschichtdicke auf den Fasern im erweiterten Referenzvolumen kann im Anschluss mit Hilfe von Formel 3.5 berechnet werden.

$$d_{\text{Ölschicht}} = \frac{S_{\text{global}} - S_{\text{lokal}}}{S_{\text{lokal}}} \cdot \frac{V_{\text{Öl,lokal}}}{O_{\text{frei}}} \quad (3.5)$$

Bei dieser Abschätzung wird angenommen, dass die Grundfläche der Fasern im Vergleich zu deren Mantelfläche vernachlässigbar klein ist, da für beide Fasertypen (Mikroglas- und PET-Fasern) der Durchmesser viel kleiner als die Faserlänge ist.

Diese Berechnung wird für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,10$ (Aufnahmen 1 - 9) durchgeführt, da insbesondere bei diesen Sättigungszuständen die lokale Sättigung, mit Ausnahme von Aufnahme 6, niedriger als die globale Sättigung ist. In Abbildung 3.6 sind die mittleren Ölschichtdicken für die Aufnahmen 1 - 9 dargestellt.

Vor allem die Ölschichtdicken für globale Sättigungen von $S_{\text{global}}=0,02$ und $0,04$ sind mit $d_{\text{Ölschicht}} < 500$ nm nicht mit dem μ -CT aufzulösen. Es ist demnach anzunehmen, dass sich nicht mit dem μ -CT identifiziertes Öl, als kleine film- oder tropfenähnliche Ölstrukturen auf den Fasern befindet. Dickere Ölfilme können hingegen nach Plateau-Rayleigh [40] ausgeschlossen werden. Dennoch können Ölstrukturen selbst mit einer doppelten Dicke der berechneten mittleren Ölschichtdicken nicht mit dem μ -CT aufgelöst werden. Für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,06$ lassen sich mittlere Ölschichtdicken von $d_{\text{Ölschicht}} = 1 \mu\text{m}$ (Aufnahme 5), $- 110$ nm (Aufnahme 6) und 800 nm (Aufnahme 7) abschätzen. Es fällt auf, dass bereits bei diesem Sättigungszustand größere Fluktuationen und negative Ölschichtdicken (da $S_{\text{lokal}} > S_{\text{global}}$) zu beobachten sind. Es

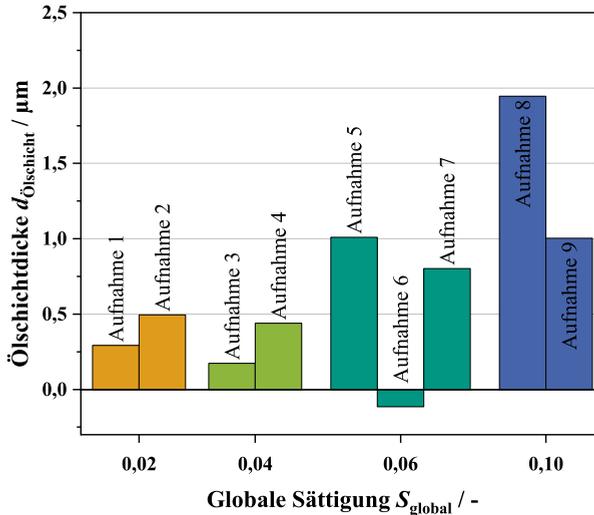


Abbildung 3.6: Berechnete mittlere Ölschichtdicke auf der freien Faseroberfläche für globale Sättigungen $S_{\text{global}} \leq 0,10$.

ist anzunehmen, dass ab diesem Sättigungszustand bereits lokale Unterschiede in der Ölverteilung auftreten. Durch Koaleszenz- und Umlagerungsvorgänge entstehen lokal größere Ölstrukturen, wodurch Öl aus Nachbarbereichen umverteilt werden kann. Durch diese Ölumverteilung lassen sich lokale Sättigungen finden, welche stark von der globalen Sättigung abweichen.

Für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,10$ beträgt die errechnete Ölschichtdicke für Aufnahme 8 in etwa $2 \mu\text{m}$ und für Aufnahme 9 ca. $1 \mu\text{m}$. Die Annahme einer homogenen Verteilung der fehlenden Ölmenge um die freie Faseroberfläche ist für Aufnahme 8 demnach nicht mehr gerechtfertigt. Ölschichtdicken in diesem Größenbereich müssten auf $\mu\text{-CT}$ Aufnahmen sichtbar sein. Es ist vielmehr wahrscheinlicher, dass bei diesem Sättigungszustand vermehrt Umlagerungsvorgänge Einfluss auf die lokal bestimmte Sättigung nehmen.

Neben der Berechnung einer homogenen Ölschichtdicke um die freie Faseroberfläche, welche sich aus den $\mu\text{-CT}$ Aufnahmen ergibt, lässt sich weiterhin eine maximale Ölschichtdicke nach der Plateau-Rayleigh-Instabilität abhängig vom Faserdurchmesser abschätzen. Wie bereits in Abschnitt 1.2.2 erwähnt, bilden sich nach Plateau-Rayleigh [40] bereits ab sehr geringen Ölschichtdicken (einige hundert Nanometer bis wenige Mikrometer) Tropfen auf Filterfasern aus. Dabei wird abgeschiedene Flüssigkeit aufgrund ihrer Oberflächenspannung (treibende Kraft ist die Reduktion der Oberfläche) auf den Fasern umverteilt und es wachsen langsam Tropfen an. Bei oleophilen Fasern handelt es sich hierbei um tonnenförmige Tropfen, welche die Fasern umschließen [85]. Es wurde von Plateau-Rayleigh [40] beobachtet, dass alle achsensymmetrischen

Wellenlängen, welche größer als der Umfang des Flüssigkeitszylinders (Film auf den Fasern) sind, eine Instabilität aufweisen. Für einen dünnen Film auf einer Faser dominiert dabei die Wellenlänge $\pi \sqrt{2} x_F$ [86]. Entspricht diese Wellenlänge nun dem Umfang des Flüssigkeitszylinders, welcher die dünnen zylindrischen Fasern umschließt, kann eine maximale Filmdicke nach Mullins & Kasper [38] abgeschätzt werden. Die maximal mögliche Ölschichtdicke nach Plateau-Rayleigh (PR) $d_{\text{Ölschicht,PR}}$ auf Filterfasern mit einem Faserdurchmesser x_F kann demnach wie folgt berechnet werden:

$$d_{\text{Ölschicht,PR}} = \frac{x_F}{2} (\sqrt{2} - 1) \quad (3.6)$$

In Tabelle 3.2 sind die maximalen Ölfilmthicken (bestimmt nach Formel 3.6) für die in dieser Arbeit verwendeten Fasermaterialien aufgeführt.

Tabelle 3.2: Berechnete Ölfilmthicken auf den in dieser Arbeit eingesetzten Fasertypen nach Mullins & Kasper [38].

Fasertyp [-]	Massenanteil χ [ma.-%]	nomineller Faserdurchmesser x_F [μm]	$d_{\text{Ölschicht,PR}}$ [μm]
B-15	20	1,48	0,31
B-26	40	2,44	0,51
EC6-6	20	5,50	1,14
Adv271P	20	13,60	2,82

Die maximal erwartbare Ölschichtdicke liegt dieser Abschätzung nach, abhängig vom Faserdurchmesser, zwischen $0,31 \mu\text{m} \leq d_{\text{Ölschicht,PR}} \leq 2,82 \mu\text{m}$. Der dünnste Ölfilm wird für den Glasfasertyp B-15 mit einem nominellen Faserdurchmesser von $1,48 \mu\text{m}$, der dickste Ölfilm für die PET-Fasern Adv271P mit einem nominellen Faserdurchmesser von $13,60 \mu\text{m}$ erwartet. Damit ist die maximale Ölschichtdicke für alle Mikroglasfasertypen (B-15, B-26 und EC6-6) in einem Bereich, welcher nicht mit dem μ -CT aufgelöst werden kann. Einzig auf den PET-Fasern können sich Ölfilme ausbilden, welche an der unteren Auflösungsgrenze des μ -CT sind. Über die Fasermischung lässt sich grob eine mittlere Ölschichtdicke $\bar{d}_{\text{Ölschicht,PR}}$ über alle Fasertypen abschätzen. Dabei wird das Ölvolumen (gespeichert in der Ölschicht, welche die Fasern umschließt) für jeden Fasertyp der Klasse i auf die Faseroberfläche jedes Fasertyps der Klasse i bezogen (Formel 3.7).

$$\bar{d}_{\text{Ölschicht,PR}} = \frac{\sum V_{\text{Öl},i}}{\sum O_{F,i}} = \frac{\sum O_{F,i} d_{\text{Ölschicht,PR},i}}{\sum O_{F,i}} \quad (3.7)$$

Das Ölvolumen $V_{\text{Öl},i}$ auf der Faseroberfläche eines jeden Fasertyps der Klasse i kann dabei auch als Produkt aus der Faseroberfläche $O_{F,i}$ und der errechneten Ölschichtdicke nach Mullins & Kasper [38] für jeden Fasertyp der Klasse i zu $d_{\text{Ölschicht,PR},i}$ ausgedrückt werden. Für die Faseroberfläche eines jeden Fasertyps der Klasse i gilt:

$$O_{F,i} = \pi x_{F,i} l_{F,i} \quad (3.8)$$

Hierbei entspricht $x_{F,i}$ dem Faserdurchmesser des Fasertyps der Klasse i und $l_{F,i}$ der Faserlänge des Fasertyps der Klasse i . Durch Umformen von Formel 3.9, lässt sich die Faserlänge für jeden Fasertyp der Klasse i nach Formel 3.10 berechnen.

$$m_{F,i} = \rho_{F,i} V_{F,i} = \rho_{F,i} l_{F,i} \frac{\pi}{4} x_{F,i}^2 \quad (3.9)$$

$$l_{F,i} = \frac{4 m_{F,i}}{\rho_{F,i} \pi x_{F,i}^2} \quad (3.10)$$

$m_{F,i}$ entspricht der Masse des Fasertyps der Klasse i und $\rho_{F,i}$ der Dichte des Fasertyps der Klasse i (Dichte der Mikroglassfasern 2500 kg m^{-3} und Dichte der PET-Fasern 1380 kg m^{-3}). Aus Formel 3.8 und Formel 3.10 ergibt sich folgender Ausdruck für die Faseroberfläche des jeweiligen Fasertyps der Klasse i :

$$O_{F,i} = \frac{4 m_{F,i}}{\rho_{F,i} x_{F,i}} \quad (3.11)$$

Da die Masse eines jeden Fasertyps unbekannt, jedoch der Massenanteil χ bekannt ist, lässt sich in Formel 3.11 $m_{F,i}$ durch χ substituieren. Infolgedessen ergibt sich eine relative Faseroberfläche je Fasertyp pro kg Fasermaterial. Nun kann durch Einsetzen der relativen Faseroberfläche eines jeden Fasertyps der Klasse i (Formel 3.11) in Formel 3.7 eine mittlere Ölschichtdicke für die in dieser Arbeit verwendeten Faser mit den Spezifikationen aus Tabelle 3.2 abgeschätzt werden. Die so berechnete mittlere Ölschichtdicke nach Mullins & Kasper [38] beträgt demnach $\bar{d}_{\text{Ölschicht,PR}} = 0,66 \mu\text{m}$. Dieser Wert liegt wiederum in sehr guter Näherung zu den berechneten

Ölschichtdicken via μ -CT auf der freien, unbeölten Faseroberfläche (Abbildung 3.6) bis zu globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,04$.

Es folglich ist zu konstatieren, dass eine homogene Verteilung von abgeschiedenem Öl in Form von filmähnlichen Strukturen auf den Wirrfaserschichten bis zu globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,04$ vorstellbar ist, da bis zu diesem Sättigungszustand keine Umverteilungsvorgänge von abgeschiedenem Öl zu erwarten sind [38, 40]. Steigt die globale Sättigung weiter an, kommt es bedingt durch Umlagerungsvorgänge von bereits abgeschiedenen Ölstrukturen zu größeren lokalen Unterschieden in der Sättigung und mittlere Ölschichtdicken lassen sich nur noch schwer abschätzen. Differenzen zwischen lokaler und globaler Sättigung sind ab diesem Sättigungszustand nicht mehr ausschließlich durch die untere Auflösungs Grenze des μ -CTs zu erklären.

Starke Fluktuationen der lokalen Sättigung aufgrund von Umlagerungsprozessen lassen sich insbesondere bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$ (siehe Abbildung 3.4) beobachten. Daher sind für diesen Beladungszustand fünf μ -CT Aufnahmen angefertigt und ausgewertet worden. Sowohl für Probenausschnitt F (Aufnahmen 10 und 11) als auch für Probenausschnitt G (Aufnahmen 12, 13 und 14) lassen sich starke Unterschiede in der lokalen Sättigung beobachten, welche von $0,057 \leq S_{\text{lokal}} \leq 0,394$ reichen. In Abbildung 3.7 sind exportierte Bilder der segmentierten μ -CT Aufnahmen 10 und 11 aus der Dragonfly[®] Software dargestellt.

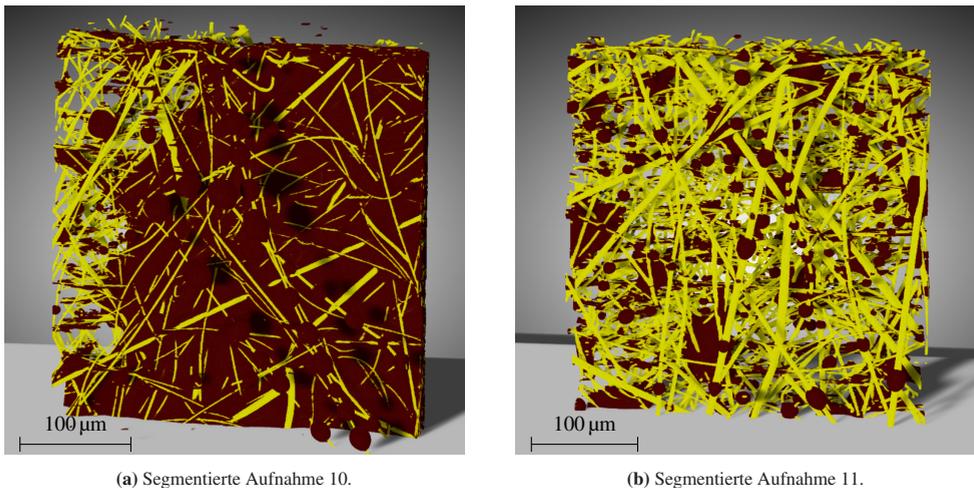


Abbildung 3.7: Wirrfaserschichten mit einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$ und lokalen Sättigungen von (a) $S_{\text{lokal}} = 0,394$ und (b) $S_{\text{lokal}} = 0,057$. Blick in Durchströmungsrichtung. Öl ist in brauner, Mikroglasfasern sind in gelber, und PET-Fasern in grüner Farbe gekennzeichnet. Ölbeladungsrate $204 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ und Anströmgeschwindigkeit 25 cm s^{-1} ; nach Straube et al. [68].

Die μ -CT Aufnahmen 10 und 11 verdeutlichen, dass es starke Schwankungen der lokalen Sättigung gibt. Die Aufnahmen sind vom gleichen Probenausschnitt aufgenommen. Dies zeigt, dass

bei hohen Sättigungen lokal Bereiche ausgebildet werden, bei denen einerseits die Anströmseite der Faservliese fast vollständig mit Öl gesättigt ist (vgl. Abschnitt 3.6) und andererseits lokale Bereiche vorzufinden sind, welche kaum gesättigt sind. Es ist wahrscheinlich, dass diese schwach gesättigten Bereiche besonders relevant für die Durchströmung des Aerosols durch die Faserschichten sind.

Da bereits bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$ größere, fast vollständig mit Öl blockierte Bereiche mit dem μ -CT identifizierbar sind, erfolgen keine weiteren μ -CT Untersuchungen an höheren Beladungszuständen. Es ist davon auszugehen, dass sich bei Beladungszuständen von $S_{\text{global}} > 0,20$ mit dem μ -CT vermehrt Bereiche finden lassen, welche vollständig mit Öl gesättigt und weniger Bereiche, welche schwach gesättigt sind (hauptsächlich für die Durchströmung des Aerosols relevant). Daher ist von weiteren μ -CT Messungen bei Sättigungszuständen von $S_{\text{global}} > 0,20$ nur ein geringer Erkenntnisgewinn zu erwarten.

3.3 Identifizierung von abgeschiedenen Ölstrukturen

Um unterschiedliche Sättigungszustände hinsichtlich abgeschiedener Ölstrukturen vergleichen zu können, ist eine Klassifizierung dieser abgeschiedenen Ölobjekte von entscheidender Bedeutung. Basierend auf den Ölbeladungszeiten bzw. globalen Sättigungen, den Größen und Sphäritäten der abgeschiedenen Ölobjekte, werden diese in vier Klassen eingeteilt. Die Erläuterung der Kriterien ist Gegenstand dieses Abschnitts. Dazu wird eine in dieser Arbeit neu entwickelte Routine vorgestellt, welche es ermöglicht, zwischen folgenden Ölstrukturen zu unterscheiden:

- *Segmentierungsartefakte*: Ölobjekte, welche resultierend aus der Segmentierung nur auf einzelnen Schnittbildern beobachtbar sind. Diese befinden sich größtenteils weit entfernt von Filterfasern und sind nur wenige Voxel groß
- *Kleine Ölstrukturen*: kleine Ölobjekte, welche sich auf Fasern oder an Faserkreuzungen befinden, jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Oberfläche der Fasern und damit die Abscheidung ausüben
- *Öltropfen*: einzelne, meist sphärische Tropfen welche die Fasern umschließen
- *Ölsegel*: große, vollständig mit Öl gesättigte Bereiche zwischen benachbarten Fasern

Die nachfolgend vorgestellten Kriterien wurden durch manuelle Verifikation von identifizierten Ölobjekten nach der Segmentierung von hochauflösenden μ -CT Aufnahmen definiert. Dabei

wurden Aufnahmen sowohl mit hoher Ölbeladung als auch niedriger Ölbeladung ausgewertet. Die Wahl der Kriterien erfolgte subjektiv, mit dem Ziel, den Anteil an falsch klassifizierten Öl-objekten pro Klasse so gering wie möglich zu halten.

Bei der Verifikation der μ -CT Aufnahmen wurde festgestellt, dass Ölobjekte mit einem geringen Volumen (≤ 200 Voxel) zum Großteil der Klasse *Segmentierungsartefakte* zugeordnet werden können. Ab einem Volumen > 200 Voxel sind abgeschiedene Ölstrukturen auf Fasern oder an Faserkreuzungen zu beobachten. Diese Objekte werden der Klasse *kleine Ölstrukturen* zugeordnet. Ölobjekte mit einem minimalen Feret Durchmesser $\geq 2,4 \mu\text{m}$ bzw. $\geq 2,7 \mu\text{m}$, abhängig von der globalen Sättigung, werden je nach Sphärizität entweder in die Klasse *Öltröpfen* oder *Ölsegel* eingeteilt. Objekte mit hoher Sphärizität sind als Tropfen zu zählen (hauptsächlich kugelförmig aufgrund ihrer Wechselwirkung mit der Faseroberfläche der oleophilen Fasern) und die verbleibenden Objekte als Ölsegel. In Tabelle 3.3 sind die Kriterien für die Einteilung der abgeschiedenen Ölobjekte zusammengefasst.

Tabelle 3.3: Einteilungskriterien für abgeschiedene Ölstrukturen abhängig von deren Volumen, dem min. Feret Durchmesser und der Sphärizität in die Klassen Segmentierungsartefakte, kleine Ölstrukturen, Öltröpfen und Ölsegel.

Identifizierte Objekte	Volumen [Voxel]	min. Feret Durchmesser $x_{\text{Feret,min}} / [\mu\text{m}]$	Sphärizität $\Psi / [-]$
$S_{\text{global}} = 0,02 \text{ \& } 0,04$			
Artefakte	≤ 200		
Kleine Ölstrukturen	> 200	$< 2,4$	
Öltröpfen	> 200	$\geq 2,4$	$> 0,76$
Ölsegel	> 200	$\geq 2,4$	$\leq 0,76$
$S_{\text{global}} = 0,06, 0,10 \text{ \& } 0,20$			
Artefakte	≤ 200		
Kleine Ölstrukturen	> 200	$< 2,7$	
Öltröpfenkriterium I	> 200	$2,7 \leq x_{\text{Feret,min}} \leq 4,4$	$> 0,8$
Öltröpfenkriterium II	> 200	$> 4,4$	$> 0,73$
Ölsegel	> 200	$2,7 \leq x_{\text{Feret,min}} \leq 4,4$	$\leq 0,8$
	> 200	$> 4,4$	$\leq 0,73$

Für alle untersuchten Sättigungszustände werden Ölobjekte mit einem Gesamtvolumen ≤ 200 Voxel als Segmentierungsartefakte gelabelt. Für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,02$ und $0,04$ werden identifizierte Ölobjekte mit einem Volumen > 200 Voxel und einem minimalen Feret

Durchmesser $x_{\text{Feret,min}} < 2,4 \mu\text{m}$ als kleine Ölstrukturen eingeordnet. Ölobjekte mit einem minimalen Feret Durchmesser von $x_{\text{Feret,min}} \geq 2,4 \mu\text{m}$ lassen sich abhängig von der Sphärizität entweder als Öltropfen ($\Psi > 0,76$) oder für $\Psi \leq 0,76$ als Ölsegel klassifizieren.

Für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,06, 0,10$ und $0,20$ werden Ölobjekte bis zu einem minimalen Feret Durchmesser von $x_{\text{Feret,min}} < 2,7 \mu\text{m}$ als kleine Ölstrukturen eingeordnet. Zur Identifizierung von Öltropfen werden zwei Kriterien eingeführt, um den Anteil an falsch klassifizierten Öltropfen so gering wie möglich zu halten. Ölobjekte mit einem minimalen Feret Durchmesser zwischen $2,7 \leq x_{\text{Feret,min}} \leq 4,4 \mu\text{m}$ und einer Sphärizität $> 0,8$ werden als Öltropfen klassifiziert (Öltropfenkriterium I), sowie Ölobjekte mit einem minimalen Feret Durchmesser $x_{\text{Feret,min}} > 4,4 \mu\text{m}$ und einer Sphärizität $\Psi > 0,73$ (Öltropfenkriterium II). Ölobjekte in den jeweiligen Größenbereichen mit geringerer Sphärizität lassen sich der Klasse Ölsegel zuordnen.

Die vorgestellten Kriterien wurden, wie bereits erwähnt, durch manuelle Betrachtung der Ölobjekte der Aufnahmen 2, 4, 5, 8 und 10 (sowohl niedrige als auch hohe Beladungszustände) festgelegt. Durch die präsentierten Kriterien ist es möglich, den Fehler von falsch klassifizierten Objekten so gering wie möglich zu halten. Es erfolgt ausschließlich die Betrachtung von Ölobjekten im erweiterten Referenzvolumen (definiertes Volumen inklusive Ölstrukturen auf abstehenden Fasern auf Anström- und Abströmseite der Faservliese). Dabei ist besonderes Augenmerk auf die Identifizierung von Öltropfen zu legen, da diese von teilweise sphärisch erscheinenden Strukturen, wie Ölsegel zwischen Fasern, schwer zu unterscheiden sind. Vor allem für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,06$ weisen Ölstrukturen zwischen Fasern eine erhöhte Sphärizität auf. Mit zunehmender Beladungszeit bilden sich zwischen Fasern komplexere Strukturen aus. Es kommt zu einer Reduktion der Sphärizität von kleinen Ölstrukturen und Ölsegeln, wodurch eine Anpassung der Kriterien zur Identifikation von abgeschiedenen Öltropfen vorzunehmen ist. Mit den vorgestellten Kriterien können die abgeschiedenen Ölstrukturen zuverlässig klassifiziert werden. Anzahlbezogen sind die meisten falsch klassifizierten Objekte (durch manuelle Verifikation) in der Klasse Öltropfen zu finden (10 - 20 %). Mit einem Fehler von maximal 20 % erreicht die vorgestellte Routine dennoch eine akzeptable Genauigkeit für den Vergleich unterschiedlicher Ölstrukturen von unterschiedlichen Beladungszuständen.

Es ist zu beachten, dass für eine spätere Analyse der abgeschiedenen Öltropfen alle Ölobjekte, welche die Grenzfläche des erweiterten Referenzvolumens (blaue und orangene Box, siehe Abbildung 3.3c) schneiden oder berühren, verworfen werden müssen. Somit kann ein systematisches Unterschätzen der Tropfengröße, aufgrund von angeschnittenen Tropfen an den Grenzflächen der virtuellen Box des erweiterten Referenzvolumens, ausgeschlossen werden. Stattdessen lassen sich angeschnittene Tropfen, abhängig vom minimalen Feret Durchmesser, als kleine Ölstrukturen oder Ölsegel klassifizieren. Generell ist die Anzahl der Tropfen, die an Grenzflächen

in erweiterten Referenzvolumina angeschnitten werden, im Vergleich zur Gesamtzahl der Tropfen in diesen Volumina gering ($< 10\%$).

Der Vergleich von identifizierten Ölmengenanteilen ist Gegenstand vom nachfolgenden Abschnitt.

3.4 Vergleich von Ölmengenanteilen bei unterschiedlicher Sättigung

In diesem Abschnitt werden die identifizierten Ölmengenanteile, welche mit Hilfe der entwickelten und vorgestellten Routine in Abschnitt 3.3 bestimmt wurden, bei unterschiedlichen Ölsättigungszuständen verglichen. Abbildung 3.8 zeigt einen Vergleich der Ölmengenanteile der untersuchten Beladungszustände ($0,02 \leq S_{\text{global}} \leq 0,20$) hinsichtlich deren Anzahl und Masse.

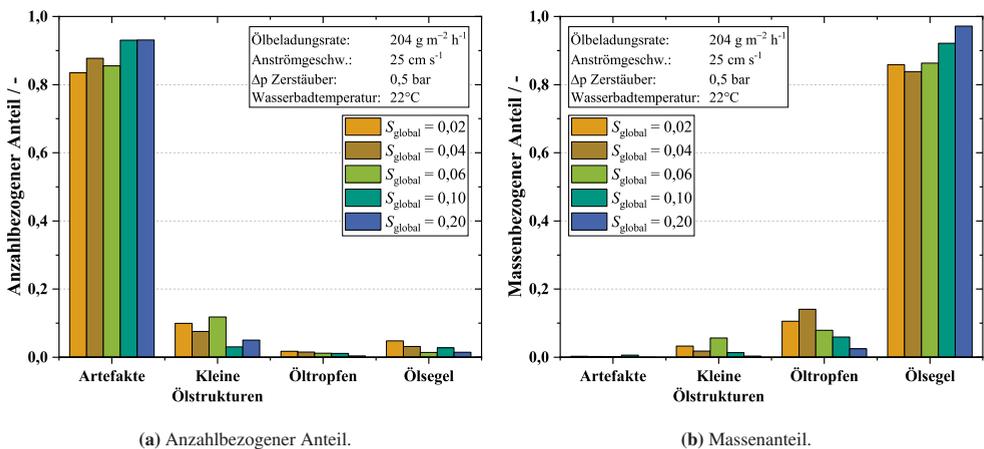


Abbildung 3.8: (a) Anzahl- und (b) massenbezogene Ölmengenanteile der untersuchten Beladungszustände; nach Straube et al. [68].

Anzahlbezogen werden die meisten Ölobjekte nach der Segmentierung als Artefakte identifiziert (teilweise über 10.000 Objekte je Aufnahme). Bezogen auf die abgeschiedene Ölmasse, ist dieser Anteil jedoch vernachlässigbar klein. Der Großteil der Ölmasse ist, unabhängig vom Beladungszustand, in Form von Ölsegeln vorhanden ($> 80 \text{ ma.-%}$). Für eine globale Sättigung von $0,02 \leq S_{\text{global}} \leq 0,06$ ist der Massenanteil an Ölsegeln in etwa konstant. Steigt S_{global} weiter an, steigt auch der Massenanteil an Ölsegeln leicht an, wobei der anzahlbezogene Anteil leicht sinkt. Etwa 5 - 15 ma-% des Öls liegt in Tropfenform vor. Nach einem anfänglichen Anstieg des Massenanteils der Öltröpfen von $S_{\text{global}} = 0,02$ auf $S_{\text{global}} = 0,04$, sinkt dieser kontinuierlich bis

$S_{\text{global}} = 0,20$ ab. Nur eine sehr geringe Ölmasse ist in Form von kleinen Ölstrukturen auf Fasern oder an Faserkreuzungen vorhanden (< 5 ma.-%). Ein eindeutiger Trend des anzahl- und masenbezogenen Anteils von kleinen Ölstrukturen kann mit zunehmender globaler Sättigung nicht beobachtet werden. Es ist zu beachten, dass der prozentuale Anteil der Tropfen an der Gesamtmasse an Öl mit zunehmender Sättigung sinkt, aber aufgrund der zeitlich zunehmenden Ölmenge dies nicht bedeutet, dass auch die absolute Menge des Öls in Tropfenform abnimmt.

3.5 Vergleich von Öltropfenkonzentrationen und -verteilungen

Um Tropfenkonzentrationen unterschiedlicher μ -CT Aufnahmen vergleichen zu können, müssen die Tropfen einer jeden Aufnahme auf ein Referenzvolumen bezogen werden. Daher werden die identifizierten Tropfen eines jeden Scans auf das Referenzvolumen zur Berechnung der lokalen Porosität bezogen (siehe Abbildung 3.3b). Zusätzlich müssen Fehler durch Verwurf von angeschnittenen Tropfen von jedem Referenzvolumen Berücksichtigung bei der Betrachtung der Tropfenkonzentrationen finden. Hierfür muss das Referenzvolumen korrigiert werden. Da alle Öltropfen in Durchströmungsrichtung (d_{Quader}) im erweiterten Referenzvolumen inkludiert werden, muss nur die Höhe (h_{Quader}) und die Länge (l_{Quader}) des Referenzvolumens für jede Klasse i nach Formel 3.12 korrigiert werden.

$$V_i = d_{\text{Quader}} (h_{\text{Quader}} - x_i) (l_{\text{Quader}} - x_i) \quad (3.12)$$

Das Referenzvolumen V_i wird hierbei für jede Klasse i mit dem Durchmesser x_i (vereinfacht als Intervallmitte der Intervallklasse i) für jede Tropfenanzahl einer Klasse i angepasst. Durch diese Korrektur des Referenzvolumens können Tropfenkonzentrationen unterschiedlicher Scangrößen (variiert leicht für jede Aufnahme) verglichen werden. Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Betrachtungen der Tropfenkonzentration beleuchtet. Zum einen werden die Tropfenkonzentrationen auf das Referenzvolumen bezogen. Dies berücksichtigt jedoch nicht, dass bei hohen Sättigungen ein signifikanter Anteil der Faseroberfläche und des freien durchströmbaren Volumens der Wirrfaserschichten durch akkumuliertes Öl (hauptsächlich Ölsegel) blockiert ist. Daher wird in einer zweiten Betrachtung eine Tropfenkonzentration auf Basis des freien, nicht durch Öl blockierten Referenzvolumens (**freies Referenzvolumen**) berechnet. Dabei wird die Tropfenanzahl je Aufnahme auf das Volumen der Luft im Referenzvolumen bezogen, also abzüglich des Volumens an Ölsegeln, kleinen Ölstrukturen, Artefakten und Fasern. Einflüsse der Sättigung

auf die Tropfenkonzentration lassen sich somit reduzieren. Die Gesamtanzahl- und Gesamtmasskonzentrationen der abgeschiedenen Öltropfen bezogen auf das Referenzvolumen sowie das freie Referenzvolumen sind in Abbildung 3.9 dargestellt.

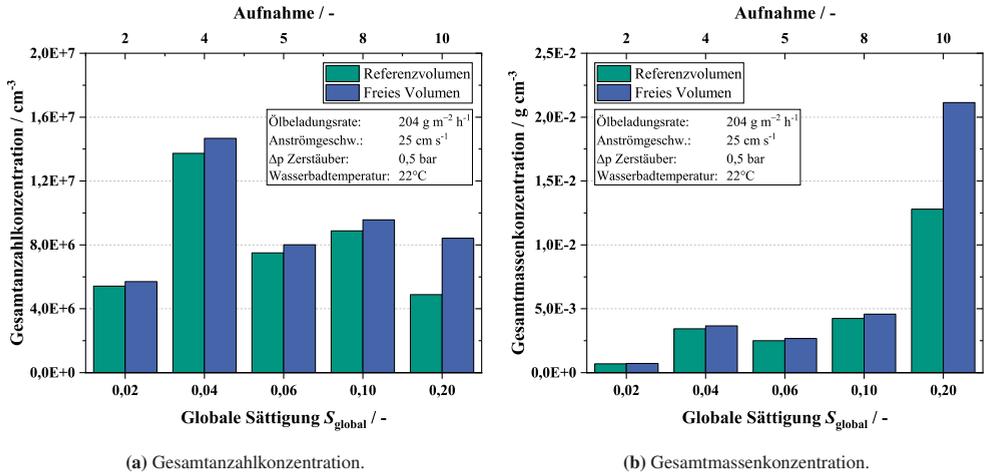


Abbildung 3.9: (a) Gesamtanzahl- und (b) Gesamtmasskonzentration der abgeschiedenen Öltropfen bezogen auf das Referenzvolumen, welches die Wirrfaserschichten auf den μ -CT Aufnahmen umschließt, sowie das freie nicht durch Öl blockierte Referenzvolumen; nach Straube et al. [68].

Die höchste Anzahlkonzentration an abgeschiedenen Öltropfen bezogen auf das Referenz- bzw. freie Referenzvolumen ist für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,04$ zu finden. Die geringste Tropfenanzahlkonzentration in Bezug auf das Referenzvolumen findet sich für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,02$ und $S_{\text{global}} = 0,20$. Aufnahme 5 und 8 ($S_{\text{global}} = 0,06$ und $S_{\text{global}} = 0,10$) zeigen ähnliche Anzahlkonzentrationen auf. Die größte Änderung der Tropfenanzahlkonzentration durch Korrektur des Bezugsvolumens ist für die höchste globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$ zu beobachten. Bei dieser Aufnahme (Aufnahme 10) beträgt die lokale Sättigung $S_{\text{lokal}} = 0,394$, wodurch die Tropfenanzahlkonzentration um ca. 70 % erhöht wird. Ein eindeutiger Trend der Anzahlkonzentration der abgeschiedenen Öltropfen bezogen auf das Referenz- bzw. freie Referenzvolumen ist jedoch nicht erkennbar.

Bei Betrachtung der Masskonzentrationen fällt auf, dass nahezu keine Unterschiede zwischen den globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,04$, $0,06$ und $0,10$ zu beobachten sind. Bei der niedrigsten untersuchten globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,02$ ist die Masskonzentration an gebildeten Öltropfen am geringsten. Für die höchste globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$ ist eine deutlich erhöhte Masskonzentration zu erkennen. Bezogen auf das freie Referenzvolumen wird diese nochmals signifikant erhöht. Eine geringe Anzahlkonzentration bei gleichbleibend hoher Masskonzentration der Öltropfen von Aufnahme 10 ($S_{\text{global}} = 0,20$) ist ein Indikator für weniger

Öltropfen in kleinen Größenklassen, im Vergleich zu den anderen Beladungszuständen. Aus diesem Grund werden in einem nächsten Schritt die Größenverteilungen sowohl anzahl- (q_0 und Q_0) als auch massenbezogen (q_3 und Q_3) für jede Größenklasse verglichen (siehe Abbildung 3.10).

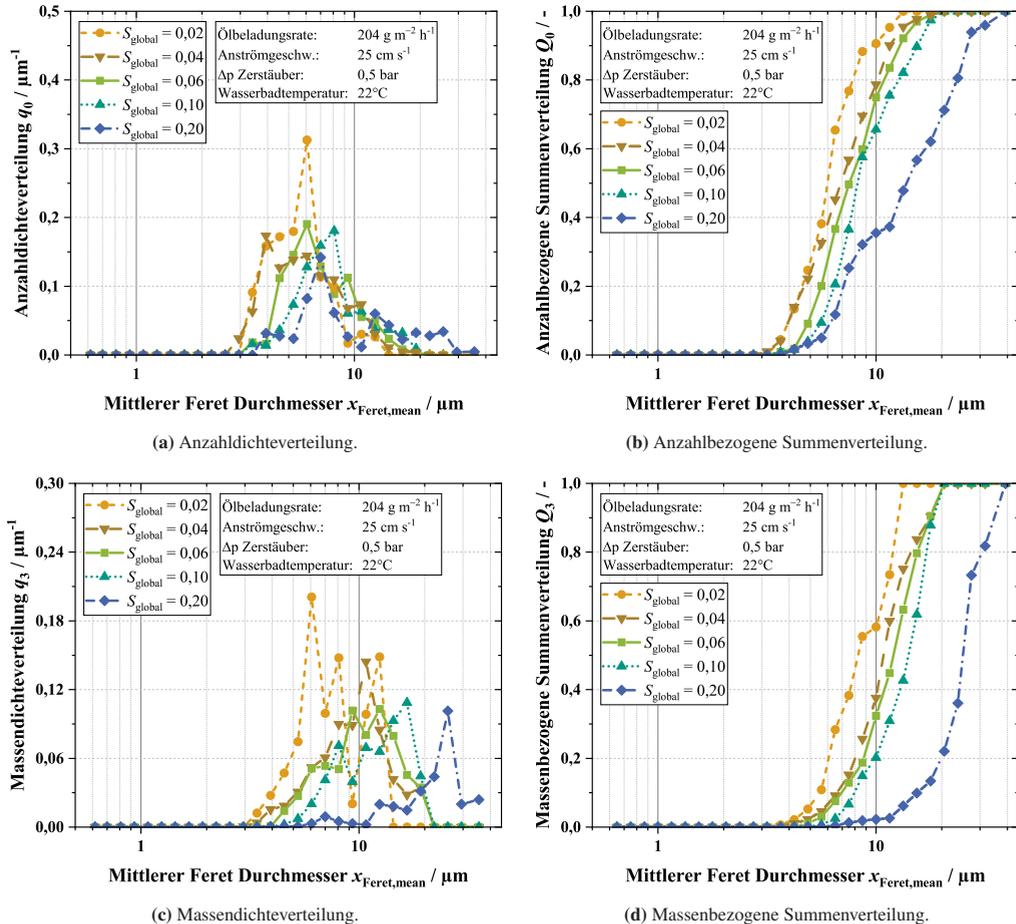


Abbildung 3.10: Anzahl- und massenbezogene Tropfengrößenverteilungen in differentieller Darstellung und als Summenverteilung der abgeschiedenen Öltropfen für unterschiedliche Ölbeladungszeiten; nach Straube et al. [68].

Die Tropfengrößenverteilungen sind jeweils über dem mittleren Feret Durchmesser $x_{\text{Feret,mean}}$ aufgetragen, welcher sich aus der verwendeten Dragonfly[®] Software exportieren lässt. Bei Betrachtung von Abbildung 3.10a und 3.10b fällt auf, dass der Tropfendurchmesser mit zunehmender Sättigung ansteigt. Für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,02$ und $0,04$ (orangene und

braune Kurve) ist ein identischer Anstieg der Verteilung bis zu einem mittleren Feret Durchmesser von etwa $4\ \mu\text{m}$ zu beobachten. Dies lässt sich mit der unteren Auflösungsgrenze des $\mu\text{-CTs}$ erklären. Ölstrukturen kleiner als $2\ \mu\text{m}$ sind selbst bei höchster Auflösung nur schwer zu identifizieren. Für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,10$ ist zu beachten, dass dieser Scan (Aufnahme 8) eine doppelte Voxelgröße (Binning 2) im Vergleich zu den anderen Sättigungszuständen in Abbildung 3.10 aufweist. Dadurch ist die Auflösungsgrenze niedriger und Tropfen kleiner $5\ \mu\text{m}$ sind nur schwierig zu segmentieren und zu identifizieren. Trotzdem lässt sich auch diese Aufnahme gut mit den untersuchten Binning 1 Aufnahmen vergleichen. Der Trend zu größeren Tropfen bei zunehmender globaler Sättigung ist klar erkennbar. Für globale Sättigungen von $0,02 \leq S_{\text{global}} \leq 0,10$ sind Tropfen mit einer Größe von bis zu $20\ \mu\text{m}$ zu finden, bei der höchsten globalen Sättigung ($S_{\text{global}} = 0,20$) bis zu $35\ \mu\text{m}$.

Bei Betrachtung der Massendichteverteilung q_3 (Abbildung 3.10c) ist erkennbar, dass sich der Großteil der Öltropfenmasse für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,02$ bei einem Tropfendurchmesser von ca. $6\ \mu\text{m}$ befindet. Bei steigender globaler Sättigung ($S_{\text{global}} = 0,04$ und $0,06$) verschiebt sich der Modalwert zu etwa $10\ \mu\text{m}$. Für $S_{\text{global}} = 0,10$ lässt sich ein Modalwert von $16\ \mu\text{m}$ feststellen und bei $S_{\text{global}} = 0,20$ von $25\ \mu\text{m}$. Im Hinblick auf die q_3 -Verteilung fällt auf, dass Tropfen nahe der Auflösungsgrenze des $\mu\text{-CTs}$ (kleiner $5\ \mu\text{m}$) in Bezug auf die Massenverteilung nicht von Relevanz sind, da der Großteil der Ölmasse der Öltropfen in höheren Größenklassen zu finden ist. Daher ist bei dieser Betrachtung die limitierte Auflösung von Aufnahme 8 ($S_{\text{global}} = 0,10$, Binning 2) nicht als kritisch anzusehen.

Hinsichtlich der massenbezogenen Summenverteilung Q_3 (Abbildung 3.10d) ist festzustellen, dass sich mit zunehmender globaler Sättigung der Medianwert der Tropfen deutlich zu größeren Tropfendurchmessern verschiebt. Sehr ausgeprägt ist dies bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$ zu erkennen. Diese Erkenntnis stimmt mit der Beobachtung einer hohen Massenkonzentration der Öltropfen bei einer gleichbleibend niedrigen Anzahlkonzentration für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$ überein (vgl. Abbildung 3.9).

Im Folgenden soll eine Primärtropfengröße nach einem Aufbruch eines anfänglichen Ölfilms auf den Fasern aufgrund der Plateau-Rayleigh-Instabilität abgeschätzt werden. Eine Berechnung und damit ein Vergleich zwischen den abgeschiedenen und identifizierten Öltropfengrößen aus diesem Abschnitt mit einer minimalen Öltropfengröße nach einem Aufbruch eines dünnen Ölfilms auf den Filterfasern ist dabei schwierig. In der Literatur finden sich nur sehr begrenzt Arbeiten, welche die Tropfengröße auf Filterfasern nach einem Aufbruch eines anfänglichen, dünnen Ölfilms nach der Plateau-Rayleigh-Instabilität untersuchen. Informationen zu Primärtropfengrößen nach dem Aufbruch eines dünnen Ölfilms, welche abhängig vom Faserdurchmesser sind, konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht gefunden werden. Es finden sich einige wenige und darüber hinaus widersprüchliche Daten über den Abstand von Tropfen auf Fasern nach einem

Aufbruch des Ölfilms. So berichtet Quéré [86] über einen Abstand zwischen den Tropfen nach einem Aufbruch des Ölfilms im Bereich der achsensymmetrischen Wellenlänge eines dünnen Flüssigkeitsfilms auf einer Fasern von

$$l_t = \pi \sqrt{2} x_F \quad (3.13)$$

Mead-Hunter et al. [39] zeigen in ihrer Simulation Abstände zwischen Tropfen nach einem Aufbruch eines dünnen Flüssigkeitsfilms, welche bis zu doppelt so groß sind als von Quéré [86] angegeben. Zusätzlich zeigt diese Simulation, dass Flüssigkeitsfilme auf Fasern bereits wesentlich früher als berechnete Ölschichtdicken nach Mullins & Kasper [38] $d_{\text{Ölschicht,PR}}$ (siehe Formel 3.6) aufbrechen können. Labbé & Duprat [87] hingegen beobachten einen Abstand zwischen Tropfen auf Fasern, welcher im Bereich des Tropfendurchmessers liegt.

Demnach ist auch eine Rückrechnung ausgehend vom Tropfenabstand und der Ölschichtdicke auf eine Tropfengröße nach dem Aufbruch eines Ölfilms schwierig. Für eine einfache Abschätzung müssen hierfür einige Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden, welche starken Einfluss auf eine berechnete Tropfengröße aus der Ölschichtdicke und dem Tropfenabstand nehmen können. Dazu zählen die Annahmen bzw. Vereinfachungen, dass alles Öl aus der Ölschicht um die Fasern sich ideal und ohne Rückstände auf Fasern in entstehenden Öltropfen sammelt und ideal sphärische Tropfen entstehen. Weiterhin wird ein Tropfenabstand nach Quéré [86] von $l_t = \pi \sqrt{2} x_F$ und eine Ölschichtdicke nach Mullins & Kasper [38] von $d_{\text{Ölschicht,PR}}$ angenommen. Zusätzlich wird das Faservolumen, welches von den Öltropfen umschlossen wird, vernachlässigt (Hohlzylinder, welcher die Tropfen „durchbohrt“). Unter diesen Annahmen lässt sich für den kleinsten eingesetzten nominellen Faserdurchmesser von $1,48 \mu\text{m}$ eine Öltropfengröße nach einem Aufbruch des Ölfilms von $x_{t,PR} = 2,79 \mu\text{m}$ bestimmen. Dieser Abschätzung zufolge bestehen gute Chancen, dass alle entstehenden Tropfen nach einem Aufbruch eines anfänglichen Ölfilms auf den Fasern identifiziert werden können, da Tropfen mit einem Durchmesser von ca. $3 \mu\text{m}$ mit dem verwendeten μ -CT gut aufzulösen sind.

Es ist jedoch zu beachten, dass es sich hierbei um eine grobe Abschätzung von Primärtropfen auf Fasern handelt, welche aus Mangel an fundierten experimentellen Daten auf diversen Annahmen beruht (s.o.). Bereits kleine Änderungen des gewählten Tropfenabstandes bzw. der Ölschichtdicke auf den Fasern haben dabei einen großen Einfluss auf die abgeschätzten Tropfengrößen nach einem Aufbruch des Ölfilms. So könnten in weiterführenden Arbeiten die maximalen Ölschichtdicken vor einem Aufbruch in Tropfen bei unterschiedlichen Faserdurchmessern sowie die dann entstehenden Tropfen durch visuelle Beobachtung experimentell erforscht werden. Dabei sollten Form, Größe und Abstand der Tropfen bestimmt und hieraus allgemeingültige Trends abgeleitet

werden. Diese Erkenntnisse könnten in einem nächsten Schritt mit den in dieser Arbeit identifizierten Öltröpfen auf Fasern verglichen werden. Dabei wäre beispielsweise zu evaluieren, ob auch wesentlich kleinere Tropfen nach einem Aufbruch auf den in dieser Arbeit eingesetzten Fasertypen zu finden sein müssten, welche aktuell mit dem μ -CT nicht identifiziert werden können (siehe Ausblick in Abschnitt 5.2).

3.6 Ölverteilung in Durchströmungsrichtung

In diesem Abschnitt wird die Ölverteilung in Richtung der Aerosolströmung für unterschiedliche Sättigungszustände verglichen. In der Literatur finden sich einige Arbeiten, welche sich mit Porositätsprofilen und Volumenanteilen von Fasern in unterschiedlichen Raumrichtungen in Koaleszenzfiltern beschäftigen (z.B. Chaudhuri et al. [88], Charvet et al. [89], Jackiewicz et al. [90], Theron et al. [91] oder Ueda et al. [92]). Über die Ölverteilung in dünnen Wirrfaseranordnungen ist hingegen wenig bekannt. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt die Ölverteilung in Durchströmungsrichtung der Wirrfaseranordnungen mit unterschiedlichen globalen Sättigungen vorgestellt. Hierfür werden die Aufnahmen 2, 4, 5, 8 und 10 ausgewertet, da diese die höchstmögliche Auflösung und beste Qualität aufweisen, um abgelagerte Ölstrukturen bei unterschiedlicher Sättigung zu untersuchen. Durch eine Bestimmung der Ölverteilung in Durchströmungsrichtung ist es möglich, alle Ölstrukturen im erweiterten Referenzvolumen zu berücksichtigen, um relevante Ölsammlungen auf der An- und Abströmseite der Faservliese zu inkludieren (vgl. Abbildung 3.3c).

Experimentell ist es nicht möglich die Wirrfaserschichten im μ -CT sowohl horizontal als auch vertikal perfekt auszurichten, weshalb eine manuelle Korrektur der Ausrichtung nach der Segmentierung stattfindet [89]. Mit Hilfe eines Instruments zur Winkelmessung lässt sich eine Fehlausrichtung der Aufnahmen für jede Achse mit der Dragonfly[®] Software bestimmen. Die Software bietet für eine Korrektur der Achsen jedoch keine passende Lösung an. Aus diesem Grund werden die segmentierten Ölstrukturen binarisiert und als gestapeltes Paket an TIFF-Dateien in *ImageJ* (Entwickler Wayne Rasband, National Institutes of Health, Maryland, USA, Version 1.54f) weiterverarbeitet [93]. Mit Hilfe der Funktion *rotate* werden die x - und y -Achse (vgl. Abbildung 3.3c) ausgerichtet (zwischen 0° und 24°). Da diese Funktion nur die Manipulation dieser Achsen erlaubt, lässt sich zusätzlich die Funktion *TransformJ* verwenden, um die einzelnen Aufnahmen in der z -Achse planar auszurichten [94]. Diese Achse muss für die untersuchten Aufnahmen zwischen 0° und 6° angepasst werden. Im Anschluss lässt sich ein neues Paket an binären 2D Schnittbildern exportieren. Jedes Bild repräsentiert in diesem Paket einen Ausschnitt

der Wirrfaserschichten in Durchströmungsrichtung mit der Dicke eines Voxels. Durch Summieren der Ölvoxel eines jeden Schnittbilds, lässt sich die laterale Ölverteilung bestimmen. Dieser Schritt wird mit Hilfe der Software MATLAB™ (The MathWorks Inc., Natick, USA, Version R2020b) durchgeführt. Durch die beschriebene Herangehensweise ist es möglich, die Ölverteilung in Durchströmungsrichtung für unterschiedliche Aufnahmen, welche eine ungleiche, dreidimensionale Ausrichtung aufweisen, zu vergleichen.

In Abbildung 3.11 sind die Ölmengeanteile in Durchströmungsrichtung für die untersuchten Sättigungszustände über der relativen Dicke der Faservliese aufgetragen. Einzelne Ölstrukturen auf Fasern, welche aus dem dichter gepackten Bereich der Faserschichten herausragen, werden für einen besseren Vergleich der einzelnen Beladungszustände nicht berücksichtigt, da deren Beitrag zum Gesamtvolumen des Öls als vernachlässigbar anzusehen ist.

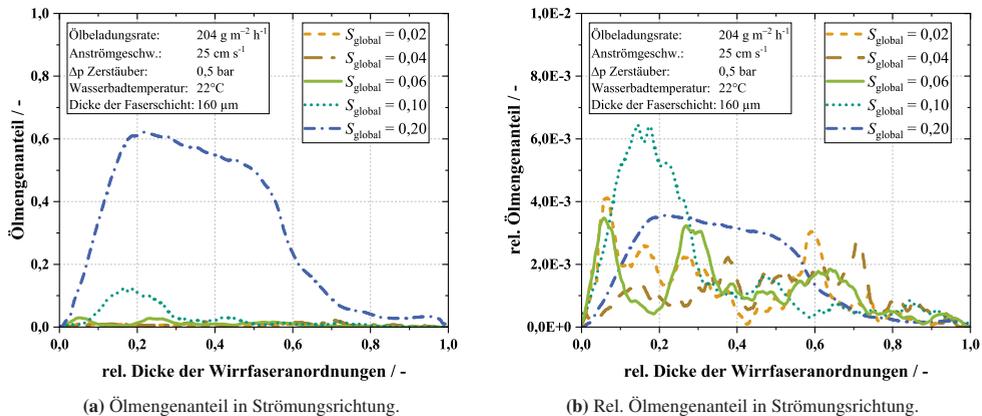


Abbildung 3.11: (a) Ölmengeanteil und (b) relativer Ölmengeanteil in Durchströmungsrichtung; nach Straube et al. [68].

In Abbildung 3.11a ist deutlich zu erkennen, dass die abgeschiedene Ölmenge der Sättigungszustände $S_{\text{global}} = 0,02$, $0,04$ und $0,06$ wesentlich geringer ist als die Ölmenge bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,10$ bzw. $0,20$. Zudem lassen sich keine Aussagen über den Ort der Abscheidung für globale Sättigung von $S_{\text{global}} \leq 0,06$ treffen, da diese Graphen in Abbildung 3.11a kaum zu erkennen sind. Aus diesem Grund ist die relative Ölmenge in Durchströmungsrichtung in Abbildung 3.11b dargestellt.

Aus dieser Darstellungsform geht hervor, dass der Großteil des abgeschiedenen Öls in den ersten 80 % der Wirrfaserschichten in Strömungsrichtung zu finden ist, unabhängig vom Sättigungszustand. Die abscheiderrelevanten Fasern finden sich bei den verwendeten Wirrfaservliesen bis zu einer Tiefe von etwa 130 μm in Durchströmungsrichtung. Die verwendeten Wirrfaserschichten verfügen demnach über eine ausreichende Dicke, um die ersten Faserlagen der ersten Filterlage

eines mehrlagigen Filtersandwiches abzubilden. Daher gilt auch für die verwendeten Faservliese dieser Arbeit, dass die ersten Faserlagen von besonderer Relevanz für die Abscheidung von Ölnebel sind, analog zu mehrlagigen Filtern [7, 11, 12, 16].

3.7 Gasgeschwindigkeitseinfluss auf abgeschiedene Ölstrukturen ³

Bei steigender Filteranströmgeschwindigkeit steigt die Abscheidung großer Tropfen im Bereich der Trägheitsabscheidung, da diese den Stromlinien der Luft um eine Faser nicht mehr folgen können. Gleichzeitig sinkt die Abscheidung durch Diffusion, also für kleine Tropfen, da die Verweilzeit im Filtermedium abnimmt. [95]

Es ist demnach möglich, dass unterschiedliche Filteranströmgeschwindigkeiten einen Einfluss auf die Form der abgeschiedenen Ölstrukturen auf oder zwischen den Filterfasern ausüben. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt auf einen möglichen Gasgeschwindigkeitseinfluss auf abgeschiedene Ölstrukturen eingegangen.

Hierfür wird eine Beladungsdauer von 3 min bei einer Anströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1} als Referenz gewählt. Die globale Sättigung beträgt für diesen Betriebspunkt $S_{\text{global}} = 0,06$. Ausgehend von dieser mittleren Anströmgeschwindigkeit wird eine niedrigere Gasgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} und eine höhere Gasgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} für den Vergleich der Ölstrukturen ausgewählt. Im Gasgeschwindigkeitsbereich von $10 - 40 \text{ cm s}^{-1}$ werden hauptsächlich Ölnebel filter industriell eingesetzt [5, 44, 96]. Um gebildete Ölstrukturen bei variierenden Gasgeschwindigkeiten vergleichen zu können, ist es notwendig, die globale Sättigung konstant zu halten. Der Differenzdruck über dem Zerstäuber wird für eine gleichbleibende Ölbeladungsrate von $204 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ auf 0,5 bar bei einer Wasserbadtemperatur von 22°C gehalten. Durch Variation der Mischluft in der Mischkammer (partikelfreie Druckluft) wird die Filteranströmgeschwindigkeit reguliert. Durch diese Maßnahmen wird der Massenstrom an generiertem Öl konstant gehalten, die Ölkonzentration nimmt hingegen mit zunehmender Filteranströmgeschwindigkeit ab. Für eine Gasgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} müssen die untersuchten Wirrfaseranordnungen ca. 3,6 min und für eine Gasgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} ca. 2,6 min für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,06$ mit Ölnebel beladen werden. Eine verringerte Ölbeladungszeit mit steigender Gasgeschwindigkeit kann mit einer Zunahme der Trägheitsabscheidung erklärt werden [95].

³ Teile dieses Abschnitts sind in Straube et al. [59] publiziert.

Für eine Anströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1} werden Aufnahme 5 und 7 herangezogen. Zusätzlich wird ein Probenausschnitt bei einer Anströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} (Probenausschnitt H) und ein Probenausschnitt bei 40 cm s^{-1} (Probenausschnitt I), jeweils mit einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,06$, mit dem μ -CT untersucht. Es werden zwei Aufnahmen von Probenausschnitt H (10 cm s^{-1}) und drei Aufnahmen von Probenausschnitt I (40 cm s^{-1}) angefertigt. In Tabelle 3.4 ist ein Überblick über die neu aufgenommenen μ -CT Aufnahmen gegeben. Zur Vollständigkeit sind die Aufnahmen 5 und 7 für eine Beladungsdauer von 3 min und einer Filteranströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1} , welche bereits aus Abschnitt 3.1 bekannt sind, zusätzlich aufgeführt.

Tabelle 3.4: Übersicht über Parameter und Ergebnisse der durchgeführten μ -CT Aufnahmen zum Einfluss der Gasgeschwindigkeit auf abgeschiedene Ölstrukturen.

Anströmgeschw.	Aufnahme	Probenausschnitt	Binning	Beleuchtungszeit	Voxelgröße	Φ_{lokal}	S_{lokal}
	[-]	[-]	[-]	[s]	[nm]	[-]	[-]
10 cm s^{-1}	15	H	2	6	399,2	0,950	0,040
	16	H	2	5,5	399,2	0,977	0,030
25 cm s^{-1}	5	C	1	25	193,5	0,971	0,025
	7	D	1	20	186,7	0,967	0,037
40 cm s^{-1}	17	I	1	19	186,6	0,969	0,058
	18	I	1	19	186,6	0,961	0,043
	19	I	1	22	186,6	0,970	0,036

Die Aufnahmen für eine Anströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} wurden bei einem Binning 2 durchgeführt, für 40 cm s^{-1} bei Binning 1. Dennoch weisen Aufnahmen 15 und 16 eine ausreichend gute Qualität auf, um abgeschiedene Ölstrukturen im Detail zu analysieren.

Lokale und globale Porosität stimmen bei den Aufnahmen 5 und 7 (25 cm s^{-1}) sowie 15 - 19 (10 cm s^{-1} und 40 cm s^{-1}) sehr gut überein. Die in diesem Abschnitt neu ermittelte lokale Porosität für die Aufnahmen 15 - 19 beträgt im Mittel $\bar{\Phi}_{\text{lokal}} = 0,965$ (Standardabweichung $\pm 0,0092$), die bereits bekannte globale Porosität der Wirrfaserschichten beträgt $\Phi_{\text{global}} = 0,959$ (siehe Abschnitt 2.1.1).

Die lokale Sättigung der Aufnahmen 15 - 19 liegt zwischen 0,030 und 0,058. Im Mittel beträgt die lokale Sättigung $\bar{S}_{\text{lokal}} = 0,041$ (Standardabweichung $\pm 0,0094$) und ist damit in etwa 34 % geringer als die globale Sättigung. Analog zu den Aufnahmen 5 und 7 (25 cm s^{-1}) lässt sich eine niedrigere lokale Sättigung im Vergleich zur globalen Sättigung mit der limitierten Auflösung des

μ -CTs und lokalen Umlagerungsvorgängen von abgeschiedenem Öl erklären. Ölstrukturen kleiner als $2\ \mu\text{m}$ sind demnach nur schwer zu identifizieren und zu analysieren (siehe Abschnitt 3.2). Identisch zur entwickelten und vorgestellten Routine in Abschnitt 3.3 (Tabelle 3.3) werden die mit dem μ -CT identifizierten Ölstrukturen nach dem Kriterium für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,06$ in Segmentierungsartefakte, kleine Ölstrukturen, Öltröpfen und Ölsegel eingeteilt. Ein Vergleich der anzahl- und massenbezogenen Ölmengenanteile ist in Abbildung 3.12 dargestellt.

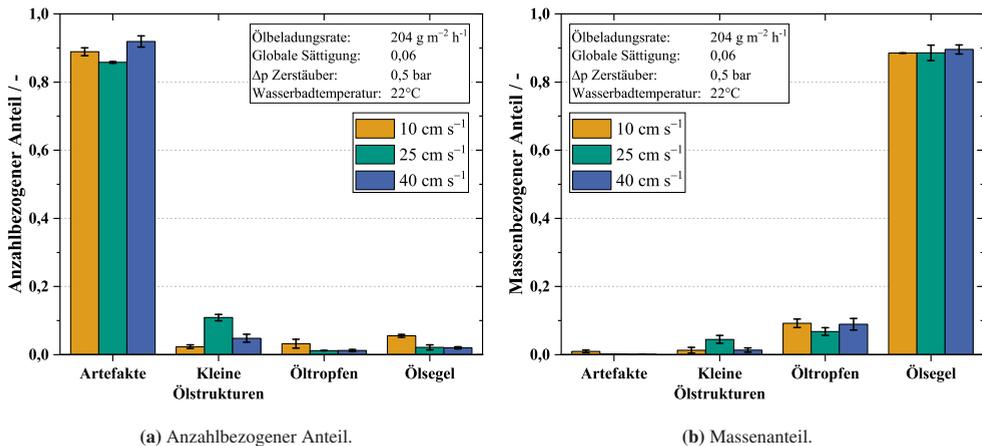


Abbildung 3.12: (a) Anzahl- und (b) massenbezogene Ölmengenanteile für Filteranströmgeschwindigkeiten von 10, 25 und $40\ \text{cm s}^{-1}$; nach Straube et al. [59].

Parallel zu den bereits vorgestellten anzahlbezogenen Ölmengenanteilen bei unterschiedlichen globalen Sättigungen (siehe Abbildung 3.8a), ist auch bei der Variation der Filteranströmgeschwindigkeit der anzahlbezogene Großteil der identifizierten Ölstrukturen (ca. 85 %) in Form von Segmentierungsartefakten zu finden, wohingegen der anzahlbezogene Anteil an kleinen Ölstrukturen, Öltröpfen und Ölsegel wesentlich geringer ausfällt (Abbildung 3.12a). In den einzelnen Klassen sind nur geringe Unterschiede durch die variierenden Filteranströmgeschwindigkeiten zu erkennen. Einzig für eine Filteranströmgeschwindigkeit von $25\ \text{cm s}^{-1}$ sind im Vergleich zu $10\ \text{cm s}^{-1}$ und $40\ \text{cm s}^{-1}$ etwas weniger Segmentierungsartefakte und dafür vermehrt kleine Ölstrukturen zu finden. Dieser Unterschied kann auf die geringe, zur Verfügung stehende Anzahl an Proben zurückgeführt werden. Wird der massenbezogene Anteil der identifizierten und klassifizierten Ölmengenanteile betrachtet (Abbildung 3.12b), lassen sich nur marginale Unterschiede innerhalb der einzelnen Klassen für die unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeiten feststellen. Massenbezogen ist der Großteil des abgeschiedenen Öls in Form von Ölsegeln ($> 80\ \text{ma.-%}$), gefolgt von Öltröpfen, kleinen Ölstrukturen und nur sehr geringen Anteilen an

Artefakten zu finden. Auch hier sei bei den beobachteten geringfügigen Schwankungen der massenbezogenen Anteile an kleinen Ölstrukturen und Öltropfen auf den geringen Probenumfang verwiesen. Dennoch lassen sich aus den anzahl- und massenbezogenen Anteilen der abgeschiedenen Ölstrukturen keine als signifikant zu betrachtende Unterschiede aufgrund einer Variation der Anströmgeschwindigkeit im Bereich $10 - 40 \text{ cm s}^{-1}$ beobachten.

Um dies zu verdeutlichen, ist in Abbildung 3.13 exemplarisch für jede Anströmgeschwindigkeit eine Aufnahme eines segmentierten μ -CT Scans abgebildet.

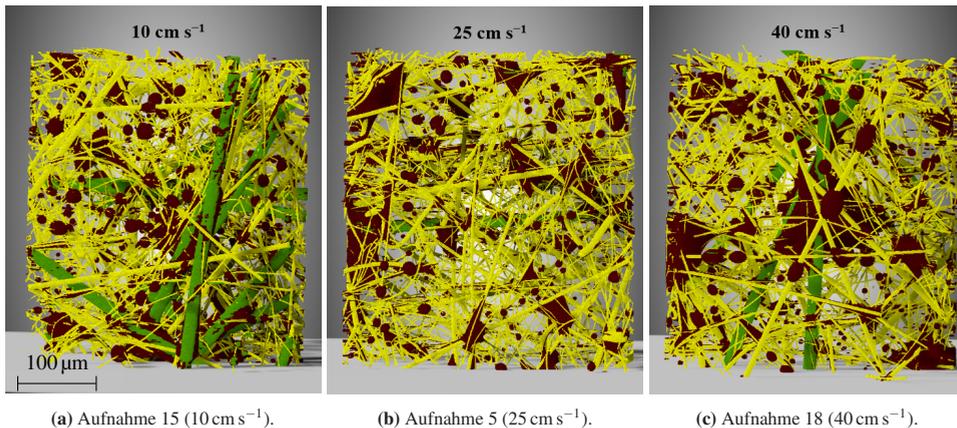


Abbildung 3.13: Exemplarische Fotografien exportiert aus der Dragonfly[®] Software nach der Segmentierung von (a) Aufnahme 15 (10 cm s^{-1}), (b) Aufnahme 5 (25 cm s^{-1}) und (c) Aufnahme 18 (40 cm s^{-1}). Die globale Sättigung beträgt für alle Aufnahmen $S_{\text{global}} = 0,06$. Mikroglasfasern sind in gelber Farbe, PET-Fasern in grüner Farbe und Ölstrukturen in brauner Farbe dargestellt. Blick in Durchströmungsrichtung der Faservliese; nach Straube et al. [59].

In den Abbildungen 3.13a-c lassen sich visuell keine signifikanten Unterschiede bei der Betrachtung der abgeschiedenen Ölstrukturen (braun eingefärbt) für unterschiedliche Filteranströmgeschwindigkeiten feststellen. Auch diese Beobachtung stützt die These, dass die gebildeten Ölstrukturen auf den Wirrfaseranordnungen unabhängig von variierenden Anströmgeschwindigkeiten im Bereich $10 - 40 \text{ cm s}^{-1}$ sind.

In einem letzten Schritt werden Größenverteilungen der abgeschiedenen Öltropfen verglichen, um den Einfluss unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeiten auf die gebildeten Tropfengrößen zu untersuchen. Zur Bestimmung der Tropfengrößenverteilungen werden für eine Anströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} die identifizierten Tropfen von Aufnahme 15 und 16 (Binning 2, jedoch ausreichende Qualität für Detailanalysen der abgeschiedene Öltropfen), für eine Anströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1} die Aufnahmen 5 und 7 (jeweils Binning 1) und für eine Anströmgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} die Aufnahmen 17, 18 und 19 (jeweils Binning 1) gemittelt.

Die somit erhaltenen Größenverteilungen der abgeschiedenen Öltropfen sind in Abbildung 3.14 dargestellt.

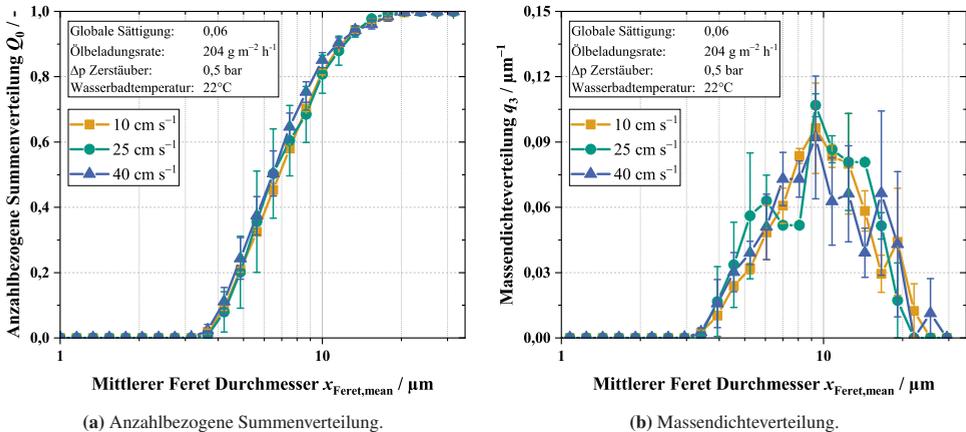


Abbildung 3.14: (a) Anzahlbezogene Summenverteilung und (b) Massendichteverteilung der abgeschiedenen Öltropfen bei variierenden Anströmgeschwindigkeiten; nach Straube et al. [59].

Die Betrachtung der anzahlbezogenen Summenverteilung Q_0 in Abbildung 3.14a zeigt, dass die Größe der abgeschiedenen Öltropfen unabhängig von der Gasgeschwindigkeit ist. Die Fehlerbalken sind auf die teilweise geringe Anzahl an identifizierten Öltropfen je Größenklasse zurückzuführen. Für eine höhere statistische Sicherheit müsste eine größere Anzahl an Tropfen pro Aufnahme zur Verfügung stehen. Durch den limitierten FOV aufgrund der benötigten, hohen Auflösung zur Identifizierung von Öltropfen nahe der Auflösungsgrenze des μ -CTs, ist dies nicht möglich. Dennoch ist eine sehr gute Übereinstimmung der Summenverteilungen für die untersuchten Anströmgeschwindigkeiten erkennbar.

In Abbildung 3.14b ist die Massendichteverteilung q_3 dargestellt. Auch bei der Betrachtung der q_3 -Verteilung ist kein signifikanter Einfluss der Gasgeschwindigkeit auf die Größe der gebildeten Tropfen bei identischer Sättigung erkennbar. Wie in Abschnitt 3.5 bereits beobachtet, besitzt der Großteil der abgeschiedenen Öltropfen, unabhängig von der Gasgeschwindigkeit, einen mittleren Feret Durchmesser von etwa 9 - 10 μm . In einzelnen Größenklassen sind nur wenige Tropfen vorhanden. Dies ist vor allem auf der abfallenden Flanke der q_3 -Verteilung zu beobachten. Bei einer Gasgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} ist ein Peak bei einer Tropfengröße von 27 μm zu erkennen. Dieses lokale Maximum ist auf zwei Tropfen in einer der drei ausgewerteten Aufnahmen für eine Gasgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} zurückzuführen. Diese Beobachtung verdeutlicht, dass eine begrenzte Gesamtanzahl an Tropfen einen großen Einfluss auf die differentielle Massenverteilungen haben kann. Ersichtlich ist dies auch durch einen Anstieg der Fehlerbalken (anzahlbezogen)

auf dem abfallenden Ast der q_3 -Verteilungen in Abbildung 3.14b.

Es ist festzuhalten, dass für eine signifikante Deformation oder Koaleszenz aufgrund einer Bewegung von abgeschiedenen Tropfen auf Fasern im untersuchten Größenbereich dieses Abschnitts, höhere Gasgeschwindigkeiten als 40 cm s^{-1} notwendig sind [97]. Es ist davon auszugehen, dass die Form der durch Koaleszenz gebildeten Ölstrukturen im Filtermedium von den Benetzungseigenschaften der Fasern (Oberflächenspannung und -energie) und der Sättigung, jedoch nicht von der Anströmgeschwindigkeit (im untersuchten Bereich zwischen 10 und 40 cm s^{-1}) abhängig ist [98].

4 Abscheidegradmessungen an dünnen Wirrfaserschichten unterschiedlicher Sättigung ⁴

Die Zielsetzung in diesem Kapitel ist die Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten (zwischen $10 - 40 \text{ cm s}^{-1}$) sowie unterschiedlichen globalen Sättigungen ($0 \leq S_{\text{global}} \leq 0,80$) auf den Abscheidegrad (Fraktions- und Gesamtabscheidegrad) der dünnen, oleophilen Wirrfaserschichten.

Die experimentelle Vorgehensweise ist aus Abschnitt 2.2.5 bekannt. Im ersten Abschnitt 4.1 dieses Kapitels wird die Vorkonditionierung der dünnen Wirrfaserschichten thematisiert. Abschnitt 4.2 beschreibt die fraktionelle Penetration von unterschiedlichen Anzahlen an Wirrfaservliesen in Reihe. Basierend auf diesen Ergebnissen wird auf die Anzahl an Wirrfaseranordnungen in Reihe eingegangen, um zuverlässig und wiederholbar Abscheidegrade an den Faservliesen bestimmen zu können. Die Evaluation von möglichen Umlagerungsvorgängen von abgeschiedenen Ölstrukturen bei erhöhten Sättigungen und Gasgeschwindigkeiten sowie ein möglicher Einfluss umgelagerter Ölstrukturen auf den Abscheidegrad ist Gegenstand von Abschnitt 4.3. Im Anschluss wird der Fraktionsabscheidegrad (Abschnitt 4.4) sowie der Gesamtabscheidegrad (Abschnitt 4.5) bei variierenden Anströmgeschwindigkeiten und Sättigungszuständen beleuchtet. In Abschnitt 4.6 werden die experimentellen Ergebnisse aus Abschnitt 4.4 und 4.5 in die einschlägig bekannte Literatur eingeordnet und mit dieser verglichen. In einem letzten Abschnitt steht die Differenzdruckentwicklung bei der Ölbeladung der einzelnen Wirrfaservliese sowie der Differenzdruck über mehrere Wirrfaseranordnungen in Reihe im Fokus (Abschnitt 4.7).

⁴ Teile dieses Kapitels sind in Straube et al. [63] publiziert.

4.1 Vorkonditionierung der dünnen Wirrfaserschichten

In diesem Abschnitt wird die Notwendigkeit einer Vorkonditionierung der eigens hergestellten dünnen Wirrfaseranordnungen in einem Isopropanolbad thematisiert, um gleichbleibende Filtereigenschaften für alle Versuchsreihen garantieren zu können, bevor Abscheidegradmessungen (Gesamt- und Fraktionsabscheidegrade) durchgeführt werden.

Dazu ist in Abbildung 4.1 der Fraktionsabscheidegrad $T(x_t)$ sowie der Gesamtabdscheidegrad E_0 vor und nach der Vorkonditionierung dargestellt. Für die vorgestellten Versuchsreihen (sowohl Fraktions- als auch Gesamtabdscheidegradbestimmung) werden vier Einzellagen der Wirrfaserschichten in Reihe geschaltet (für die Auswahl der Anzahl an Faserschichten sei auf den nächsten Abschnitt 4.2 verwiesen).

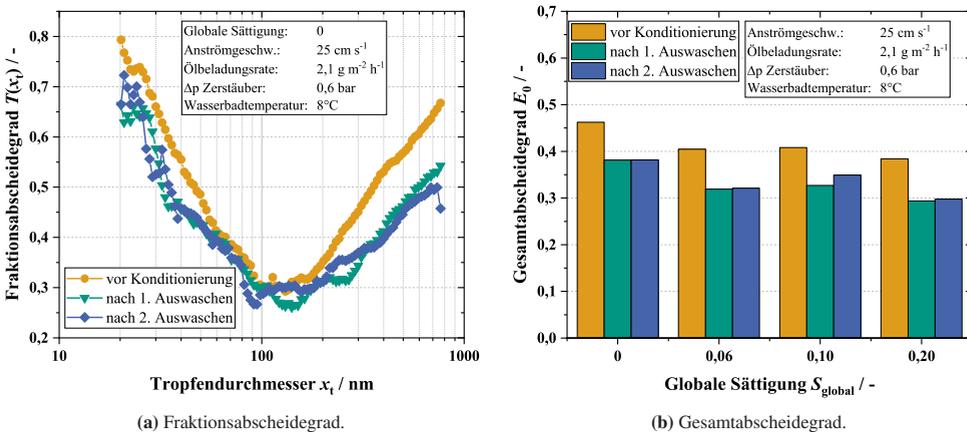


Abbildung 4.1: (a) Fraktions- und (b) Gesamtabdscheidegrad vor und nach der Vorkonditionierung der Wirrfaserschichten in einem Isopropanolbad. Jeweils vier einzelne Wirrfaserschichten in Reihe.

Abbildung 4.1a zeigt, dass der Fraktionsabscheidegrad $T(x_t)$ vor der Konditionierung im Isopropanolbad (orangene Kurve) sowohl im Diffusions- als auch Trägheitsbereich erkennbar höher liegt als im Vergleich zu den bestimmten Fraktionsabscheidegraden nach einem ersten (grüne Kurve) und zweiten Auswaschen (blaue Kurve). Ein Shift der MPPS ist hingegen nicht festzustellen.

Ein möglicher Grund für diese Beobachtungen ist eine elektrische Aufladung der Mikroglas- und/oder PET-Fasern bei der Herstellung der Faserschichten, welche durch ein Auswaschen in Isopropanol neutralisiert werden können [72].

Für die Vorkonditionierung werden die Faserschichten kurz in ein Gefäß mit reinem Isopropanol

eingelegt. Im Anschluss werden die Faservliese vorsichtig mit einem Heißluftfön bei niedriger Temperatur (ca. 30°C) getrocknet und gewogen. Durch Wägung der Faserschichten vor und nach dem Auswaschen sind jeweils nur marginale Gewichtsunterschiede im Bereich der Messgenauigkeit der Waage festzustellen (± 1 mg). Eine Gewichtsveränderung von mehr als ± 1 mg bei einem Gewicht der Faserschichten von 150 - 160 mg ist in keinem Fall beobachtbar. An dieser Stelle sei erwähnt, dass Gewichtsunterschiede der unbeladenen Faserschichten ($w = 15 \text{ g m}^{-2}$) im Bereich von ca. 10 mg auf das verwendete Stützmaterial zurückzuführen sind. Beim Zugschnitt der Faserschichten aus den hergestellten Ronden, im Anschluss an den Nasslegeprozess, kann es zu leicht unterschiedlichen Abtrennungen des Stützmaterials im Randbereich der Faserschichten kommen, was wiederum Gewichtsschwankungen bei ansonsten gleichbleibender Filteranströmfläche und konstantem Flächengewicht der Faseranordnungen ohne Stützstruktur erklärbar macht.

Bei Betrachtung von Abbildung 4.1b ist deutlich erkennbar, dass der Gesamtabscheidegrad E_0 im Zustand vor der Konditionierung höher liegt im Vergleich zu Messungen nach einem Auswaschen der einzelnen Faserschichten in Isopropanol. Dies ist für alle in diesem Abschnitt untersuchten globalen Sättigungen von $0 \leq S_{\text{global}} \leq 0,20$ zu beobachten. In diesem Zusammenhang sei wiederum auf mögliche herstellungsbedingte elektrische Ladungen der Fasern vor dem Konditionieren verwiesen.

Prinzipiell zeigen diese Vorversuche die generelle Möglichkeit und Notwendigkeit einer Auswaschung der Faserschichten in Isopropanol und der anschließenden Wiederverwendung. Bei den Wiederholungsmessungen nach dem 1. und 2. Auswaschen weisen die Faservliese eine nahezu identische Fraktionsabscheidegradkurve sowie Gesamtabscheidegrade auf. Signifikante Strukturänderungen der Wirrfaseranordnungen durch den Auswaschvorgang, welche Auswirkungen auf das Abscheideverhalten haben könnten, sind an dieser Stelle nicht zu beobachten.

4.2 Tropfenpenetration bei unterschiedlicher Anzahl an Faserschichten in Reihe

Die Dicke einer Wirrfaseranordnung beträgt ca. 160 μm . Es ist daher mit einer geringen Abscheidung bzw. hohen Penetration pro Faserschicht zu rechnen. Gegenstand dieses Abschnitts ist die Bestimmung der fraktionalen Penetration einer unterschiedlichen Anzahl an Faserschichten in Reihe. Darüber hinaus liegt der Fokus auch auf der Berechnung der fraktionalen Penetration pro Faserschicht bei Schaltung mehrerer Lagen der Faserschichten in Reihe. Hierbei sei erwähnt, dass ausschließlich in diesem Abschnitt, ausgehend von Abscheidegradmessungen an mehreren

Faserschichten in Reihe, auf die Abscheidung bzw. die Penetration einer Faserschicht zurückgerechnet wird. Im Allgemeinen lässt sich die fraktionale Penetration, dargestellt als $P(x_t)$, mithilfe von Gleichung 4.1 berechnen.

$$P(x_t) = 1 - T(x_t) \quad (4.1)$$

Dabei ist die fraktionale Penetration $P(x_t)$ die Differenz zum Wert 1 des Fraktionsabscheidegrads $T(x_t)$. Im Folgenden sollen eine, vier und acht Lagen der hergestellten Wirrfaservliese in Reihe bezüglich deren fraktionaler Penetration untersucht werden. Eine Untersuchung von vier bzw. acht Faserschichten in Reihe wird gewählt, da sich aus einer Ronde aus dem Nasslegeprozess bei der Filterherstellung exakt vier Wirrfaservliese mit identischem Flächengewicht ausschneiden lassen (siehe Abschnitt 2.1.1).

In Abbildung 4.2 ist die fraktionale Penetration für eine, vier und acht Lagen der Wirrfaservliese in Reihe dargestellt.

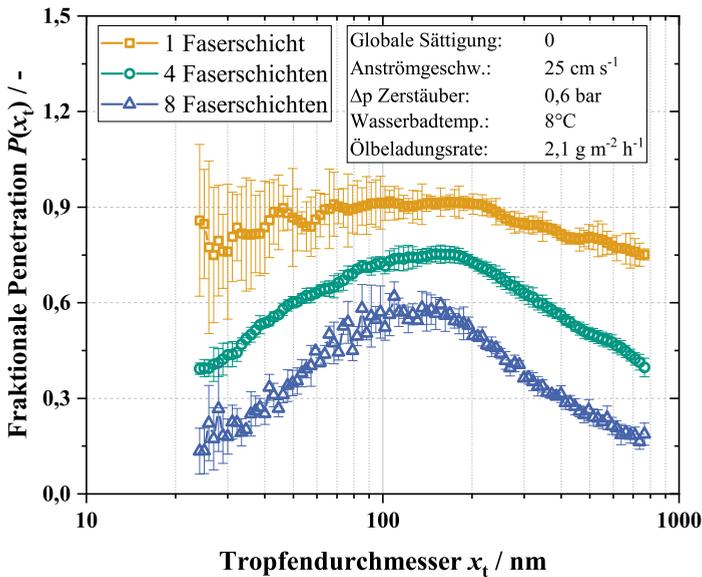


Abbildung 4.2: Fraktionale Penetration für eine sowie vier und acht Lagen in Reihe des verwendeten Faservlieses.

Jede Versuchsreihe wird in mindestens dreifacher Ausführung wiederholt, um statistische Schwankungen auf ein Minimum zu reduzieren. Experimente, bei denen lediglich eine einzige Faserschicht in der Filterkammer installiert wird, sind aufgrund signifikanter Schwankungen der Partikelkonzentrationen im Reingas, insbesondere in kleineren Größenklassen (< 100 nm), sechsmal

wiederholt. Innerhalb dieser Versuchsreihe werden sowohl neue, vorkonditionierte Faserschichten (vier von insgesamt sechs Wiederholungen) als auch nach der Filtration mit Ölnebel in Isopropanol ausgewaschene und anschließend getrocknete Faserschichten (zwei von insgesamt sechs Wiederholungsmessungen) verwendet. Unterschiede zwischen neuen, vorkonditionierten und ausgewaschenen Faserschichten hinsichtlich deren fraktionaler Penetration sind im Rahmen dieser Arbeit nicht zu beobachten. Bei Messreihen mit vier bzw. acht Faserschichten in Reihe werden die Wirrfaseranordnungen nach jedem Durchlauf in einem Isopropanolbad ausgewaschen, getrocknet und wiederverwendet.

Es lässt sich in Abbildung 4.2 erkennen, dass mit zunehmender Lagenanzahl der Wirrfaseranordnungen in Reihe die fraktionale Penetration über alle Größenklassen sinkt. Die MPPS liegt für eine, vier und acht Faserschichten in Reihe in etwa unverändert bei ca. 150 nm. Für eine verwendete Lage der Faserschicht liegt die fraktionale Penetration im Bereich von etwa $0,75 < P(x_t) < 0,90$. Hierbei sind große Schwankungen, sichtbar an den ausgeprägten Fehlerbalken in Abbildung 4.2, der fraktionalen Penetration im diffusiven Bereich für Tropfengrößen < 100 nm zu beobachten. Für vier bzw. acht Lagen der Faserschichten in Reihe sind diese Fehlerbalken wesentlich geringer ausgeprägt.

Da vier bzw. acht Faservliese in Reihe geringere Penetrationen mit geringeren Fehlerbalken aufweisen, sollen für Fraktions- und Gesamtabscheidegradmessungen mehrere Lagen der Faserschichten in Reihe geschaltet werden. Grundvoraussetzung hierfür ist eine gleichbleibende Abscheidung pro Lage der Wirrfaserschichten bei geringen Ölbeladungsraten. Daher wird in einem zweiten Schritt die fraktionale Penetration pro Lage einer Wirrfaserschicht untersucht $P_{1\text{Lage}}(x_t)$ (siehe Formel 4.2).

$$P_{1\text{Lage}}(x_t) = \sqrt[n]{P(x_t)} \quad (4.2)$$

Hierbei entspricht n der Anzahl an Wirrfaserschichten in Reihe [57]. Die fraktionale Penetration pro Lage $P_{1\text{Lage}}(x_t)$ für eine, vier und acht Lagen der Faservliese in Reihe ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

Es lässt sich gut erkennen, dass die fraktionale Penetration pro Lage für eine, vier bzw. acht Faserschichten in Reihe sehr ähnlich verläuft. Besonders die fraktionalen Penetrationskurven für vier und acht Faserschichten in Reihe zeigen keine Unterschiede in ihrem Verlauf. Die fraktionale Penetration von einer Faserschicht im Vergleich zu vier bzw. acht Lagen in Reihe zeigt eine leicht niedrigere Penetration auf dem abfallenden Ast im Trägheitsbereich. Im Rahmen dieser Arbeit konnte nicht geklärt werden, ob dieser Unterschied auf eine einzelne Wirrfaserschicht oder ein inhomogenes Anströmen der ersten Wirrfaserschicht bei mehreren Faserschichten in

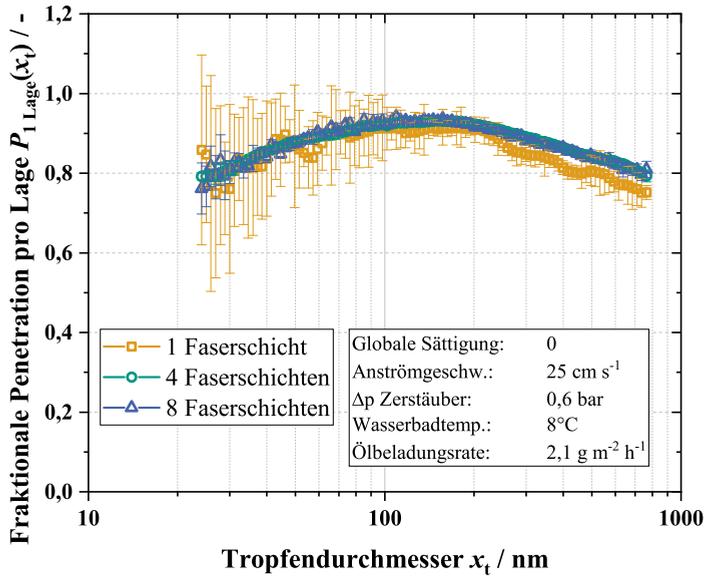


Abbildung 4.3: Fraktionale Penetration pro Faserschicht für eine sowie vier und acht Lagen in Reihe des verwendeten Faservlieses; nach Straube et al. [63].

Reihe zurückzuführen ist. Dennoch sind die drei Kurven in Abbildung 4.3 in sehr guter Übereinstimmung und es kann geschlussfolgert werden, dass die Abscheidung bzw. Penetration pro Faserschicht bei niedrigen Ölbeladungsraten ($2,1 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) als nahezu konstant anzusehen ist. Demnach können Filtrationsversuche an dünnen Wirrfaserschichten in Reihe durchgeführt werden, ohne dass Abscheidegradienten zwischen der ersten und der letzten Lage bei einer Reihenschaltung berücksichtigt werden müssen.

Darüber hinaus zeigen diese Versuche, dass vier Lagen der Wirrfaserschichten in Reihe ausreichend für Abscheidegradmessungen sind. Eine weitere Erhöhung der Lagenanzahl bietet keinen Vorteil bei der Bewertung der Abscheidegrade, sondern führt lediglich zu einem erheblichen zeitlichen Mehraufwand, da doppelt so viele Wirrfaserschichten bei Betrachtung höherer Sättigungszustände in der Beladungskammer mit Öl beladen werden müssen. Die Verwendung von vier Faserschichten einer Ronde nach dem Nasslegeprozess bietet zudem den Vorteil, dass alle Wirrfaseranordnungen das exakt gleiche Flächengewicht aufweisen und es zu keinen Schwankungen der physikalischen Eigenschaften der Faservliese kommt, welche ggf. bei der Ergebnisdiskussion zu berücksichtigen sind.

4.3 Stabilität von abgeschiedenen Ölstrukturen bei erhöhten Gasgeschwindigkeiten und hohen Sättigungen

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob hohe Filteranströmgeschwindigkeiten (40 cm s^{-1}) einen Einfluss auf bereits abgeschiedene Ölstrukturen ausüben und damit den Abscheidegrad beeinflussen. Vor allem bei hohen globalen Sättigungen (z.B. $0,60 \leq S_{\text{global}} \leq 0,80$) ist der Großteil des anfänglich freien durchströmbaren Volumens in den Wirrfaserschichten mit Öl blockiert, wodurch die Gasgeschwindigkeit in den Faserschichten deutlich erhöht wird. Es ist denkbar, dass es hierdurch zu irreversiblen Umlagerungsvorgängen von abgeschiedenen Flüssigkeitsstrukturen auf Fasern oder an Faserkreuzungen kommen kann. Diese Ölumverteilungen könnten die Abscheideeffizienz beeinflussen. Um Abscheidegrade bei gleichen Sättigungszuständen und unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeiten vergleichen zu können, dürfen abgeschiedene Ölstrukturen das Abscheideverhalten nicht verändern. Mit anderen Worten sollte das Abscheideverhalten bei einer bestimmten Sättigungsstufe für eine Filteranströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} , vor und nach einer Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit auf beispielsweise 40 cm s^{-1} , unverändert bleiben. Um dies zu überprüfen, wird der Fraktionsabscheidegrad $T(x_t)$ bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,60$ und $0,80$ und einer Anströmgeschwindigkeit vom 10 cm s^{-1} doppelt bestimmt. Dazu wird der Fraktionsabscheidegrad bei 10 cm s^{-1} vor und nach durchgeführten Messreihen bei einer Anströmgeschwindigkeit von 25 und 40 cm s^{-1} ermittelt. Im Gegensatz zu bereits evaluierten Gasgeschwindigkeitseinflüssen auf Form und Größe von abgeschiedenen Ölstrukturen bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,06$ (Abschnitt 3.7), werden im Folgenden Fraktionsabscheidegrade an vorgesättigten Wirrfaseranordnungen (identische Sättigung je Faserschicht) mit wesentlich höherer globaler Sättigung ($S_{\text{global}} = 0,60$ und $0,80$) bestimmt. Niedrigere Sättigungszustände werden nicht untersucht, da angenommen wird, dass Umlagerungsvorgänge von abgeschiedenem Öl hauptsächlich bei hohen globalen Sättigungen einen Einfluss auf die Abscheideeffizienz nehmen. Die Fraktionsabscheidegradkurven für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,60$ und $0,80$ sowie einer Anströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} vor und nach Versuchsreihen bei höheren Anströmgeschwindigkeiten von 25 und 40 cm s^{-1} (gekennzeichnet als wdh), sind in Abbildung 4.4 dargestellt.

Bei Betrachtung von Abbildung 4.4 lässt sich allgemein erkennen, dass bei einer Erhöhung der globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,60$ auf $S_{\text{global}} = 0,80$ die Abscheidung im Bereich der Diffusionsabscheidung sinkt. Dies kann durch steigende Gasgeschwindigkeiten und daraus resultierenden geringeren Verweilzeiten im Inneren der Wirrfaserschichten bei steigender Sättigung erklärt werden. Gleichzeitig ist eine Verbesserung der Abscheidung im Bereich des Sperreffekts und

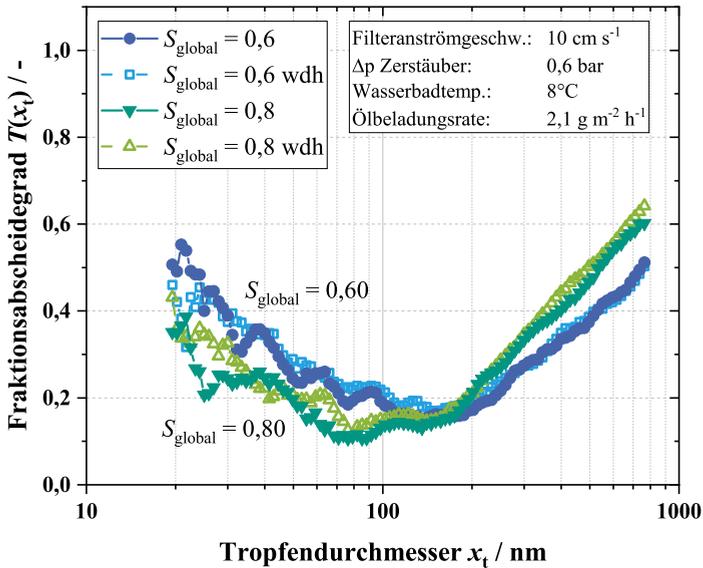


Abbildung 4.4: Fraktionsabscheidegrade für eine Filteranströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} vor und nach (wdh) einer Gasgeschwindigkeitserhöhung auf bis zu 40 cm s^{-1} für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,60$ und $0,80$; nach Straube et al. [63].

der Trägheitsabscheidung zu beobachten. Diese Erhöhung der Abscheideleistung für Tropfen $> 100 \text{ nm}$ kann ebenfalls mit einer steigenden Gasgeschwindigkeit bei erhöhter globaler Sättigung erklärt werden. Im nachfolgenden Abschnitt 4.4 wird der Einfluss von variierenden Sättigungen und Gasgeschwindigkeiten auf den Abscheidegrad ausführlich evaluiert. Für weitere Informationen zum Verlauf der Fraktionsabscheidegradkurven sei auf den folgenden Abschnitt 4.4 verwiesen.

Weiterhin ist in Abbildung 4.4 zu erkennen, dass der Fraktionsabscheidegrad bei einer Anströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} bei beiden Versuchsreihen (vor und nach einer Erhöhung der Filteranströmgeschwindigkeit auf bis zu 40 cm s^{-1}) nahezu konstant bleibt. Dies kann für $S_{\text{global}} = 0,60$ und $S = 0,80$ beobachtet werden. Folglich nimmt eine Erhöhung der Filteranströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} auf bis zu 40 cm s^{-1} keinen signifikanten Einfluss auf bereits abgeschiedene Flüssigkeitsstrukturen bei den hier untersuchten hohen Sättigungszuständen ($S_{\text{global}} = 0,60$ und $S = 0,80$).

Es ist zu beachten, dass irreversible strukturelle Veränderungen der abgelagerten Flüssigkeitsstrukturen bei höheren als den hier untersuchten Filteranströmgeschwindigkeiten auftreten können. In industriellen Anwendungen werden jedoch Koaleszenzfilter in der Regel nur bei Anströmgeschwindigkeiten von bis zu maximal 40 cm s^{-1} betrieben [5, 44, 96].

Es kann somit festgehalten werden, dass bei den in dieser Arbeit untersuchten Anströmgeschwindigkeiten keine nennenswerte Veränderung der Kollektorfläche durch abgeschiedene und bei höheren Gasgeschwindigkeiten umgelagerte Ölstrukturen zu beobachten ist. Fraktionsabscheidegrade bei identischen globalen Sättigungen ($S_{\text{global}} \leq 0,80$) und Anströmgeschwindigkeiten zwischen 10 und 40 cm s^{-1} können demnach ohne Berücksichtigung etwaiger Morphologieänderungen des abgeschiedenen Öls, welche die Abscheideeffizienz beeinflussen würden, verglichen werden.

4.4 Einfluss von variierenden Gasgeschwindigkeiten und Sättigungszuständen auf den Fraktionsabscheidegrad

Zur Evaluierung des Einflusses der Filteranströmgeschwindigkeit und der globalen Sättigung auf die Abscheidung von submikronen Tropfen, liegt in diesem Abschnitt der Fokus auf Fraktionsabscheidegradmessungen an den dünnen Wirrfaseranordnungen. Hierfür werden vier Wirrfaserschichten in Reihe geschaltet, da Fraktionsabscheidegrade an Einzellagen der Wirrfaservliese nur schwer, und verbunden mit hohen statistischen Schwankungen, zu bestimmen sind (siehe Abschnitt 4.2).

Es werden **sieben unterschiedliche Sättigungszustände** bei der Betrachtung des Fraktions- und Gesamtabscheidegrads (in Abschnitt 4.5) untersucht. Nach der Bestimmung von Abscheidegraden (bei Filteranströmgeschwindigkeiten von 10 , 25 und 40 cm s^{-1}) an vier vorkonditionierten, unbeladenen Wirrfaseranordnungen in Reihe ($S_{\text{global}} = 0$), wird jede Wirrfaserschicht in der Beladungskammer auf eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,06$ beladen. Im Anschluss werden erneut Abscheidegrade an diesen vier Wirrfaservliesen bei unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeiten in Reihe bestimmt. Im weiteren Verlauf werden die Faserschichten sukzessive auf globale Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,10$, $0,20$, $0,40$, $0,60$ und schließlich $0,80$ beladen sowie jeweils Abscheidegrade bei jeder Sättigungsstufe bestimmt. Nach Abscheidegradmessungen bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$, werden die vier verwendeten Wirrfaserschichten vorsichtig in Isopropanolbädern ausgewaschen, getrocknet und wiederverwendet. Dabei wird für jede Sättigungsstufe eine Dreifachbestimmung durchgeführt, um statistische Schwankungen von Einzelmessungen zu minimieren. Ein möglicher Einfluss des Auswaschvorgangs auf die Struktur der Wirrfaseranordnungen und damit die Abscheidung ist nach den vorgestellten Untersuchungen am LSM (Abschnitt 2.2.5) auszuschließen. Alle in diesem Abschnitt präsentierten Fraktionsabscheidegrade werden an den identischen vier Wirrfaseranordnungen in identischer Reihenanordnung

in der Filterkammer bestimmt.

In Abbildung 4.5 sind Fraktionsabscheidegrade für unbeladene Faservliese ($S_{\text{global}}=0$) sowie für globale Sättigungen von $S_{\text{global}}=0,20, 0,40$ und $0,80$ in Abhängigkeit von unterschiedlichen Filteranströmgeschwindigkeiten ($10, 25$ und 40 cm s^{-1}) dargestellt.

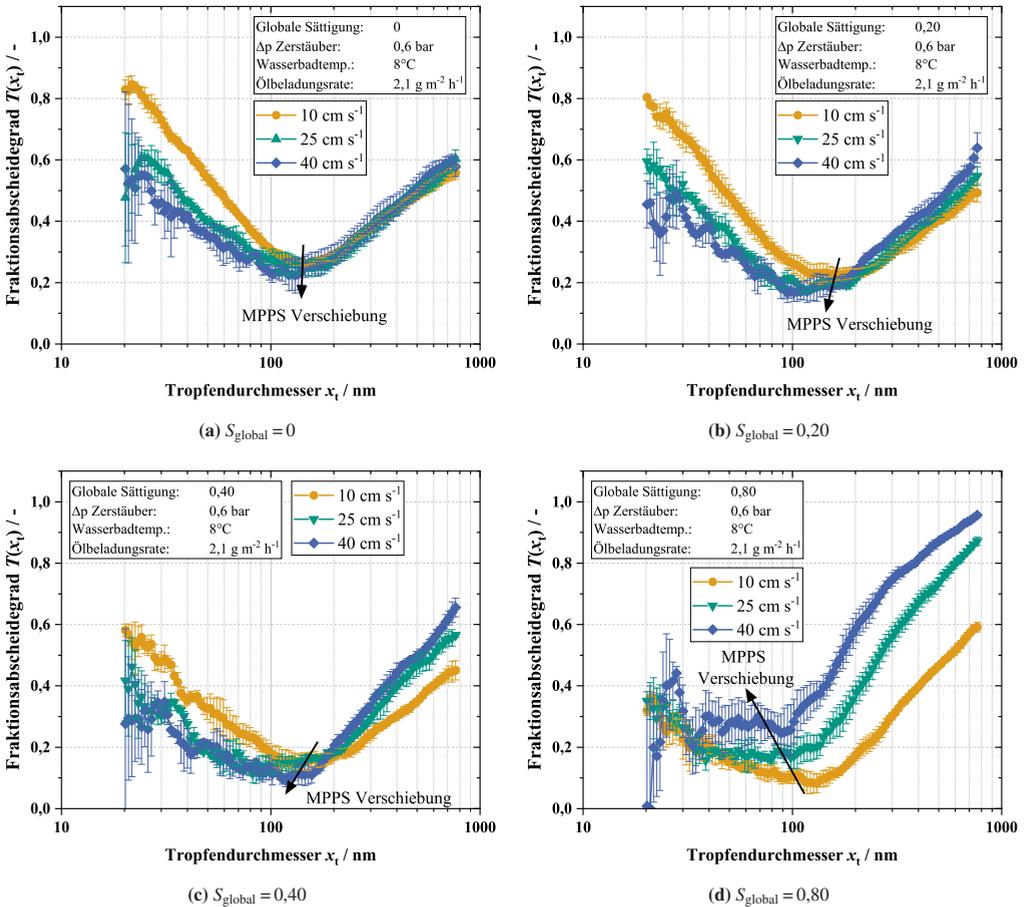


Abbildung 4.5: Fraktionsabscheidegrade (vier Wirrfaserschichten in Reihe) für globale Sättigungen von (a) $S_{\text{global}}=0$, (b) $S_{\text{global}}=0,20$, (c) $S_{\text{global}}=0,40$ und (d) $S_{\text{global}}=0,80$ sowie Filteranströmgeschwindigkeiten von $10, 25$ und 40 cm s^{-1} ; nach Straube et al. [63].

Für unbeladene Wirrfaserschichten (Abbildung 4.5a) lässt sich eine Verschlechterung der Diffusionsabscheidung für Tropfengrößen $< 100 \text{ nm}$ mit steigender Filteranströmgeschwindigkeit beobachten. Eine verringerte Verweilzeit der Öltröpfchen in den Wirrfaserschichten ist hierfür

verantwortlich. Eine sinkende Abscheideeffizienz im Diffusionsbereich bei steigender Gasgeschwindigkeit ist auch aus der Filtration von festen Partikeln bekannt [17, 99]. Die Abscheidung infolge des Sperreffekts und der Trägheit (Tropfendurchmesser > 100 nm) bleibt für steigende Anströmgeschwindigkeiten hingegen nahezu unverändert. Des Weiteren lässt sich eine minimale Verschlechterung der Abscheidung im Bereich der MPPS feststellen.

Wird eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$ (Abbildung 4.5b) betrachtet, ist wiederum eine Verschlechterung der Diffusionsabscheidung mit steigender Anströmgeschwindigkeit aufgrund sinkender Verweilzeiten der Tröpfchen in den Faserschichten zu erkennen. Im Trägheitsbereich ist eine Auffächerung der Fraktionsabscheidegradkurven zu beobachten. Mit steigender Anströmgeschwindigkeit steigt die Abscheidung infolge der Impaktion und des Sperreffekts. Zudem ist neben einer Verschlechterung der Abscheideeffizienz im Bereich der MPPS auch eine Verschiebung dieser zu kleineren Tropfengrößen zu erkennen. Zu begründen ist diese Beobachtung mit einer reduzierten Verweilzeit der Tröpfchen bei steigender Anströmgeschwindigkeit.

Das gleiche Verhalten ist in Abbildung 4.5c für $S_{\text{global}} = 0,40$ ersichtlich. Eine Auffächerung der Fraktionsabscheidegradkurven im Trägheitsbereich mit zunehmender Gasgeschwindigkeit ist ausgeprägter zu beobachten im Vergleich zu einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$. Ursächlich hierfür könnte die Ausbildung von partiell geschlossenen Ölfilmen sein. Eine Verschiebung der MPPS zu kleineren Tropfengrößen und die Verschlechterung der Abscheideeffizienz im Bereich der MPPS ist ebenfalls stärker ausgeprägt im Vergleich zu $S_{\text{global}} = 0,20$.

Im Gegensatz zu Sättigungszuständen von $0 \leq S_{\text{global}} \leq 0,40$ ist eine erhöhte Diffusionsabscheidung mit steigender Anströmgeschwindigkeit bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$ festzustellen. Diese Beobachtung ist noch nicht abschließend geklärt und ist in weiterführenden Arbeiten zu untersuchen. Bei diesem Sättigungszustand ist mit einem nahezu geschlossenen Ölfilm auf der Anströmseite der Faserschichten zu rechnen. Vorstellbar ist dadurch eine Veränderung des Strömungsfeldes bzw. den Stromlinien der Luft bei steigender Gasgeschwindigkeit hin zu diesem Ölfilm. Infolgedessen verringert sich die Distanz für den diffusiven Transport, was möglicherweise in einer erhöhten Diffusionsabscheidung mit zunehmender Gasgeschwindigkeit resultiert. Aufgrund der erhöhten diffusiven Abscheidung erhöht sich ebenfalls die Abscheideeffizienz im Bereich der MPPS bei einer gleichzeitigen Verschiebung dieser zu kleineren Tropfengrößen mit zunehmender Gasgeschwindigkeit. Zudem ist eine ausgeprägte Erhöhung des Trägheitsasts mit steigender Anströmgeschwindigkeit für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$ ersichtlich. Wiederum steht ein nahezu geschlossener Ölfilm im Verdacht für diese Beobachtung.

Für Sättigungszustände von $S_{\text{global}} \geq 0,40$ lässt sich demnach generell eine steigende Trägheitsabscheidung durch eine mögliche Ausbildung von partiell geschlossenen Ölfilmen auf den dünnen Wirrfaseranordnungen zurückführen. Für die Überprüfung dieser Vermutung, werden Durchlichtbilder von unbeladenen Faserschichten und Faserschichten mit einer globalen Sättigung von

$S_{\text{global}} = 0,40$ sowie $S_{\text{global}} = 0,80$ angefertigt und verglichen. Um die blockierte Fläche durch Ölstrukturen genauer zu quantifizieren, erfolgt eine Umwandlung der Durchlichtbilder in Binärbilder mithilfe von *ImageJ*. In einem ersten Schritt werden 8-Bit-Graustufenbilder aus den Durchlichtbildern generiert. Die Reduzierung von Bildrauschen wird mittels Anwendung eines Bandpassfilters mit Fast-Fourier-Transformation und anschließender Normalisierung erreicht, wodurch die Pixelwerte im Bereich von 0 bis 255 liegen. Dieser Schritt beseitigt effektiv Bildrauschen mit niedrigen und hohen räumlichen Frequenzen, insbesondere solche unter 3 Pixeln und über 40 Pixeln [100]. Im Anschluss erfolgt die Auswahl eines automatischen Schwellenwerts durch die Software *ImageJ* zur Binarisierung der Durchlichtbilder. Die Durchlichtbilder (Abbildungen 4.6a-c) sowie deren Binarisierungen (Abbildungen 4.6d-f) sind im Folgenden dargestellt.

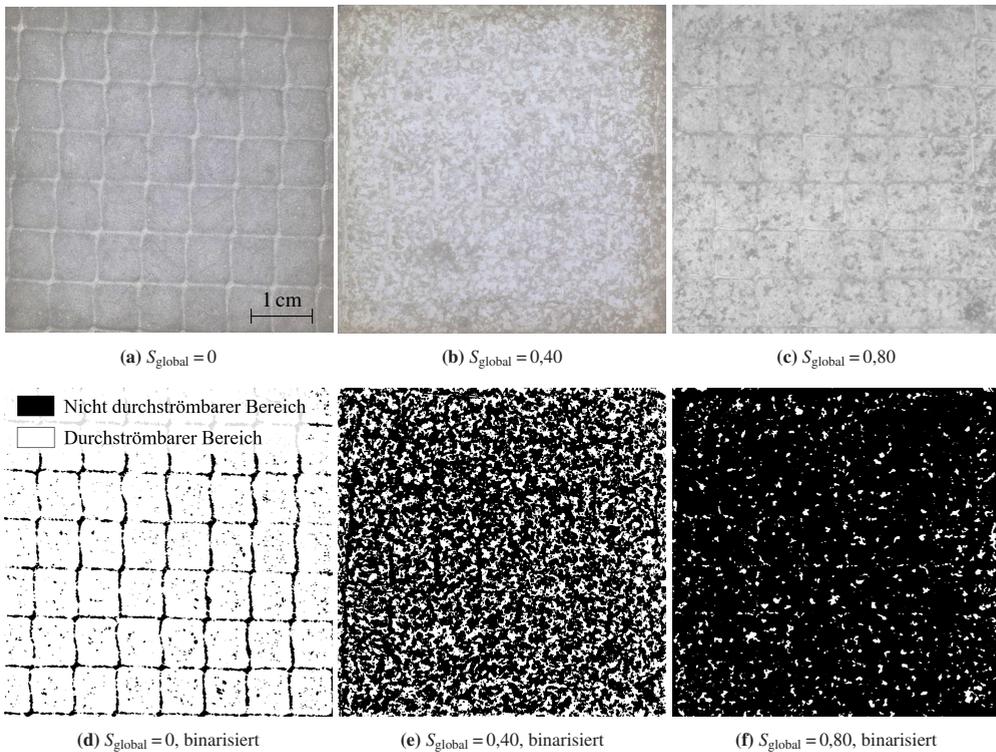


Abbildung 4.6: Obere Reihe: Durchlichtbilder von Wirrfaseranordnungen (a) unbeladen, (b) bei $S_{\text{global}} = 0,40$ und (c) bei $S_{\text{global}} = 0,80$. Untere Reihe: Binärbilder bei den entsprechenden Sättigungsstufen; nach Straube et al. [63].

In Abbildung 4.6 ist deutlich erkennbar, dass akkumuliertes Öl, insbesondere bei hohen Sättigungszuständen ($S_{\text{global}} = 0,80$), große, nahezu geschlossene Ölfilme ausbildet, welche den Großteil der freien durchströmbarer Fläche der Wirrfaserschichten blockieren.

Für ungesättigte Medien stellt der schwarze Bereich, wie am Muster zu erkennen ist, die Stützstruktur der Wirrfaserschichten mit einer Maschenweite von ca. $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ dar. Die relative freie durchströmbare Fläche (weißer Bereich) lässt sich aus den Binärbildern für das unbeladene Wirrfaservlies zu 92 %, für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,40$ zu 55 % und für $S_{\text{global}} = 0,80$ zu 13 % berechnen (Anteil der schwarzen Fläche zur Gesamtfläche des jeweiligen Binärbilds). Da die weitmaschige Stützstruktur ca. 8 % der relativen freien durchströmbaren Fläche blockiert, repräsentieren die Binärbilder in guter Näherung die jeweiligen Sättigungszustände.

Eine erhöhte Trägheitsabscheidung, insbesondere bei globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} \geq 0,40$ ist demnach neben einer höheren lokalen Gasgeschwindigkeit auch auf die Ausbildung von partiellen, nahezu geschlossenen Ölfilmen auf den dünnen Wirrfaserschichten zurückzuführen.

Für Fraktionsabscheidegrade von Faservliesen mit globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,06, 0,10$ und $0,60$ sei auf den Anhang A.2 verwiesen, da diese Sättigungszustände keinen wissenschaftlichen Mehrwert liefern und die bereits vorgestellten Erkenntnisse bestätigen.

In einem nächsten Schritt wird der Einfluss von abgeschiedenen Ölstrukturen unterschiedlicher Sättigung auf den Fraktionsabscheidegrad für Anströmgeschwindigkeiten von 10, 25 und 40 cm s^{-1} untersucht. Abbildung 4.7 zeigt den Fraktionsabscheidegrad $T(x_t)$ bei einer Anströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} und globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0, 0,20, 0,40, 0,60$ und $0,80$.

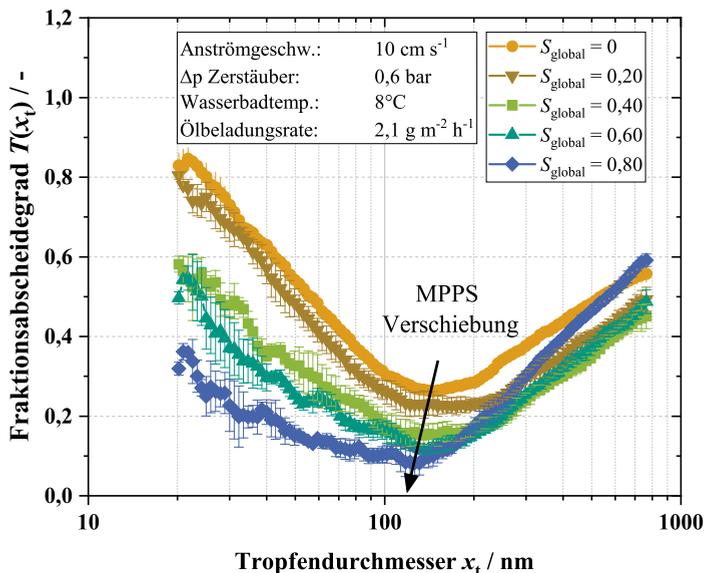


Abbildung 4.7: Fraktionsabscheidegrade (vier Wirrfaservliese in Reihe) in Abhängigkeit der globalen Sättigung für eine Filteranströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} ; nach Straube et al. [63].

Mit steigender Sättigung ist eine deutliche Verschlechterung der Diffusionsabscheidung zu beobachten. Zu begründen ist dies mit einer erhöhten Gasgeschwindigkeit aufgrund von Öl blockierten Bereichen in den Wirrfaseranordnungen. Für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,40$ ist zudem eine verschlechterte Abscheidung aufgrund von Trägheit und des Sperreffekts zu beobachten. Hierfür steht der Verlust von besonders abscheiderelevanter Faserfläche im Verdacht [14, 15]. Für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}}=0,60$ ist ein leichter Anstieg der Abscheidung im Trägheitsbereich zu beobachten. Deutlicher zu erkennen ist dies bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$. Für Tropfen > 700 nm ist bei diesem Sättigungszustand eine höhere Trägheitsabscheidung im Vergleich zum unbeladenen Zustand ($S_{\text{global}} = 0$) zu erkennen. Wie anhand von den Durchlichtbildern in Abbildung 4.6 ersichtlich, ist die Ausbildung von größeren, vollständig mit Öl gesättigten Bereichen für eine erhöhte Abscheidung von Tröpfchen im Trägheitsbereich verantwortlich. Zusätzlich ist für eine steigende globale Sättigung eine Verschiebung der MPPS hin zu kleineren Tropfendurchmessern sowie eine Verschlechterung der Abscheidung im Bereich der MPPS zu beobachten, was auf eine erhöhte Gasgeschwindigkeit aufgrund von Öl blockierten Bereichen zurückzuführen ist.

Bei einer Filteranströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1} lassen sich verglichen mit einer Anströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} ähnliche Beobachtungen feststellen. Fraktionsabscheidegrade für eine Anströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1} sind in Abbildung 4.8 dargestellt.

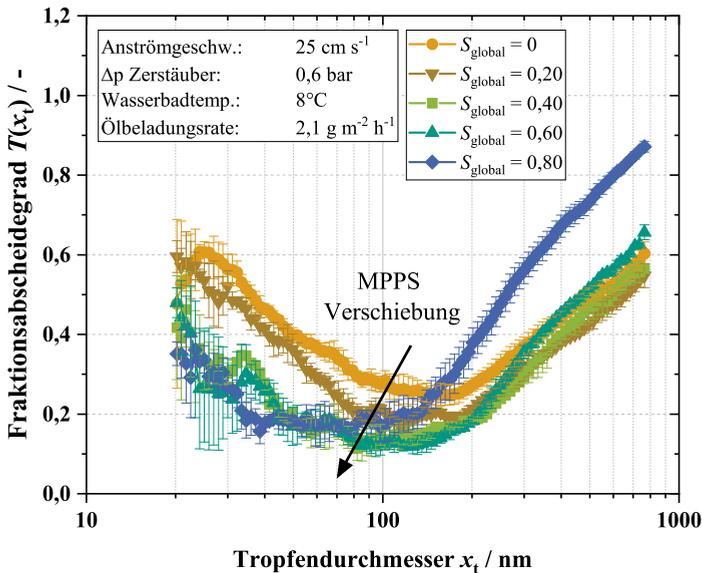


Abbildung 4.8: Fraktionsabscheidegrade (vier Wirrfaservliese in Reihe) in Abhängigkeit der globalen Sättigung für eine Filteranströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1} ; nach Straube et al. [63].

Über den gesamten Sättigungsbereich hinweg ist eine Verschlechterung der Diffusionsabscheidung mit zunehmender globaler Sättigung zu beobachten. Dies resultiert aus einer erhöhten Gasgeschwindigkeit durch Öl blockierte Bereiche. Für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,40$ ist infolge des Verlusts von besonders abscheiderrelevanter Faserfläche eine verschlechterte Abscheidung im Bereich des Sperreffekts und der Trägheitsabscheidung festzustellen. Steigt die globale Sättigung weiter an, ist wiederum eine Zunahme der Abscheidung von Tropfen > 100 nm aufgrund einer Gasgeschwindigkeitserhöhung und Ölfilmbildung zu beobachten. Insbesondere für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$ ist eine besonders erhöhte Abscheidung im Trägheitsbereich aufgrund von nahezu geschlossenen Ölfilmen erkennbar. Im Vergleich zu einer Anströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} ist eine ausgeprägtere Verschiebung der MPPS hin zu kleineren Tröpfchengrößen angesichts steigender Gasgeschwindigkeiten in den Wirrfaseranordnungen mit zunehmender globaler Sättigung festzustellen. Durch steigende Gasgeschwindigkeiten mit zunehmender Sättigung lässt sich auch die beobachtete Verschlechterung der Abscheidung im Bereich der MPPS erklären. Die erkennbaren Fehlerbalken bei kleinen Tropfengrößen (< 100 nm) sind auf eine geringe Anzahl an Tropfen in diesen Größenklassen zurückzuführen. Insbesondere bei einer Anströmgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} (siehe Abbildung 4.9) sind Fehlerbalken auf dem Diffusionsast stark ausgeprägt.

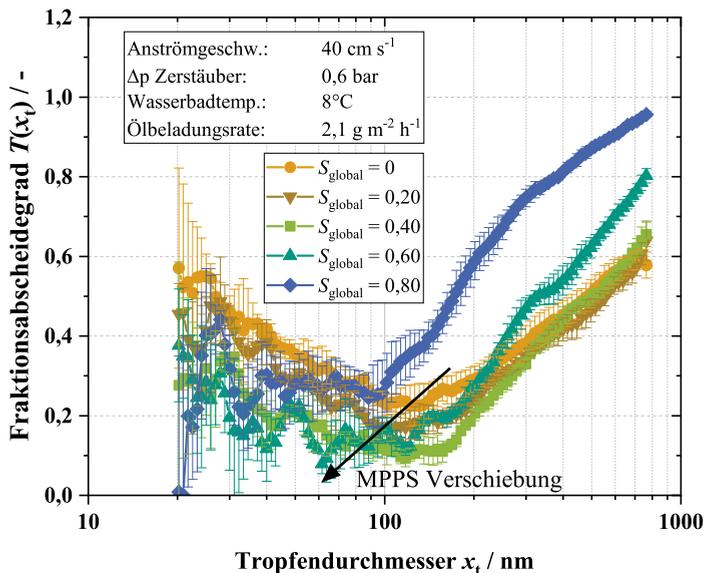


Abbildung 4.9: Fraktionsabscheidegrade (vier Wirrfaservliese in Reihe) in Abhängigkeit der globalen Sättigung für eine Filteranströmgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} ; nach Straube et al. [63].

Bei dieser Anströmgeschwindigkeit ist bedingt durch die hohe Verdünnung des Aerosolstroms in der Mischkammer die Ölkonzentration am geringsten. Daher werden insbesondere in den kleinen Tropfenklassen nur sehr wenige Partikeln vom Messgerät detektiert. Folglich sind für Tropfengrößen < 100 nm sehr große Fehlerbalken zu beobachten. Die Abscheidung im Trägheitsbereich und im Bereich des Sperreffekts für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,40$ ist nahezu unverändert. Für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,60$ steigt die Abscheidung infolge von Trägheit und Sperreffekt an. Eine deutlich erhöhte Abscheidung auf dem Trägheitsast ist für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$ durch einen nahezu geschlossenen Ölfilm zu erklären. Die Abscheidung aufgrund von Diffusion sinkt indes für globale Sättigungen bis zu $S_{\text{global}} \leq 0,40$. Eine Verschiebung der MPPS zu kleineren Tropfengrößen und eine verschlechterte Abscheidung im Bereich der MPPS mit zunehmender Sättigung ist ebenfalls nur bis zu einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} \leq 0,40$ zu beobachten. Für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$ steigt die Abscheidung infolge von Diffusion an, wodurch ebenfalls eine Verbesserung der Abscheidung im Bereich der MPPS zu beobachten ist. Eine eindeutige Erklärung für diese Beobachtung konnte, wie bereits erwähnt, im Rahmen dieser Arbeit nicht gefunden werden. Möglicherweise ist eine verringerte Distanz für den diffusiven Transport mit zunehmender Gasgeschwindigkeit, resultierend in einer erhöhten Diffusionsabscheidung, hierfür verantwortlich.

4.5 Einfluss von variierenden Gasgeschwindigkeiten und Sättigungszuständen auf den Gesamtabscheidegrad

In diesem Abschnitt erfolgt die Betrachtung des Gesamtabscheidegrads bei variierenden Gasgeschwindigkeiten und globalen Sättigungen. Der Gesamtabscheidegrad E_0 berechnet sich dabei aus der Gesamtheit der vom Messgerät detektierten Tropfenkonzentrationen aus dem Rein- und Rohgas (siehe Formel 2.4).

In Abbildung 4.10 ist der Gesamtabscheidegrad E_0 in Abhängigkeit der globalen Sättigung für Filteranströmgeschwindigkeiten von 10, 25 und 40 cm s^{-1} dargestellt.

Für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,20$ ist nur eine marginale Verringerung des Gesamtabscheidegrads E_0 mit steigender Anströmgeschwindigkeit zu beobachten. Zwischen den einzelnen Sättigungszuständen von $0 \leq S_{\text{global}} \leq 0,20$ ist unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit eine leichte Abnahme von E_0 zu erkennen. Der Verlust von effektiver Faserfläche sowie eine sinkende Diffusionsabscheidung mit steigender Gasgeschwindigkeit durch Öl blockierte Bereiche stehen im Verdacht für diese Beobachtung. Für eine Filteranströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} und

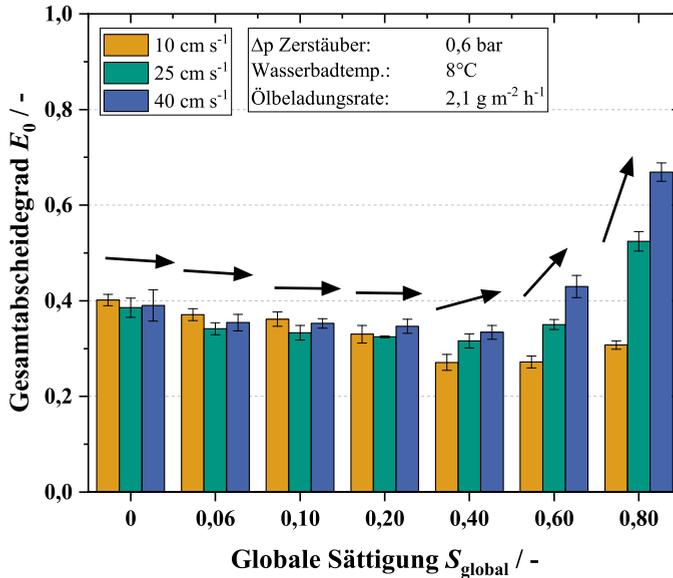


Abbildung 4.10: Gesamtabscheidegrade (vier Wirrfaservliese in Reihe) in Abhängigkeit der globalen Sättigung; nach Straube et al. [63].

globale Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,40$ und $0,60$ wird der geringste Gesamtabscheidegrad festgestellt. Bei diesen Betriebspunkten ist die Kombination aus geringer Anströmgeschwindigkeit und Verlust von effektiver Faserfläche durch akkumuliertes Öl besonders ungünstig, sowohl für Partikeln im Diffusionsbereich als auch im Trägheitsbereich und im Bereich des Sperreffekts. Für Gasgeschwindigkeiten von 25 und 40 cm s^{-1} ist für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} \geq 0,60$ ein Anstieg von E_0 aufgrund einer Ausbildung von größeren, geschlossenen Ölfilmen festzustellen. Es ist eine stärker werdende Auffächerung des Gesamtabscheidegrads von $S_{\text{global}} = 0,60$ zu $S_{\text{global}} = 0,80$ mit steigender Anströmgeschwindigkeit beobachtbar. Bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$ und für Anströmgeschwindigkeiten von 25 und 40 cm s^{-1} werden die höchsten Gesamtabscheidegrade gemessen. Bei diesen Betriebszuständen dominiert die Trägheitsabscheidung durch beinahe geschlossene Ölfilme auf den Wirrfaseranordnungen. Zusätzlich ist für $S_{\text{global}} = 0,80$ und einer Anströmgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} eine erhöhte Diffusionsabscheidung zu beobachten (siehe Abschnitt 4.4).

In einem nächsten Schritt werden die Gesamtabscheidegrade in Abhängigkeit der Filteranströmgeschwindigkeit für alle untersuchten Sättigungszustände in Abbildung 4.11 vorgestellt.

Bis zu einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} \leq 0,40$ sinkt der Gesamtabscheidegrad, unabhängig von der Filteranströmgeschwindigkeit. Ein möglicher Grund hierfür ist der Verlust von besonders effektiver Faserfläche mit steigender Ölbeladung. Für alle Anströmgeschwindigkeiten ist ein

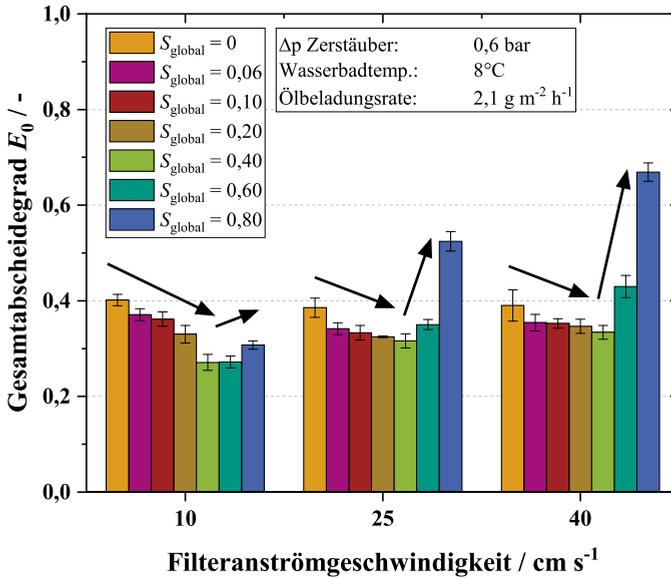


Abbildung 4.11: Gesamtabscheidegrade (vier Wirrfaservliese in Reihe) in Abhängigkeit der Filteranströmgeschwindigkeit (10, 25 und 40 cm s^{-1}); nach Straube et al. [63].

Minimum der Gesamtabscheidegrade für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,40$ festzustellen. Eine geringe Abscheideleistung über alle Größenklassen lässt sich als möglicher Grund hierfür identifizieren (s.o.). Steigt die globale Sättigung weiter an, so ist eine Zunahme von E_0 zu beobachten. Mit steigender Anströmgeschwindigkeit ist wiederum eine stärkere Auffächerung des Gesamtabscheidegrads aufgrund von steigender Abscheidung von Tröpfchen im Bereich der Trägheitsabscheidung und des Sperreffekts festzustellen. Besonders ausgeprägt ist dies wiederum für $S_{\text{global}} = 0,80$ und Anströmgeschwindigkeiten von 25 und 40 cm s^{-1} .

4.6 Vergleich der gewonnenen Ergebnisse dieser Arbeit mit der einschlägigen Literatur

Ein Vergleich von den gewonnenen experimentellen Ergebnissen der vorliegenden Arbeit mit Beobachtungen anderer Autoren ist schwierig. In den meisten Arbeiten zu Koaleszenzfiltern werden Lagenpakete aus mehreren Einzellagen (Lagendicke wesentlich höher im Vergleich zu den dünnen Wirrfaserschichten) untersucht (siehe Abschnitt 1.2.2). Dadurch werden Gesamtabscheidegrade $> 99 \%$ erreicht, welche verglichen mit den Wirrfaservliesen aus dieser Arbeit deutlich höher sind. Zudem vergleichen viele Arbeiten ausschließlich den trockenen, unbeöhlten

Zustand mit dem stationären Zustand hinsichtlich der Abscheideleistung. Zusätzlich werden in der bestehenden Literatur oftmals unterschiedliche Arbeitsfluide mit teilweise stark unterschiedlichen Viskositäten und Oberflächenspannungen eingesetzt. Unterschiedliche Arbeitsfluide mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften können unterschiedliche Flüssigkeitsstrukturen auf Fasern ausbilden, was wiederum Einfluss auf den Abscheidegrad nehmen kann. Des Weiteren zeigen mehrlagige Filterpakete bei der Ölbeladung einen Sättigungsgradienten in Richtung des Aerosolstroms auf, was zu deutlich unterschiedlichen Strukturen der Ölablagerung in verschiedenen Filtertiefen führt. Hierdurch ist es nicht möglich, den isolierten Beitrag einzelner Bereiche eines Koaleszenzfilters (Koaleszenz-, Kanal- und Filmbereich) zur Gesamtpenetration zu betrachten. Dennoch lassen sich qualitativ Tendenzen und Trends aus dieser Arbeit mit der Literatur vergleichen.

Im Folgenden werden die Fraktionsabscheidegrade aus dieser Arbeit mit Arbeiten aus der einschlägigen Literatur verglichen (Abschnitt 4.6.1). Im Anschluss folgt ein Vergleich des Gesamtabscheidegrads mit der Literatur (Abschnitt 4.6.2).

4.6.1 Vergleich von Fraktionsabscheidegraden

In diesem Abschnitt werden die Beobachtungen der vorliegenden Arbeit zum Verhalten des Fraktionsabscheidegrads mit zunehmender Ölsättigung mit Arbeiten aus der Literatur verglichen, welche ebenfalls über Daten bezüglich des Einflusses von abgeschiedener Flüssigkeit auf $T(x_i)$ verfügen. Es wird dabei ausschließlich auf Daten zu oleophilen Filtermedien zurückgegriffen. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht über ausgewählte Arbeiten zu diesem Thema. Hierfür werden die Filtereigenschaften (Fasermaterial, globale Porosität Φ_{global} , Faserdurchmesser x_F und Filterdicke d_{Filter}), die Anströmgeschwindigkeit u , das verwendete Arbeitsmedium sowie die festgestellten Beobachtungen der jeweiligen Autoren mit steigender Sättigung aufgeführt.

Generell sind Arbeiten, welche die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen können, in Tabelle 4.1 grün hinterlegt. Widersprüchliche Arbeiten aus der Literatur sind hingegen rot hinterlegt. So zeigen Charvet et al. [5], Conder & Liew [13], Kolb et al. [57], Penner et al. [46] und Raynor & Leith [7] sehr ähnliche Resultate im Vergleich zur vorliegenden Arbeit für teilweise abweichende Fasermaterialien, Filterdicken, Filteranströmgeschwindigkeiten oder Arbeitsmedien. In all diesen Arbeiten ist der trockene unbeölte Zustand mit dem stationären Zustand (vollständige Ausbildung eines Ölfilms auf der Abströmseite) verglichen. Es wird dabei eine sinkende Diffusionsabscheidung η_D und steigende Abscheidung aufgrund des Sperreffekts und der Trägheit η_{S+T} bei hoher Sättigung im Vergleich zum unbeladenen Zustand beobachtet. Dies lässt sich

Tabelle 4.1: Vergleich von Fraktionsabscheidegraden aus dieser Arbeit mit der Literatur (widersprüchliche Beobachtungen rot, übereinstimmende Beobachtungen grün hinterlegt).

Autor	Faser- material	Φ_{global} [-]	x_F [μm]	d_{Filter} [μm]	u [cm s^{-1}]	Arbeits- medium	Beob. mit stei- gender Beladung
Agranovski et al. [4]	PP	0,89	12	6000	15	Wasser	$\eta_{S+T} \uparrow$
Charvet et al. [5]	Zellulose	0,72	n.a.	340	11 - 42	DEHS	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \uparrow$
Conder & Liew [13]	Edelstahl	0,89 - 0,98	4 - 22	1500 - 32500	10 - 100	Geraniol	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \uparrow$
Gougeon et al. [14]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	10	DES	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \downarrow$
Kolb et al. [57]	Glas	0,94	4 ^a	6400	25	Mineralöl	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \uparrow$
		0,93	2,9 ^a	5100			
		0,93	1,4 ^a	4200			
Payet et al. [15]	Glas	0,92	1 ^a	240	2 - 3,7	DOP, DES, TBP, Mineralöl	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \downarrow$
Penner et al. [46]	Glas	0,93 - 0,94	0,4 - 5	650 - 750	25	Mineralöl	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \uparrow$
Raynor & Leith [7]	Glas	0,94 0,97	2,9 8,5	880	25 5	DEHS Hexadecan	$\eta_D \downarrow$ & $\eta_{S+T} \uparrow$
Vorliegende Arbeit	Glas & PET	0,96	1,5 - 13,6	160	10 - 40	Mineralöl	$\eta_D \downarrow^c$ & $\eta_{S+T} \uparrow$

^a Hierbei handelt es sich um berechnete, mittlere Faserdurchmesser nach Davies [58]

^c Ausnahme: $\eta_D \uparrow$ bei $S_{\text{global}} = 0,80$ und $u = 40 \text{ cm s}^{-1}$

n.a.: Keine Daten oder Informationen vorhanden

DEHS: Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat

DES: Di-Ethyl-Sebacat

DOP: Di-Octyl-Phthalat

TBP: Tri-Butyl-Phosphat

auch in den vorgestellten experimentellen Ergebnissen aus dieser Arbeit, mit Ausnahme von einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$ und einer Filteranströmgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} , feststellen. Erklärt werden kann eine sinkende η_D und steigende η_{S+T} durch ansteigende Gasgeschwindigkeiten bei einsetzender Ansammlung von Flüssigkeit im Filterinneren sowie einer Flüssigkeitsfilmbildung. Ähnlich zu den präsentierten Ergebnissen in dieser Arbeit, berichten

auch Penner et al. [46] (Untersuchungen an industriellen Einzellagen) und Kolb et al. [57] (Untersuchung von Lagenpaketen) von einer Verschiebung der MPPS zu kleineren Tropfengrößen und einer reduzierten Abscheideeffizienz im Bereich der MPPS im stationären Zustand im Vergleich zum anfänglich unbeölten Zustand (aufgrund erhöhter Gasgeschwindigkeit). Agranovski et al. [4] berichten übereinstimmend mit den Ergebnissen dieser Arbeit von einer Zunahme der Abscheideeffizienz im Bereich des Sperreffekts und der Trägheit beim Erreichen des stationären Zustands im Vergleich zum trocken Zustand des Filters.

Gougeon et al. [14] und Payet et al. [15] hingegen zeigen eine globale Abnahme des Fraktionsabscheidegrads über alle vorgestellten Größenklassen ($x_t < 650$ nm [14] und $x_t < 400$ nm [15]). Die Autoren vermuten einen Verlust von besonders wirksamer Faserfläche im beladenen Zustand als Grund für diese Beobachtung. Ob ein quasi-stationärer Zustand der Filter bei der Beladung erreicht wurde ist unbekannt. Dies widerspricht den Ergebnissen der oben genannten Literatur und kann auch im Rahmen der vorliegenden Studie nur bis zu globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,40$ beobachtet werden. Mögliche Gründe für die abweichenden Ergebnisse von Gougeon et al. [14] könnten die unbekanntenen Beladungszustände oder die nicht vollständig bekannten Filtereigenschaften sein. In der Arbeit von Payet et al. [15] werden Aerosole mit feinen Tropfen (< 400 nm) bei vergleichsweise niedrigen Filteranströmgeschwindigkeiten ($2 - 3,7$ cm s⁻¹) eingesetzt. Die Autoren erklären einen sinkenden Gesamtabscheidegrad bei zunehmender Flüssigkeitsbeladung mit einer sinkenden Diffusionsabscheidung aufgrund einer Erhöhung der Gasgeschwindigkeit im Filter. Dabei ist nicht bekannt, ob der Filter bis zu Sättigungen beladen wurde, bei welchen es zum Ausbilden von filmähnlichen Strukturen im Filter kommt. Dieser Widerspruch in der Arbeit von Payet et al. [15] zur vorliegenden Arbeit, könnte demnach mit geringen Filteranströmgeschwindigkeiten in Kombination mit einem feinen Aerosol bei nur geringen Sättigungen begründet werden.

Es kann demnach festgehalten werden, dass die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse gut in die bereits bekannte Literatur eingeordnet werden können. Einzig die Beobachtungen von Gougeon et al. [14] und Payet et al. [15] bezüglich des Einflusses von abgeschiedenen Flüssigkeitsstrukturen auf den Fraktionsabscheidegrad können nicht bestätigt werden. Mögliche Gründe hierfür konnten jedoch identifiziert werden (unbekannte Sättigungszustände, fehlende Filterinformationen, geringe Anströmgeschwindigkeit).

4.6.2 Vergleich von Gesamtabscheidegraden

Nachfolgend werden ausgewählte Arbeiten aus der bekannten Literatur, welche Gesamtabscheidegrade mit zunehmender Flüssigkeitssättigung präsentieren, mit den Beobachtungen dieser Arbeit verglichen. Wiederum werden ausschließlich Arbeiten, welche oleophile Filtermedien einsetzen, aufgeführt. Dazu findet sich nachfolgend Tabelle 4.2, welche diese Literatur nach den bereits bekannten Kriterien aus Tabelle 4.1 auflistet.

Tabelle 4.2: Vergleich von Gesamtabscheidegraden aus dieser Arbeit mit der Literatur (widersprüchliche Beobachtungen rot, übereinstimmende Beobachtungen grün hinterlegt).

Autor	Fasermaterial	Φ_{global} [-]	x_F [μm]	d_{Filter} [μm]	u [cm s^{-1}]	Arbeitsmedium	Beob. mit steigender Beladung
Conder & Liew [13]	Edelstahl	0,89 - 0,98	4 - 22	1500 - 32500	10 - 100	Geraniol	$E_0 \uparrow$
Contal et al. [12]	n.a.	0,93	0,36 ^a	410	2,5 - 19	DOP	$E_0 \downarrow$ bis Filmbildung, dann $E_0 \uparrow$
		0,93	0,93 ^a	460			
		0,92	1,21 ^a	410			
		0,94	3,19 ^a	440			
Frising et al. [6]	Glas	0,92	4 - 22	409	5,8 - 25	DEHS	$E_0 \downarrow$ bis Filmbildung, dann $E_0 \uparrow$
Payet et al. [15]	Glas	0,92	1 ^a	240	2 - 3,7	DOP, DES, TBP, Mineralöl	$E_0 \downarrow$
Penner et al. [33]	Glas	0,94	n.a.	2000 - 5000	10 - 40	Mineralöl	$E_0 \downarrow$ bis Filmbildung, dann $E_0 \uparrow$
Vorliegende Arbeit	Glas & PET	0,96	1,5 - 13,6	160	10 - 40	Mineralöl	$E_0 \downarrow$ bis Filmbildung, dann $E_0 \uparrow$

^a Hierbei handelt es sich um berechnete, mittlere Faserdurchmesser nach Davies [58]

n.a.: Keine Daten oder Informationen vorhanden

DES: Di-Ethyl-Sebacat

DEHS: Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat

DOP: Di-Octyl-Phthalat

TBP: Tri-Butyl-Phosphat

Konsistent mit den Beobachtungen aus der vorliegenden Arbeit, berichten auch Contal et al. [12], Frising et al. [6] und Penner et al. [33] von einer Abnahme des anzahlbezogenen Gesamtabscheidegrads bis zur einsetzenden Filmbildung. Es wird ein Verlust von besonders wirksamer Faserfläche vermutet. Mit dem Ausbilden von größeren, geschlossenen Flüssigkeitsfilmen steigt der Gesamtabscheidegrad auch in den Arbeiten dieser Autoren infolge von zunehmender Trägheitsabscheidung durch den Flüssigkeitsfilm stark an.

Widersprüchlich dazu stehen die Ergebnisse aus der Arbeit von Conder & Liew [13]. Die Autoren beobachten mit zunehmender Beladung einen stetigen Anstieg des Gesamtabscheidegrads. Erklärt wird dies mit einer erhöhten Packungsdichte bei Ansammlung von Flüssigkeit im Filterinneren und damit verbunden einer erhöhten Abscheidung infolge von Trägheit und des Sperr-effekts. Eine mögliche Ursache für diese abweichende Beobachtung könnte das verwendete Arbeitsmedium Geraniol (flüchtiges, ätherisches Öl) oder das verwendete Messgerät (Auswertung des Tropfenkonzentrationen mit einem Mikroskop) sein [1]. Payet et al. [15] berichten hingegen von einer stetigen Abnahme des Gesamtabscheidegrads mit zunehmender Flüssigkeitsbeladung. Vermutet wird ein Verlust von besonders wirksamer Faserfläche. Es sei an dieser Stelle wiederum auf das verwendete feine Aerosol (Tropfen < 400 nm), die niedrigen Filteranströmgeschwindigkeiten ($2 - 3,7 \text{ cm s}^{-1}$) und auf den unbekanntem Sättigungszustand in der Arbeit von Payet et al. [15] verwiesen, welche mögliche Gründe für diesen Widerspruch im Vergleich zur vorliegenden Arbeit darstellen können.

Demnach kann festgehalten werden, dass sich die vorgestellten Ergebnisse aus dieser Arbeit gut mit der einschlägig bekannten Literatur vergleichen lassen. Die Erkenntnisse decken sich mit den Beobachtungen aus den Arbeiten von Contal et al. [12], Frising et al. [6] und Penner et al. [33]. Hierzu im Widerspruch stehende Feststellungen von Conder & Liew [13] oder Payet et al. [15] können auf das Arbeitsmedium bzw. das Messverfahren (Conder & Liew [13]) oder auf das verwendete Aerosol in Verbindung mit sehr geringen Anströmgeschwindigkeiten und unbekanntem Sättigungszuständen (Payet et al. [15]) zurückgeführt werden.

Es kann somit abschließend festgehalten werden, dass sich die vorgestellten Ergebnisse aus dieser Arbeit gut in die einschlägige Literatur einordnen lassen. Mögliche Gründe für widersprüchliche Aussagen bezüglich des Einflusses von abgeschiedenen Flüssigkeitsstrukturen mit unterschiedlichen Sättigungszuständen auf den Fraktions- bzw. Gesamtabscheidegrad wurden sowohl in diesem Abschnitt als auch im vorangegangenen Abschnitt aufgeführt und erläutert.

4.7 Differenzdruckbetrachtung über den dünnen Wirrfaseranordnungen

Die vorgestellten Ergebnisse in Abschnitt 4.4 und 4.5 suggerieren, dass günstige Betriebspunkte für die beste Abscheideleistung der dünnen Wirrfaservliese bei hohen Sättigungen in Kombination mit hohen Filteranströmgeschwindigkeiten liegen. Für den realen Filterbetrieb ist neben der Abscheideeffizienz auch der Druckverlust bzw. der Differenzdruck über den eingesetzten Filtermaterialien von großer Bedeutung. Hohe Differenzdrücke resultieren in hohe Energiekosten für den Betrieb von Filteranlagen.

In diesem Abschnitt wird in einem ersten Schritt die Entwicklung des Differenzdrucks während der Ölbeladungsphase der dünnen Wirrfaseranordnungen betrachtet. In einem zweiten Schritt folgt die Betrachtung der Differenzdrücke während Abscheidegradmessungen (siehe Abschnitt 4.4 und 4.5) von vier Faservliesen in Reihe bei unterschiedlichen Sättigungen und Anströmgeschwindigkeiten.

In Abbildung 4.12 ist die Entwicklung des Differenzdrucks für jede der vier eingesetzten Einzelanlagen aus Abschnitt 4.4 und 4.5 bei einer Anströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1} exemplarisch für einen Messzyklus (sukzessive Ölbeladung anfänglich unbelasteter Wirrfaseranordnungen bis zu einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$) dargestellt.

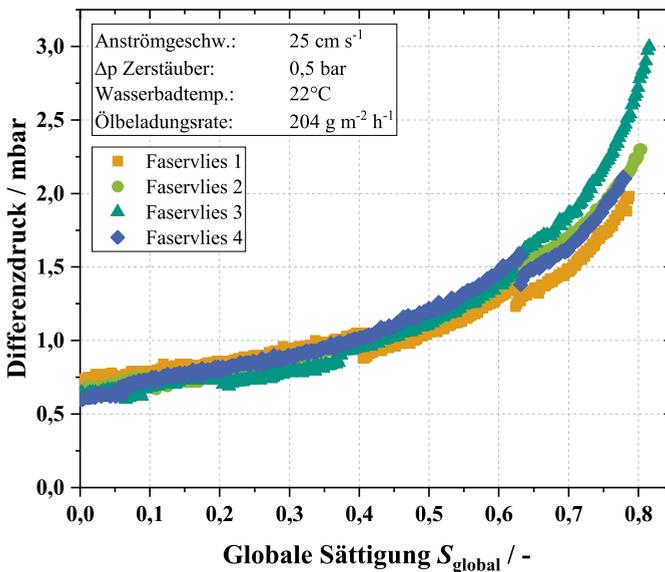


Abbildung 4.12: Entwicklung des Differenzdrucks während der Ölbeladung von einzelnen Wirrfaseranordnungen; nach Straube et al. [63].

Die abgebildeten Differenzdruckkurven für die Faservliese 1, 2, 3 und 4 zeigen einen nahezu stetigen Anstieg bis zu einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} \approx 0,40$. Im Anschluss ist ein steilerer Anstieg des Differenzdrucks mit zunehmender globaler Sättigung zu beobachten. Ab einer globalen Sättigung von etwa $S_{\text{global}} = 0,60$ ist durch einen zunehmend steileren Anstieg in der Differenzdruckkurve für alle Faservliese eine Ölfilmbildung zu erkennen. Für das Faservlies 3 startet diese Filmbildung etwas früher im Vergleich zu Faservlies 1, 2 und 4. Die Ölfilmbildung ist ein zufälliger Prozess und von komplexen strukturellen Eigenschaften der Wirrfaseranordnungen abhängig, welche von Wirrfaseranordnung zu Wirrfaseranordnung variieren können. Hierdurch sind leichte Unterschiede im Differenzdruck bei hohen Sättigungen zu erklären.

Bei globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,06, 0,10, 0,20, 0,40, 0,60$ und $0,80$ werden im Anschluss an die Ölbeladung Abscheidegradmessungen durchgeführt. Dadurch weisen die Differenzdruckkurven für die vier untersuchten Faservliese in Abbildung 4.12 kleine vertikale Versätze bei diesen globalen Sättigungen auf. Nach dem Wiedereinbau der einzelnen Wirrfaservliese in die Beladungskammer ist jeweils ein leicht geringerer Differenzdruck im Vergleich zum Ende des vorangegangenen Beladungszeitraums zu erkennen. Es lässt sich anhand der vertikalen Versätze im Differenzdruck feststellen, dass eine exakte Beladung der Wirrfaseranordnungen bis zur Sollsättigung schwierig ist (Wägung der Einzellagen während dem Beladungsprozess nicht möglich). So lässt sich beispielsweise für Faservlies 4 (blaue Kurve) erkennen, dass dieses etwas zu lange, bis zu einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,63$, beladen wurde. Kleine Unterschiede in der Ölkonzentration bzw. der Ölbeladungsrate lassen sich als möglichen Grund hierfür aufführen.

Eine mögliche Ursache für das Auftreten der vertikalen Versätze im Differenzdruck stellt der Aus- bzw. Einbau der Wirrfaservliese aus bzw. in die Klemmrahmen zur gravimetrischen Bestimmung der globalen Sättigung nach jedem Beladungszustand dar. Es ist denkbar, dass schwach gesättigte abscheiderrelevante Faserfläche an den äußeren Rändern der durchströmbaren Filterfläche nach dem Wiedereinbau für die Durchströmung des Aerosols verfügbar wird. Diese Bereiche können beispielsweise in vorangegangenen Experimenten beim Einbau der Faservliese im Filterhalter geklemmt gewesen sein. Neben der Veränderung der Ölstruktur ist auch eine Umstrukturierung der Faseranordnungen an diesen teilweise durchströmten Randbereichen durch den mehrmaligen Aus- und Einbau denkbar. Hierdurch kann es nach dem Wiedereinbau der Wirrfaseranordnungen zu einem leicht geringeren Differenzdruck im Vergleich zu vor dem Ausbau kommen. Zudem können auch Leckagen nach dem Ein- bzw. Ausbau der Faseranordnungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

In der Literatur finden sich ebenfalls Arbeiten, in welchen unterschiedliche Differenzdrücke bei Filtrationsversuchen mit Unterbrechungen untersucht wurden. Frising et al. [6] oder Kolb et al. [42] zeigen einen Anstieg des Differenzdrucks nach Ein- und Ausschaltzyklen des Gasstroms.

Diese Autoren untersuchten jedoch in ihren Experimenten mehrlagige Filterpakete im quasi-stationären Zustand. Bei diesen Lagenpaketen können Umverteilungsprozesse in Richtung des Luftstroms zwischen Bereichen mit unterschiedlicher Sättigung auftreten. Im quasi-stationären Zustand weisen diese Filter einen nahezu geschlossenen Ölfilm auf der Filterabströmseite (benetzbare Medien) auf und Öl fließt als Drainage an der Rückseite des Filters ab. Wenn der Gasstrom im quasi-stationären Zustand abgeschaltet wird, kann Öl aufgrund kapillarer Kräfte (benetzbare Medien) zurück in die letzte Filterlage gezogen werden, was zu einer Zunahme des Differenzdrucks führt, wenn der Gasstrom wieder eingeschaltet wird [42].

In dieser Arbeit wird jedoch kein quasi-stationärer Zustand erreicht und die verwendeten Faserliese (wesentlich geringere Dicke im Vergleich zu industriell eingesetzten Einzellagen) weisen keine vollständige Sättigung mit Öl auf. Aus diesem Grund ist es wahrscheinlich, dass die beobachteten Unterschiede im Differenzdruck bei der Beladung der dünnen Wirrfaseranordnungen aus dem Aus- bzw. Einbauprozess nach Erreichen einer höheren Sättigungsstufe abzuleiten sind. In Abbildung 4.13 ist der Differenzdruck von vier Wirrfaseranordnungen in Reihe für unterschiedliche globale Sättigungen und Filteranströmgeschwindigkeiten dargestellt.

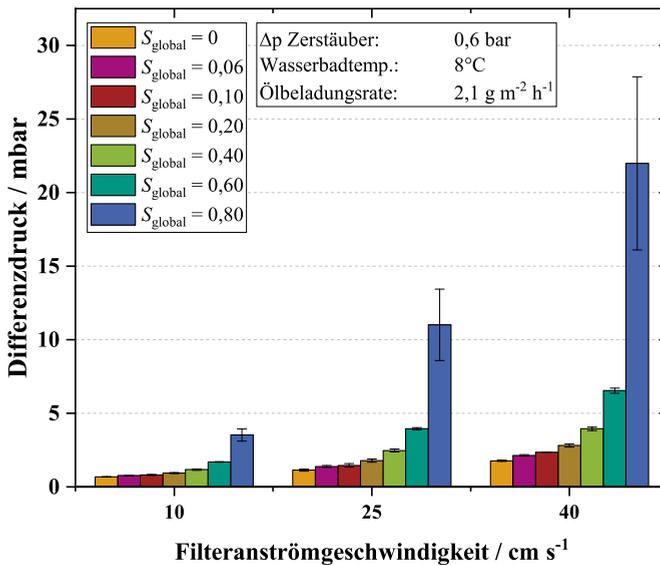


Abbildung 4.13: Differenzdruck von vier Wirrfaseranordnungen in Reihe für unterschiedliche Sättigungszustände und Anströmgeschwindigkeiten; nach Straube et al. [63].

Bei Betrachtung der Differenzdrücke in Abbildung 4.13 fällt auf, dass diese unabhängig von allen untersuchten Filteranströmgeschwindigkeiten mit zunehmender globaler Sättigung aufgrund

von zunehmender akkumulierter Ölmasse in den Wirrfaserschichten stetig ansteigen. Die präsentierten Differenzdrücke stammen aus allen in Abschnitt 4.4 und 4.5 vorgestellten Experimenten und stellen Mittelwerte dar (mindestens drei Versuche für jede Kombination aus globaler Sättigung und Anströmgeschwindigkeit). Für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,60$ lassen sich kaum Fehlerbalken erkennen. Dies lässt darauf schließen, dass nach dem Auswaschen in Isopropanol keine nennenswerten Mengen an abgeschiedenem Öl auf den Wirrfaseranordnungen zurückbleiben und die Faserschichten sehr ähnliche strukturelle Eigenschaften aufweisen. Insbesondere zwischen den globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,60$ und $0,80$ ist ein steiler Anstieg des Differenzdrucks zu erkennen, was auf eine Ölfilmbildung zurückzuführen ist. Bei der höchsten globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$ sind für alle Anströmgeschwindigkeiten die größten Fehlerbalken zu beobachten. Wie in Abbildung 4.12 ersichtlich, setzt für einzelne Wirrfaseranordnungen der steilere Anstieg in der Differenzdruckkurve, also die Ölfilmbildung, etwas früher ein als für andere Faservliese. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf verwiesen, dass die Ölfilmbildung von komplexen strukturellen Eigenschaften der Wirrfaseranordnungen abhängt und zwischen unterschiedlichen Wirrfaseranordnungen variieren kann. Hierdurch ergeben sich vor allem bei dem höchsten Beladungszustand leicht unterschiedliche Differenzdrücke, was wiederum in Schwankungen des Differenzdrucks bei vier Faservliesen in Reihe (vgl. Abbildung 4.13) und folglich in größere Fehlerbalken bei diesen Sättigungen resultiert.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde abgeschiedenes Öl auf dünnen oleophilen Wirrfaseranordnungen (Dicke wesentlich reduziert im Vergleich zu industriell eingesetzten Filterlagen) bei variierender Sättigung bis zu einer minimalen Größe von wenigen Mikrometern mit Hilfe eines Mikro-Computertomographen (μ -CT) identifiziert, analysiert und der Einfluss der abgeschiedenen Ölstrukturen auf das Abscheideverhalten und den Differenzdruck über den Wirrfaseranordnungen bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten untersucht.

Um möglichst homogene Sättigungsprofile innerhalb einer Faserschicht zu erzeugen, ist Filtermaterial mit einer wesentlich reduzierten Lagendicke im Vergleich zu industriell eingesetzten Filterlagen (Lagendicke ca. 0,5 - 1 mm) notwendig. Aus diesem Grund wurden in einem ersten Schritt dünne, homogene und hochporöse Faservliese mit einem Flächengewicht von 15 g m^{-2} , einer Dicke von ca. $160 \mu\text{m}$ und einer globalen Porosität (durch Wägung bestimmt) von $\Phi_{\text{global}} = 0,959$ an einem Blattbildner eigens hergestellt. Es wurde eine Fasermischung aus 80 ma.-% Mikroglassfasern und aus 20 ma.-% PET-Fasern verwendet.

Mit einem μ -CT wurden anschließend mit Ölnebel beaufschlagte Faseranordnungen (fünf unterschiedliche Sättigungszustände im Sättigungsbereich $0,02 \leq S_{\text{global}} \leq 0,20$) untersucht, welche jeweils bei einer Anströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1} beladen wurden. Durch eine KI gestützte Software konnten die μ -CT Aufnahmen erfolgreich segmentiert und somit zwischen den unterschiedlichen Phasen Luft, Öl, Mikroglas- und PET-Fasern differenziert werden.

Nach der Segmentierung wurde die mittels μ -CT bestimmte lokale Porosität und Sättigung, mit der gravimetrisch bestimmten globalen Porosität und Sättigung verglichen. Dabei wurde eine nahezu identische lokale ($\Phi_{\text{lokal}} = 0,958$) und globale Porosität ($\Phi_{\text{global}} = 0,959$) der Wirrfaseranordnungen ermittelt. Beim Vergleich der lokalen und globalen Sättigung war für globale Sättigungen $S_{\text{global}} \leq 0,10$ eine geringere lokale Sättigung im Vergleich zur globalen Sättigung erkennbar. Ein möglicher Grund für diese Beobachtung ist die untere Auflösungsgrenze des μ -CTs. Ölstrukturen $< 2 \mu\text{m}$ lassen sich mit dem verwendeten Gerät nur schwer identifizieren. Durch eine Abschätzung einer mittleren Ölschichtdicke auf nicht beölter, freier Faseroberfläche konnte festgestellt

werden, dass fehlende Ölmengendifferenzen, resultierend aus lokaler und globaler Sättigung, in Form von dünnen filmähnlichen Ölstrukturen (berechnete mittlere Ölfilmstärke $< 2 \mu\text{m}$) auf Mikroglas- oder PET-Fasern vorliegen können. Über die Plateau-Rayleigh-Instabilität konnte ein prinzipielles Vorhandensein von Ölfilmen in diesem Größenbereich bestätigt werden. Ölstrukturen in diesem Größenbereich können mit dem eingesetzten μ -CT nicht aufgelöst werden, wodurch die Unterschiede in lokaler und globaler Porosität erklärt werden können. Für eine globale Sättigung $S_{\text{global}} = 0,20$ wurden stark fluktuierende lokale Sättigungen ($0,057 - 0,394$) beobachtet. Durch verstärkte Koaleszenz- und Umlagerungsvorgänge auf lokaler Ebene kann Öl aus Nachbarbereichen umverteilt werden. Durch diese Ölumverteilungen können lokale Sättigungen identifiziert werden, welche stark von der global erwartbaren Sättigung abweichen.

Um zwischen unterschiedlichen, abgeschiedenen Ölstrukturen im Hinblick auf deren Häufigkeit und Größe unterscheiden zu können, wurde in einem nächsten Schritt eine Routine entwickelt, welche abhängig von der Voxelanzahl, dem minimalen Feret Durchmesser und der Sphärizität, identifizierte Ölstrukturen in unterschiedliche Klassen aufteilt. So wurden die abgeschiedenen Ölstrukturen in die Klassen *Segmentierungsartefakte*, *kleine Ölstrukturen*, *Öltropfen* und *Ölsegel* eingeteilt. Es zeigte sich, dass unabhängig vom Sättigungszustand der dünnen Wirrfaseranordnungen, massenbezogen der Großteil des abgeschiedenen Öls in Form von Ölsegeln zwischen benachbarten Fasern vorhanden ist ($> 80 \text{ ma.-%}$), gefolgt von Öltropfen ($5 - 15 \text{ ma.-%}$) und kleinen Ölstrukturen ($< 5 \text{ ma.-%}$). Anzahlbezogen wurden über 85% der identifizierten Ölstrukturen der Klasse Segmentierungsartefakte zugeordnet. Im Hinblick auf den Massenanteil der Segmentierungsartefakte konnte jedoch gezeigt werden, dass diese Klasse einen vernachlässigbaren Beitrag zur Gesamtmasse des abgeschiedenen Öls leistet (Anteil zur Gesamtmasse an Öl $\ll 1 \text{ ma.-%}$).

Bei einem Vergleich der Konzentrationen und Verteilungen der abgeschiedenen und identifizierten Öltropfen wurde beobachtet, dass die Gesamtanzahlkonzentration von μ -CT Aufnahme zu μ -CT Aufnahme Schwankungen unterlag. Die Gesamtmassenkonzentration der Öltropfen lag für globale Sättigungen von $0,04 \leq S_{\text{global}} \leq 0,10$ in etwa auf einem konstanten Niveau. Für die geringste, mit dem μ -CT untersuchte, globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,02$ zeigte auch die Massenkonzentration an abgeschiedenen Öltropfen den geringsten Wert und für die höchste, mit dem μ -CT untersuchte, globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$ wurde die höchste Massenkonzentration von abgeschiedenen Öltropfen beobachtet. Bei Betrachtung der Tropfengrößenverteilungen wurde sowohl anzahl- als auch massenbezogen mit steigender globaler Sättigung eine Zunahme des mittleren Feret Durchmessers beobachtet. Weiterhin wurde ein minimaler Primärtropfendurchmesser nach einem Aufbruch eines anfänglichen dünnen Ölfilms auf den Fasern abgeschätzt. Dieser wurde zu $2,79 \mu\text{m}$ bestimmt und liegt damit in einem Größenbereich, welcher mit dem

eingesetzten μ -CT identifizierbar ist. Zudem wurden für alle, mit dem μ -CT untersuchten, Sättigungszustände festgestellt, dass der Großteil des abgeschiedenen Öls in den ersten 80 % der Wirrfaserschichten in Durchströmungsrichtung zu finden ist.

Des Weiteren wurde ein möglicher Gasgeschwindigkeitseinfluss auf gebildete Ölstrukturen analysiert. Hierfür erfolgte eine Untersuchung eines Sättigungszustands von $S_{\text{global}} = 0,06$ bei Anströmgeschwindigkeiten von 10, 25 und 40 cm s^{-1} . Sowohl die anzahl- als auch massenbezogenen Ölmengenanteile von Artefakten, kleinen Ölstrukturen, Öltröpfen und Ölsegeln wiesen keine Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten auf. Zudem wurde festgestellt, dass die Tropfengrößenverteilungen der abgeschiedenen und mit dem μ -CT identifizierten Öltröpfen einen nahezu identischen Verlauf aufwiesen. Somit konnte gezeigt werden, dass bei Anströmgeschwindigkeiten von 10 - 40 cm s^{-1} abgeschiedenes Öl auf Wirrfaseranordnungen seine Struktur durch Deformationen oder Koaleszenz aufgrund von variierenden Gasgeschwindigkeiten nicht messbar beeinflusst.

Nach der Identifizierung und Analyse der abgeschiedenen Ölstrukturen mittels Mikrocomputertomographie, erfolgten Abscheidegradmessungen an den dünnen Wirrfaseranordnungen bei unterschiedlichen globalen Sättigungen und unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten. Der betrachtete Parameterraum wurde hierfür auf sieben unterschiedliche Sättigungszustände ($0 \leq S_{\text{global}} \leq 0,80$) und drei anwendungsorientierte Filteranströmgeschwindigkeiten (10, 25 und 40 cm s^{-1}) erweitert. Vor der erstmaligen Bestimmung von Abscheidegraden an den dünnen Wirrfaseranordnungen, wurden diese in einem Isopropanolbad zur Vorkonditionierung ausgewaschen. Vorversuche zeigten die Notwendigkeit dieses Arbeitsschritts, um mögliche elektrische Ladungen aus dem Herstellungsprozess der Wirrfaseranordnungen zu neutralisieren und vergleichbare experimentelle Ergebnisse zu erhalten. Durch Abscheidegradmessungen und mikroskopische Aufnahmen (mittels Laser-Scanning-Mikroskop) konnte gezeigt werden, dass der Auswaschvorgang in Isopropanol keinen Einfluss auf die Abscheideeffizienz sowie die Struktur der Wirrfaseranordnungen nimmt. Es wurde eine experimentelle Vorgehensweise zur wiederholbaren Bestimmung von Abscheidegraden an den dünnen Wirrfaserschichten entwickelt. Dazu gehörte die Auswahl einer geeigneten Anzahl an Wirrfaseranordnungen in Reihe, da Abscheidegrade an einzelnen Wirrfaserschichten aufgrund ihrer reduzierten Dicke eine hohe Penetration, verbunden mit starken statistischen Schwankungen aufwiesen. In einer speziell konstruierten Filterkammer für die Aufnahme mehrerer Wirrfaseranordnungen in Reihe (Abstand zwischen den Faservliesen ca. 16 mm) wurden in verschiedenen Durchläufen eine, vier und acht Faserschichten in Reihe eingesetzt und Fraktionsabscheidegrade bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass die Penetration pro Faserschicht, für eine, vier und acht Faserschichten in Reihe nahezu identisch und somit eine Reihenschaltung der Faserschichten zulässig ist. Da für vier Faserschichten in

Reihe Fraktionsabscheidegrade mit ausreichend geringen statistischen Schwankungen bestimmt werden konnten, wurden für alle folgenden experimentellen Untersuchungen vier Faserschichten in Reihe verwendet. Des Weiteren wurde die Stabilität von abgeschiedenen Ölstrukturen bei erhöhten Gasgeschwindigkeiten untersucht. Im Gegensatz zu zuvor evaluierten Gasgeschwindigkeitseinflüssen auf Form und Größe der gebildeten Ölstrukturen bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,06$, wurden hierbei Fraktionsabscheidegrade an vorgesättigten Wirrfaseranordnungen (identische Sättigung je Faserschicht) mit wesentlich höherer globaler Sättigung ($S_{\text{global}} = 0,60$ und $0,80$) bestimmt. Die Untersuchungen zeigten, dass die Fraktionsabscheidegrade bei Anströmgeschwindigkeiten von 10 cm s^{-1} vor und nach einer Gasgeschwindigkeitserhöhung auf 40 cm s^{-1} nahezu identisch sind. Nennenswerte Umstrukturierungen von abgeschiedenem Öl bei erhöhter Filteranströmgeschwindigkeit (40 cm s^{-1}), welche Einfluss auf den Fraktionsabscheidegrad nehmen könnten, sind somit auszuschließen.

Bei Betrachtung des Fraktionsabscheidegrads zeigte sich mit zunehmender globaler Sättigung der Wirrfaseranordnungen und zunehmender Anströmgeschwindigkeit eine Abnahme der Diffusionsabscheidung aufgrund einer reduzierten Verweilzeit. Darüber hinaus wurde für Tröpfchen $> 100 \text{ nm}$ und globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} \leq 0,40$ eine Verschlechterung des Fraktionsabscheidegrads festgestellt. Eine Verringerung der effektiv wirksamen Faserfläche infolge von abgeschiedener Flüssigkeit wird für diese Beobachtung vermutet. Ab globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} \geq 0,40$ konnte eine partielle Filmbildung auf den Wirrfaseranordnungen mittels Durchlichtbildern beobachtet werden, welche für eine Verbesserung des Fraktionsabscheidegrads im Trägheitsbereich verantwortlich ist. Mit zunehmender Filteranströmgeschwindigkeit zeigte sich ebenfalls eine verbesserte Abscheidung im Bereich des Sperreffekts und im Trägheitsbereich (Tropfengröße $> 100 \text{ nm}$) aufgrund der Massenträgheit der Tropfen. Ab globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} \geq 0,60$ wurde dieses Verhalten bedingt durch weitere Filmbildung auf den Faserschichten noch ausgeprägter. Für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$ und einer Filteranströmgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} wurde eine zunehmende Diffusionsabscheidung festgestellt. Diese Beobachtung konnte nicht abschließend geklärt werden. Vorstellbar ist eine Veränderung des Strömungsfeldes bzw. der Stromlinien der Luft bei steigender Gasgeschwindigkeit hin zum Ölfilm. Infolgedessen verringert sich die Distanz für den diffusiven Transport bei zunehmender Gasgeschwindigkeit, was zu einer erhöhten Diffusionsabscheidung an dieser zusätzlichen Kollektorfläche führen kann.

Weiterhin wurde eine Verschiebung der *Most Penetrating Particle Size* (MPPS) mit zunehmender Sättigung, unabhängig von der Filteranströmgeschwindigkeit, hin zu kleineren Tropfengrößen beobachtet. Dies kann durch eine steigende Gasgeschwindigkeit im Inneren der Faserschichten aufgrund von Öl blockierten Bereichen erklärt werden. Zudem wurde eine verschlechterte

Abscheideeffizienz im Bereich der MPPS mit zunehmender Filteranströmgeschwindigkeit festgestellt. Einzig bei einer Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$ und der höchsten Anströmgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} wurde ein deutlicher Anstieg der Abscheideeffizienz im Bereich der MPPS beobachtet. Wiederum steht eine Veränderung des Strömungsfeldes hin zum Ölfilm und damit verbunden eine erhöhte Diffusionsabscheidung für diese Beobachtung im Verdacht.

Mit zunehmender globaler Sättigung bis zu $S_{\text{global}} = 0,40$ wurde unabhängig von der Filteranströmgeschwindigkeit eine Abnahme des Gesamtabseidegrads festgestellt. Der Verlust von effektiver Faserfläche infolge von abgeschiedener Flüssigkeit und eine verschlechterte Diffusionsabscheidung könnten hierfür verantwortlich sein. Bei Sättigungszuständen von $S_{\text{global}} \geq 0,60$ wurde eine Erhöhung des Gesamtabseidegrads durch vollständig mit Öl gesättigte Bereiche beobachtet. Diese partiellen Ölfilme erhöhen die Trägheitsabscheidung deutlich und, bei $S_{\text{global}} = 0,80$ sowie einer Anströmgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1} , zusätzlich die Diffusionsabscheidung.

In diesem Zusammenhang wurden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit ausgewählter Literatur verglichen. Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit konnten gut in die bestehende Literatur eingeordnet werden. Festgestellte Trends zum Verhalten des Fraktions- bzw. Gesamtabseidegrad mit zunehmender Flüssigkeitsbeladung ließen sich auch in der Literatur finden und konnten die gefundenen Ergebnisse bestätigen. Widersprüchliche Aussagen einzelner Autoren zum Einfluss abgeschiedener Flüssigkeit im Filter auf den Abscheidegrad konnten aufgelöst werden.

Schließlich wurde die Differenzdruckentwicklung während der Beladung der dünnen Wirrfaserschichten diskutiert. Während der Ölbeladung der einzelnen Faserschichten wurde ein kontinuierlicher und mit der Zeit steiler werdender Anstieg des Differenzdrucks aufgrund von akkumulierender Ölmasse im Inneren der Wirrfaseranordnungen beobachtet. Zusätzlich wurde der Differenzdruck von vier Faserschichten in Reihe für unterschiedliche Sättigungszustände und Filteranströmgeschwindigkeiten betrachtet. Dabei wurde ein kontinuierlicher Anstieg des Differenzdrucks mit steigender globaler Sättigung festgestellt sowie Schwankungen des Differenzdrucks bei globalen Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,80$ beobachtet, welche auf das unterschiedliche Einsetzen der Ölfilmbildung individueller Faserschichten zurückgeführt werden konnte.

5.2 Ausblick

Ausgehend von den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit, können in zukünftigen Untersuchungen die Einzelbeiträge der Penetrationen des Koaleszenzbereichs, des Kanalbereichs und des

Filmbereichs bestimmt und in ein neues Modell zur Beschreibung des Gesamtpenetrationsverhaltens von Koaleszenzfiltern eingearbeitet werden. Diese Arbeit liefert bereits eine umfangreiche Datengrundlage zum tieferen Verständnis über das Penetrationsverhalten des Koaleszenzbereichs von oleophilen Filtermedien für unterschiedliche globale Sättigungen und variierende Filteranströmgeschwindigkeiten. Somit kann das Kanal-Film-Modell um den Beitrag der Einzelpenetrationen des Koaleszenzbereichs, des Kanalbereichs und des Ölfilms zur Gesamtpenetration eines multilagigen Koaleszenzfilters erweitert werden. Damit ist die noch offene Fragestellung zu beantworten, welche Bereiche eines Koaleszenzfilters (Koaleszenzbereich, Kanalbereich und Ölfilm) welchen Beitrag zur Gesamtpenetration liefern. Dabei sollten Einflussgrößen wie die Gasgeschwindigkeit, die Sättigung, die Benetzbarkeit und der Faserdurchmesser der Filtermedien variiert werden.

Für ein tieferes Verständnis über das Verhalten des Fraktionsabscheidegrads im Diffusionsbereich bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,80$ und hohen Filteranströmgeschwindigkeiten, sollten in weiterführenden Arbeiten diese Betriebszustände genauer untersucht werden, da noch keine endgültige Erklärung für den beobachteten Anstieg des Fraktionsabscheidegrads für Tropfen < 100 nm (im Bereich der Diffusionsabscheidung) bei hoher Sättigung und Filteranströmgeschwindigkeit geliefert werden kann.

Weiterhin sollten experimentelle Untersuchungen zum Aufbruch eines anfänglichen dünnen Ölfilms auf Fasern mit unterschiedlichem Durchmesser durchgeführt werden (Plateau-Rayleigh-Instabilität). In der Literatur finden sich nur wenige und teilweise widersprüchliche Arbeiten zur Größe von entstehenden Primärtropfen und dem Tropfenabstand nach einem Aufbruch eines Ölfilms auf Fasern. Durch visuelle Beobachtung während der Ölbeladung von Einzelfasern oder Faserarrays sollte die maximale Ölschichtdicke auf Fasern unterschiedlichstem Durchmesser (ggf. auch unterschiedlicher Fasermaterialien) bestimmt werden. Nach einem Aufbruch des Ölfilms sollten weiterhin Charakteristika wie die entstehende Tropfengröße, der Tropfenabstand, die Tropfenform, Ölfilmrückstände auf Fasern oder der Benetzungswinkel zwischen Tropfen und Faser bestimmt und mit der theoretischen Literatur verglichen werden. Damit können widersprüchliche Aussagen in der größtenteils theoretisch ausgerichteten Literatur aufgelöst und wichtige Erkenntnisse zur Tropfenentstehung auf Fasern gesammelt werden.

Überdies sollten ebenfalls durch visuelle Betrachtung Beladungseffekte auf mikroskopischer Ebene hoch zeitaufgelöst aufgenommen werden. Hiermit soll die noch offene Fragestellung beantwortet werden, welche Bereiche eines Koaleszenzfilters besonders abscheiderelevant sind und an welchen charakteristischen Faserstrukturen sich favorisiert und bereits bei geringen Sättigungen Ölsegel ausbilden. Darüber hinaus ist durch hochauflösende optische Beobachtung zu klären, welche charakteristische Ölstrukturen (z.B. Ölsegel) Ausgangspunkt für die Ausbildung von Ölkämen sind.

6 Summary

In the present study, deposited oil on thin, oleophilic fiber sheets (reduced thickness compared to industrially applied filter layers) was identified, analyzed, and the influence of deposited oil structures on the separation efficiency and pressure drop across the fiber sheets at varying saturations, down to a minimum size of a few micrometers, was investigated using micro-computed tomography (μ -CT).

To achieve as homogeneous saturation profiles as possible within a fiber sheet, filter material with a significantly reduced layer thickness compared to industrially utilized filter layers (layer thickness approximately 0.5 - 1 mm) is necessary. Therefore, in a first step, thin, homogeneous, and highly porous fiber sheets with a basis weight of 15 g m^{-2} , a thickness of approximately $160 \mu\text{m}$, and a global porosity (determined gravimetrically) of $\Phi_{\text{global}} = 0.959$ were specifically manufactured utilizing a sheet former. A fiber mixture consisting of 80 wt. % micro glass fibers and 20 wt. % PET fibers was utilized.

Subsequently, fiber sheets loaded with oil mist (five different saturation states in the saturation range $0.02 \leq S_{\text{global}} \leq 0.20$), each loaded at a filtration velocity of 25 cm s^{-1} , were examined utilizing μ -CT. The μ -CT images were successfully segmented utilizing AI-based software, allowing differentiation between air, oil, micro glass, and PET fibers.

After segmentation, local porosity and saturation (determined via μ -CT) were compared with global porosity and saturation (determined gravimetrically). Nearly identical local ($\Phi_{\text{local}} = 0.958$) and global porosities ($\Phi_{\text{global}} = 0.959$) of the fiber sheets were found. When comparing local and global saturation, lower local saturation values compared to global saturation values were observed for global saturations $S_{\text{global}} \leq 0.10$. A possible reason for this observation is the lower resolution limit of the μ -CT, as oil structures $< 2 \mu\text{m}$ can hardly be identified with the system.

To distinguish between different deposited oil structures in terms of their frequency and size, a routine was developed that classifies identified oil structures into different categories based on voxel count, minimum Feret diameter, and sphericity. Deposited oil structures were categorized as *Segmentation Artifacts*, *Small Oil Structures*, *Oil Droplets*, and *Oil Sails*. It was shown that regardless of the saturation state of the thin fiber sheets, the majority of the deposited oil mass is present in the form of oil sails between adjacent fibers ($> 80 \text{ wt.-%}$), followed by oil droplets (5 - 15 wt.-%) and small oil structures ($< 5 \text{ wt.-%}$). In terms of quantity, over 85 % of the identified

oil structures were found to be segmentation artifacts. However, in terms of mass contribution to the total deposited oil mass, this class was shown to make a negligible contribution (contribution to the total oil mass $\ll 1$ wt.-%).

When comparing the concentrations and distributions of deposited and identified oil droplets, it was observed that the total number concentration fluctuated significantly between different μ -CT scans. The total mass concentration of deposited oil droplets remained approximately constant for global saturations of $0.04 \leq S_{\text{global}} \leq 0.10$ and showed the lowest concentration for the lowest with the μ -CT investigated global saturation of $S_{\text{global}} = 0.02$ and the highest mass concentration for the highest with the μ -CT investigated global saturation of $S_{\text{global}} = 0.20$. Examining droplet distributions, both in terms of number and mass, an increase in the mean Feret diameter was observed with increasing global saturation. Additionally, for all investigated saturation states with the μ -CT, it was found that the majority of the deposited oil is located in the first 80 % of the fiber sheets in the direction of air flow.

Subsequently, a possible influence of gas velocity on formed oil structures was investigated. For a saturation state of $S_{\text{global}} = 0.06$, filtration velocities of 10, 25, and 40 cm s^{-1} were examined. Both the number and mass-based oil quantities of segmentation artifacts, small oil structures, oil droplets, and oil sails showed no differences between different filtration velocities. It was also shown that the droplet size distributions of deposited oil droplets followed an almost identical course. Thus, it was demonstrated that, at flow velocities ranging from 10 - 40 cm s^{-1} , deposited oil on fiber sheets does not measurably influence its structure through deformations or coalescence due to varying gas velocities.

Following the identification and analysis of deposited oil structures utilizing micro-computed tomography, separation efficiency measurements were conducted on thin fiber sheets at varying global saturations and different filtration velocities. The considered experimental parameters were expanded to seven different saturation states ($0 \leq S_{\text{global}} \leq 0.80$) and three application-oriented filtration velocities (10, 25, and 40 cm s^{-1}). Before the initial determination of separation efficiencies of the thin fiber sheets, they were pre-conditioned by washing them in isopropanol. Preliminary experiments indicated the necessity of this step to neutralize potential electric charges from the manufacturing process of the fiber sheets to obtain comparable experimental results. Separation efficiency measurements and microscopic images (via laser scanning microscope) showed that the washout process in isopropanol had no influence on the separation efficiency or the structure of the fiber sheets. An experimental procedure for the repeatable determination of separation efficiencies on the thin fiber sheets was developed. This included selecting an appropriate number of fiber sheets in series, as separation efficiencies of singular fiber sheets, due to their reduced thickness, exhibited high penetration with significant statistical fluctuations. In a specially

designed filter chamber for accommodating multiple fiber sheets in series (distance between fiber sheets approximately 16 mm), one, four, and eight fiber sheets were installed in series, and fractional separation efficiencies were determined. It was demonstrated that the penetration per fiber sheet, for one, four, and eight fiber sheets in series, was identical, allowing a series connection of fiber sheets. Since reasonable fractional separation efficiencies with sufficiently low statistical fluctuations could be determined for four fiber sheets in series, four sheets were chosen for all subsequent experimental investigations. Furthermore, the stability of deposited oil structures at elevated gas velocities was examined. In contrast to previously evaluated gas velocity influences on the shape and size of deposited oil structures at global saturations of $S_{\text{global}} = 0.06$, fractional separation efficiencies were determined for pre-saturated fiber sheets (identical saturation per fiber sheet) with significantly higher global saturation ($S_{\text{global}} = 0.60$ and 0.80). It was shown that fractional separation efficiencies at filtration velocities of 10 cm s^{-1} before and after an increase in gas velocity to 40 cm s^{-1} were nearly identical. Substantial restructuring of deposited oil at increased filtration velocity (40 cm s^{-1}), which could affect fractional separation efficiency, could thus be ruled out.

Examining the fractional separation efficiency, a decrease in diffusion separation due to reduced residence time was observed with increasing global saturation of the fiber sheets and increasing filtration velocity. Furthermore, a deterioration in fractional separation efficiency was recorded for droplets $> 100 \text{ nm}$ and global saturations of $S_{\text{global}} \leq 0.40$. A reduction of the collection relevant fiber surface area due to deposited liquid is suspected to be the cause of this observation. Partial film formation on the fiber sheets was observed at global saturations of $S_{\text{global}} \geq 0.40$, leading to an improvement in fractional separation efficiency in the inertia range. With increasing filtration velocity, enhanced separation in the inertia range (droplet size $> 100 \text{ nm}$) was also observed. This phenomenon became more pronounced at even higher global saturations of $S_{\text{global}} \geq 0.60$ due to enhanced formation of oil films on the fiber sheets. For a global saturation of $S_{\text{global}} = 0.80$ and a filtration velocity of 40 cm s^{-1} an increasing diffusion separation was observed. This observation could not be conclusively explained. A possible explanation is a change in the flow field or streamlines of the air with increasing gas velocity towards the oil film. Consequently, the distance for diffusive transport may decrease with increasing gas velocity, possibly leading to increased diffusion separation on this additional collector surface.

Moreover, a shift of the Most Penetrating Particle Size (MPPS) towards smaller droplet sizes was observed with increasing saturation, regardless of the filtration velocity. This can be explained by a higher gas velocity inside the fiber sheets due to blocked areas by deposited oil. In addition, a deteriorated separation efficiency in the MPPS range with increasing filtration velocity was observed for each saturation state. Only at a global saturation of $S_{\text{global}} = 0.80$ and a filtration velocity of 40 cm s^{-1} a significant increase in separation efficiency in the MPPS range observed.

Again, a change in the flow field towards the oil film is suspected, favoring diffusion separation. Furthermore, regardless of the filtration velocity, a decrease in overall separation efficiency was observed with increasing global saturation up to $S_{\text{global}} = 0.40$. The loss of collection relevant fiber surface area and a decreased diffusional separation due to deposited liquid could be responsible for this observation. At higher saturation states ($S_{\text{global}} \geq 0.60$), an increase in overall separation efficiency was observed due to fully oil-saturated regions, significantly increasing the inertial separation and, at a filtration velocity of 40 cm s^{-1} , also increase the diffusion separation. In this context, the findings of the present study were compared with selected literature. The insights gained from this study could be well integrated into the existing literature. Observed trends regarding the behavior of fractional or total separation efficiency with increasing liquid saturation could also be found in the literature and were able to corroborate the findings. Contradictory statements from different authors regarding the influence of separated liquid in the filter on the separation efficiency were resolved.

Finally, the differential pressure during the loading of the thin fiber layers was monitored. During the oil loading of individual fiber sheets, a continuous and steeper increase in differential pressure due to accumulating oil mass inside the fiber sheets was observed over time. Additionally, fluctuations in differential pressure were recorded at global saturations of $S_{\text{global}} = 0.80$, attributed to a different onset of oil film formation on individual fiber sheets.

A Anhang

A.1 Aufbau und Funktion eines Laser-Scanning-Mikroskops

Für einen zerstörungsfreien Vergleich von Wirrfaserschichten eignet sich als schnelle Methode die Laser-Scanning-Mikroskopie (LSM). Das in dieser Arbeit eingesetzte LSM (VK-X 100K, Keyence Corporation, Osaka, Japan) bietet die Möglichkeit hochauflösende, dreidimensionale Oberflächeninformationen einer Probe in wenigen Minuten zu gewinnen. Soll ein Wirrfaservlies nach einer Strukturanalyse (unbeladen als auch beladen) erneut im Labor eingesetzt werden, kann auf diese bildgebende Messtechnik zurückgegriffen werden. Das Funktionsprinzip eines Laser-Scanning-Mikroskops ist Abbildung A.1 zu entnehmen.

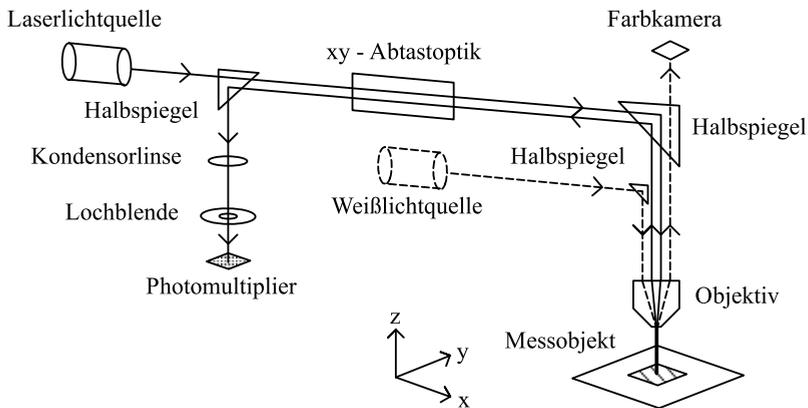


Abbildung A.1: Funktionsprinzip eines Laser-Scanning-Mikroskops. Laserlicht wird durch eine xy-Abtastoptik geleitet und tastet die Oberfläche am Messobjekt ab. Das reflektierte Laserlicht wird an einer Lochblende vor dem Photomultiplier gefiltert, sodass nur fokussiertes Licht durchgelassen wird. Eine Weißlichtquelle sorgt für einen farblichen Kontrast auf den angefertigten Bildern; nach [101].

Das eingesetzte LSM verfügt neben einer klassischen Weißlichtquelle über einen Laser, mit welchem die Oberfläche der zu untersuchenden Probe abgetastet wird. Das reflektierte Weißlicht wird von einer Farbkamera detektiert und liefert Farbbilder des Messobjekts. Durch eine Lochblende vor dem Lichtmessgerät (Photomultiplier) wird nicht fokussiertes Laserlicht nach der Kondensorlinse herausgefiltert. Diese spezielle Anordnung wird als konfokale Optik bezeichnet. Durch Messung der Intensität des vom Photomultiplier reflektierten Lichts erkennt ein Laser-Scanning-Mikroskop, ob sich das Messobjekt im Brennpunkt befindet. Veränderungen des Brennpunkts werden dabei ausgenutzt, um Höheninformation der Probe zu gewinnen. Die Verwendung einer konfokalen Optik erzeugt zudem einen deutlich besseren Kontrast im Vergleich zu optischen Mikroskopen ohne diese Technologie. [101]

A.2 Fraktionsabscheidegradmessungen von zusätzlichen Sättigungszuständen

Nachfolgend sind zusätzliche Fraktionsabscheidegradmessungen für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,06, 0,10$ und $0,60$ sowie für Filteranströmgeschwindigkeiten von $10, 25$ und 40 cm s^{-1} aufgeführt.

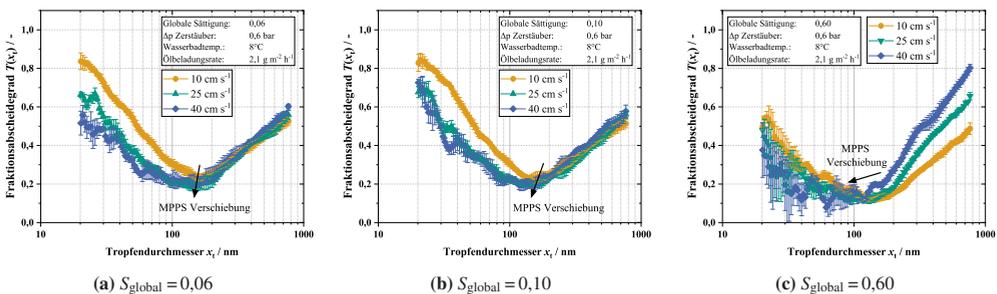


Abbildung A.2: Fraktionsabscheidegradmessungen von globalen Sättigungen von (a) $S_{\text{global}} = 0,06$, (b) $S_{\text{global}} = 0,10$ und (c) $S_{\text{global}} = 0,60$ und Anströmgeschwindigkeiten von $10, 25$ und 40 cm s^{-1} ; nach Straube et al. [63].

Analog zu den Ergebnissen aus Abschnitt 4.4 ist für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,06$ und $0,10$ mit einer zunehmenden Filteranströmgeschwindigkeit eine Verschlechterung der Diffusionsabscheidung und eine Verschiebung der MPPS zu kleineren Tropfenrößen sowie eine Verschlechterung der Abscheidung im Bereich der MPPS zu beobachten. Eine Änderung des Trägheitsasts mit zunehmender Gasgeschwindigkeit ist für diese Sättigungszustände nicht zu beobachten. Für eine globale Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,60$ ist eine Verbesserung der Abscheidung

im Bereich des Sperreffekts und der Trägheit, aufgrund der Ausbildung von größeren, geschlossenen Ölfilmen, mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit festzustellen. Eine Verschiebung der MPPS hin zu kleineren Tropfengrößen und eine Verschlechterung der Abscheidung im Bereich der MPPS ist ebenfalls zu beobachten.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematischer Überblick über die relevanten Auftreffwahrscheinlichkeiten für Partikeln im Größenbereich 10 - 1000 nm	4
1.2	Schematische Entwicklung des Differenzdrucks für oleophile und oleophobe Filtermedien bei der Ölbeladung	9
2.1	Fotografien des Aufschlaggeräts und des Blattbildners	17
2.2	Herstellungsprozess der Wirrfaseranordnungen	18
2.3	Fotografien der verwendeten Faserschichten	20
2.4	Vergleich von nominellen und experimentell ermittelten Faserdurchmessern	21
2.5	Dynamische Viskosität des eingesetzten Kompressoröls	23
2.6	Experimenteller Versuchsaufbau	25
2.7	Fotografie des Collision Zerstäubers	26
2.8	Fotografie der Beladungskammer	27
2.9	Fotografie der Filterhalter	28
2.10	Fotografie der Filterkammer zur Filtration von Ölnebel	30
2.11	Tropfengrößenverteilungen des Rohgases bei der Beladung von Faservliesen	32
2.12	Tropfengrößenverteilungen des Rohgases für die Bestimmung von Abscheidegraden	33
2.13	Einfluss des Bypasses auf die Tröpfchenkonzentration	34
2.14	Schematischer Überblick über die experimentelle Vorgehensweise zur Bestimmung von Abscheidegraden	38
2.15	LSM-Aufnahmen eines Wirrfaservlieses vor und nach dem Auswaschen in Isopropanol	39
2.16	Funktionsprinzip eines Mikro-Computertomographen	41
2.17	Fotografie des verwendeten Mikro-Computertomographen	42
2.18	Präparierter Probenausschnitt für die Untersuchung am μ -CT	43
2.19	Übersichtsscan eines Probenausschnitts	45
2.20	Segmentierung eines Graustufenschnittbildes	48
2.21	3D-Bild einer Faserschicht nach der Segmentierung	49
3.1	Globale Sättigung der eingesetzten Wirrfaserschichten bei einer Beladung mit Ölnebel mit und ohne Unterbrechungen	52
3.2	Übersicht über die aufgenommenen μ -CT Scans zur Charakterisierung von Ölstrukturen	53

3.3	Abbildungen der virtuellen Quader zur Bestimmung der lokalen Porosität und Sättigung	56
3.4	Vergleich von lokaler und globaler Sättigung	57
3.5	Schematische Vorgehensweise zur Bestimmung der freien Faseroberfläche	58
3.6	Berechnete mittlere Ölschichtdicke auf der freien Faseroberfläche	60
3.7	Aufnahmen segmentierter μ -CT Scans bei einer globalen Sättigung von $S_{\text{global}} = 0,20$	63
3.8	Anzahl- und massenbezogene Ölmengenanteile	67
3.9	Gesamtanzahl- und Gesamtmassenkonzentration der abgeschiedenen Öltröpfen	69
3.10	Tropfengrößenverteilungen von abgeschiedenen Öltröpfen bei einer Anströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1}	70
3.11	Ölmengenanteile in Durchströmungsrichtung	74
3.12	Anzahl- und massenbezogene Ölmengenanteile bei variierender Anströmgeschwindigkeit	77
3.13	Aufnahmen segmentierter μ -CT Scans für Anströmgeschwindigkeiten von $10, 25$ und 40 cm s^{-1}	78
3.14	Tropfengrößenverteilungen von abgeschiedenen Öltröpfen bei variierenden Anströmgeschwindigkeiten	79
4.1	Fraktions- und Gesamtabscheidegrad vor und nach der Vorkonditionierung der Wirrfaserschichten	82
4.2	Fraktionale Penetration für eine sowie vier und acht Lagen in Reihe des verwendeten Faservlieses	84
4.3	Fraktionale Penetration pro Faserschicht	86
4.4	Fraktionsabscheidegrade für eine Filteranströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1} vor und nach einer Gasgeschwindigkeitserhöhung auf 40 cm s^{-1}	88
4.5	Fraktionsabscheidegrade für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0, 0,20, 0,40$ und $0,80$	90
4.6	Durchlichtbilder und deren Binarisierungen von beladenen Wirrfaseranordnungen	92
4.7	Fraktionsabscheidegrade in Abhängigkeit der globalen Sättigung für eine Filteranströmgeschwindigkeit von 10 cm s^{-1}	93
4.8	Fraktionsabscheidegrade in Abhängigkeit der globalen Sättigung für eine Filteranströmgeschwindigkeit von 25 cm s^{-1}	94
4.9	Fraktionsabscheidegrade in Abhängigkeit der globalen Sättigung für eine Filteranströmgeschwindigkeit von 40 cm s^{-1}	95
4.10	Gesamtabscheidegrade in Abhängigkeit der globalen Sättigung	97
4.11	Gesamtabscheidegrade in Abhängigkeit der Filteranströmgeschwindigkeit	98
4.12	Entwicklung des Differenzdrucks von einzelnen Wirrfaseranordnungen	104
4.13	Differenzdruck von vier Wirrfaseranordnungen in Reihe für unterschiedliche Sättigungszustände und Anströmgeschwindigkeiten	106
A.1	Funktionsprinzip eines Laser-Scanning-Mikroskops	119

A.2	Fraktionsabscheidegrade für globale Sättigungen von $S_{\text{global}} = 0,06$, $S_{\text{global}} = 0,10$ und $S_{\text{global}} = 0,60$	120
-----	---	-----

Tabellenverzeichnis

1.1	Auflistung ausgewählter Literatur zum Einfluss steigender Flüssigkeitsbeladung auf den Fraktions- bzw. Gesamtabscheidegrad	11
2.1	Eingesetzte Fasermaterialien und Zusammensetzung der Fasermischung zur Herstellung der Wirrfaserschichten	16
3.1	Übersicht über Parameter und Ergebnisse der durchgeführten μ -CT Aufnahmen der ölbeladenen Wirrfaserschichten	54
3.2	Berechnete Ölfilmdicken nach Mullins & Kasper [38]	61
3.3	Einteilungskriterien für abgeschiedene Ölstrukturen	65
3.4	Übersicht über Parameter und Ergebnisse der durchgeführten μ -CT Aufnahmen zum Einfluss der Gasgeschwindigkeit auf abgeschiedene Ölstrukturen .	76
4.1	Vergleich von Fraktionsabscheidegraden mit der Literatur	100
4.2	Vergleich von Gesamtabscheidegraden mit der Literatur	102

Literaturverzeichnis

- [1] R. Mead-Hunter, A. J. C. King, and B. J. Mullins. Aerosol-mist coalescing filters – a review. *Separation and Purification Technology*, 133:484–506, 2014.
- [2] N. Nowak, T. Sinn, K. Scheiber, C. Straube, J. Pfeil, J. Meyer, T. Koch, G. Kasper, and A. Dittler. On aerosol formation by condensation of oil vapor in the crankcase of combustion engines. *Aerosol Science and Technology*, 56(2):101–116, 2022.
- [3] N. Kazerouni, T. L. Thomas, S. A. Petralia, and R. B. Hayes. Mortality among workers exposed to cutting oil mist: Update of previous reports. *American Journal of Industrial Medicine*, 38(4):410–416, 2000.
- [4] I. E. Agranovski, R. D. Braddock, S. Crozier, A. Whittaker, S. Minty, and T. Myojo. Study of wet porous filtration. *Separation and Purification Technology*, 30(2):129–137, 2003.
- [5] A. Charvet, Y. Gonthier, E. Gonze, and A. Bernis. Experimental and modelled efficiencies during the filtration of a liquid aerosol with a fibrous medium. *Chemical Engineering Science*, 65(5):1875–1886, 2010.
- [6] T. Frising, D. Thomas, D. Bémer, and P. Contal. Clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: Experimental and phenomenological modelling study. *Chemical Engineering Science*, 60(10):2751–2762, 2005.
- [7] P. C. Raynor and D. Leith. The influence of accumulated liquid on fibrous filter performance. *Journal of Aerosol Science*, 31(1):19–34, 2000.
- [8] T. Penner. *Einfluss von Filtermedieneigenschaften auf das Betriebsverhalten von Koaleszenzfiltern*. PhD thesis, 2023.
- [9] E. Kolb. *Transitional phenomena in oil mist filtration*. PhD thesis, 2022.
- [10] D. Kampa. *Filtration von Ölnebel*. Cuvillier Verlag, Göttingen, 1st ed. edition, 2015.

- [11] D. Kampa, S. Wurster, J. Meyer, and G. Kasper. Validation of a new phenomenological “jump-and-channel” model for the wet pressure drop of oil mist filters. *Chemical Engineering Science*, 122:150–160, 2015.
- [12] P. Contal, J. Simao, D. Thomas, T. Frising, S. Callé, J.C Appert-Collin, and D. Bémer. Clogging of fibre filters by submicron droplets. phenomena and influence of operating conditions. *Journal of Aerosol Science*, 35(2):263–278, 2004.
- [13] J. R. Conder and T. P. Liew. Fine mist filtration by wet filters—ii: Efficiency of fibrous filters. *Journal of Aerosol Science*, 20(1):45–57, 1989.
- [14] R. Gougeon, D. Boulaud, and A. Renoux. Theoretical and experimental study of fibrous filters loading with liquid aerosols in the inertial regime. *Journal of Aerosol Science*, 25:189–190, 1994.
- [15] S. Payet, D. Boulaud, G. Madelaine, and A. Renoux. Penetration and pressure drop of a hepa filter during loading with submicron liquid particles. *Journal of Aerosol Science*, 23(7):723–735, 1992.
- [16] T. Penner, J. Meyer, and A. Dittler. Relevance of downstream support structure design for oleophilic and oleophobic oil mist filter operating performance. *Separation and Purification Technology*, 248:117074, 2020.
- [17] F. Löffler. *Staubabscheiden*. Lehrbuchreihe Chemieingenieurwesen / Verfahrenstechnik. Thieme, Stuttgart, 1988.
- [18] G. Kasper, S. Schollmeier, and J. Meyer. Structure and density of deposits formed on filter fibers by inertial particle deposition and bounce. *Journal of Aerosol Science*, 41(12):1167–1182, 2010.
- [19] H.-J. Rembor, R. Maus, and H. Umhauer. Measurements of single fibre efficiencies at critical values of the stokes number. *Particle & Particle Systems Characterization*, 16(2):54–59, 1999.
- [20] J. J. Spillman. Spray impaction, retention and adhesion: An introduction to basic characteristics. *Pesticide Science*, 15(2):97–106, 1984.
- [21] W. C. Hinds and N. P. Kadrichu. The effect of dust loading on penetration and resistance of glass fiber filters. *Aerosol Science and Technology*, 27(2):162–173, 1997.

-
- [22] H. Bai, X. Qian, J. Fan, Y. Shi, Y. Duo, C. Guo, and X. Wang. Theoretical model of single fiber efficiency and the effect of microstructure on fibrous filtration performance: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(1):3–36, 2021.
- [23] R. A. Millikan. Coefficients of slip in gases and the law of reflection of molecules from the surfaces of solids and liquids. *Physical Review*, 21(3):217–238, 1923.
- [24] H. Jung, G. W. Mulholland, D. Y. H. Pui, and J. H. Kim. Re-evaluation of the slip correction parameter of certified psl spheres using a nanometer differential mobility analyzer (ndma). *Journal of Aerosol Science*, 51:24–34, 2012.
- [25] D. J. Rader. Momentum slip correction factor for small particles in nine common gases. *Journal of Aerosol Science*, 21(2):161–168, 1990.
- [26] G. Kasper, S. Schollmeier, J. Meyer, and J. Hoferer. The collection efficiency of a particle-loaded single filter fiber. *Journal of Aerosol Science*, 40(12):993–1009, 2009.
- [27] S. K. Friedlander. Mass and heat transfer to single spheres and cylinders at low reynolds numbers. *AIChE Journal*, 3(1):43–48, 1957.
- [28] E. Schweers, H. Umhauer, and F. Löffler. Particle collection efficiency of individual fibers of variable arrangements. *Journal of Aerosol Science*, 23:733–736, 1992.
- [29] E. Schweers, H. Umhauer, and F. Löffler. Experimental investigation of particle collection on single fibres of different configurations. *Particle & Particle Systems Characterization*, 11(4):275–283, 1994.
- [30] J. Wang, S. C. Kim, and D. Y. H. Pui. Investigation of the figure of merit for filters with a single nanofiber layer on a substrate. *Journal of Aerosol Science*, 39(4):323–334, 2008.
- [31] J. Wang, S. C. Kim, and D. Y. H. Pui. Figure of merit of composite filters with micrometer and nanometer fibers. *Aerosol Science and Technology*, 42(9):722–728, 2008.
- [32] A. Podgórski, A. Bałazy, and L. Gradoń. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters. *Chemical Engineering Science*, 61(20):6804–6815, 2006.
- [33] T. Penner, J. Meyer, G. Kasper, and A. Dittler. Impact of operating conditions on the evolution of droplet penetration in oil mist filters. *Separation and Purification Technology*, 211:697–703, 2019.

- [34] C. Straube, J. Meyer, and A. Dittler. Identification of deposited oil structures on thin porous oil mist filter media applying μ -ct imaging technique. *Separations*, 8(10):193, 2021.
- [35] C. Kanaoka, H. Emi, and T. Myojo. Simulation of the growing process of a particle dendrite and evaluation of a single fiber collection efficiency with dust load. *Journal of Aerosol Science*, 11(4):377–389, 1980.
- [36] B. J. Mullins, I. E. Agranovski, R. D. Braddock, and C. M. Ho. Effect of fiber orientation on fiber wetting processes. *Journal of colloid and interface science*, 269(2):449–458, 2004.
- [37] B. J. Mullins, R. D. Braddock, I. E. Agranovski, R. A. Cropp, and R. A. O’Leary. Observation and modelling of clamshell droplets on vertical fibres subjected to gravitational and drag forces. *Journal of colloid and interface science*, 284(1):245–254, 2005.
- [38] B. J. Mullins and G. Kasper. Comment on: “clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: Experimental and phenomenological modelling study” by frising et al. *Chemical Engineering Science*, 61(18):6223–6227, 2006.
- [39] R. Mead-Hunter, A. J. C. King, and B. J. Mullins. Plateau rayleigh instability simulation. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 28(17):6731–6735, 2012.
- [40] Rayleigh. On the instability of jets. *Proceedings of the London Mathematical Society*, s1-10(1):4–13, 1878.
- [41] C. Straube, G. Yang, D. Voll, J. Meyer, P. Théato, and A. Dittler. Influence of 3d printed downstream support structures on pressure drop and entrainment of oleophilic and oleophobic oil mist filters. *Separation and Purification Technology*, 290:120802, 2022.
- [42] H. E. Kolb and G. Kasper. Mist filters: How steady is their “steady state”? *Chemical Engineering Science*, 204:118–127, 2019.
- [43] T. Penner, J. Meyer, and A. Dittler. Oleophilic and oleophobic media combinations – influence on oil mist filter operating performance. *Separation and Purification Technology*, 261:118255, 2021.
- [44] I. E. Agranovski, T. Myojo, R. D. Braddock, and D. Jarvis. Combined wettable/non-wettable filter for mist purification. *Chemical Engineering & Technology*, 24(3):287–292, 2001.
- [45] H. E. Kolb, J. Meyer, and G. Kasper. Flow velocity dependence of the pressure drop of oil mist filters. *Chemical Engineering Science*, 166:107–114, 2017.

-
- [46] T. Penner, W. Heikamp, J. Meyer, and A. Dittler. Einfluss ausgewählter Medienstrukturparameter auf das Betriebsverhalten von Ölnebelfiltern. *Chemie Ingenieur Technik*, 91(11):1615–1622, 2019.
- [47] T. Penner, J. Meyer, and A. Dittler. Characterization of mesoscale inhomogeneity in nonwovens and its relevance in the filtration of fine mists. *Journal of Aerosol Science*, 151:105674, 2021.
- [48] J. Liu, H. Zhou, X. Wu, H. Wang, Z. Ji, Y. Xing, J. Lu, X. Wei, and T. Lin. Superoleophobic filters: Improvement of filtration performance by front attachment of oil-guiding fabric. *Advanced Materials Interfaces*, 7(2), 2020.
- [49] S. Wurster, D. Kampa, J. Meyer, T. Müller, B. J. Mullins, and G. Kasper. Measurement of oil entrainment rates and drop size spectra from coalescence filter media. *Chemical Engineering Science*, 132:72–80, 2015.
- [50] S. Wurster, J. Meyer, H. E. Kolb, and G. Kasper. Bubbling vs. blow-off – on the relevant mechanism(s) of drop entrainment from oil mist filter media. *Separation and Purification Technology*, 152:70–79, 2015.
- [51] S. Wurster, J. Meyer, and G. Kasper. On the relationship of drop entrainment with bubble formation rates in oil mist filters. *Separation and Purification Technology*, 179:542–549, 2017.
- [52] I. E. Agranovski and R. D. Braddock. Filtration of liquid aerosols on wettable fibrous filters. *AIChE Journal*, 44(12):2775–2783, 1998.
- [53] I. E. Agranovski and R. D. Braddock. Filtration of liquid aerosols on nonwetable fibrous filters. *AIChE Journal*, 44(12):2784–2790, 1998.
- [54] A. Bredin and B. J. Mullins. Influence of flow-interruption on filter performance during the filtration of liquid aerosols by fibrous filters. *Separation and Purification Technology*, 90:53–63, 2012.
- [55] G. M. Letts, P. C. Raynor, and R. L. Schumann. Selecting fiber materials to improve mist filters. *Journal of Aerosol Science*, 34(11):1481–1492, 2003.
- [56] R. Mead-Hunter, B. J. Mullins, T. Becker, and R. D. Braddock. Evaluation of the force required to move a coalesced liquid droplet along a fiber. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 27(1):227–232, 2011.

- [57] H. E. Kolb, A. K. Watzek, V. Zaghini Francesconi, J. Meyer, A. Dittler, and G. Kasper. A mesoscale model for the relationship between efficiency and internal liquid distribution of droplet mist filters. *Journal of Aerosol Science*, 123:219–230, 2018.
- [58] C. Davies. *Air Filtration*. Academic Press, London, 1973.
- [59] C. Straube, J. Meyer, and A. Dittler. Influence of the filtration velocity on the local oil distribution of oleophilic coalescence filter media. *Separations*, 10(4):254, 2023.
- [60] C. E. Stauffer. The measurement of surface tension by the pendant drop technique. *The Journal of Physical Chemistry*, 69(6):1933–1938, 1965.
- [61] S. M. I. Saad, Z. Policova, and A. W. Neumann. Design and accuracy of pendant drop methods for surface tension measurement. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 384(1-3):442–452, 2011.
- [62] S. J. Cooper, P. C. Raynor, and D. Leith. Evaporation of mineral oil in a mist collector. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 11(10):1204–1211, 1996.
- [63] C. Straube, R. Mandic, J. Meyer, and A. Dittler. Influence of deposited liquid structures on the separation efficiency of thin oleophilic fiber layers of mist filters. *Separation and Purification Technology*, 334:125977, 2024.
- [64] K. R. May. The collision nebulizer: Description, performance and application. *Journal of Aerosol Science*, 4(3):235–243, 1973.
- [65] J. Q. Feng, L.-S. Go, J. Calubayan, and R. Tomaska. Working mechanism and behavior of collision nebulizer. *Aerosol Science and Engineering*, 5(3):285–291, 2021.
- [66] B. P. Lee, Y. J. Li, R. C. Flagan, C. Lo, and C. K. Chan. Sizing characterization of the fast-mobility particle sizer (fmpps) against smpps and hr-tof-ams. *Aerosol Science and Technology*, 47(9):1030–1037, 2013.
- [67] C. van Gulijk, J. C. M. Marijnissen, M. Makkee, J. A. Moulijn, and A. Schmidt-Ott. Measuring diesel soot with a scanning mobility particle sizer and an electrical low-pressure impactor: performance assessment with a model for fractal-like agglomerates. *Journal of Aerosol Science*, 35(5):633–655, 2004.
- [68] C. Straube, J. Meyer, and A. Dittler. Investigation of the local oil distribution on oleophilic mist filters applying x-ray micro-computed tomography. *Separation and Purification Technology*, 311:123279, 2023.

- [69] T. Richter. *Zerstäuben von Flüssigkeiten: Düsen und Zerstäuber in Theorie und Praxis : mit 85 Bildern und 11 Tabellen*, volume Band 660 of *Kontakt et Studium*. expert, Renningen, 4. auflage edition, 2017.
- [70] Y.-C. Tan, V. Cristini, and A. P. Lee. Monodispersed microfluidic droplet generation by shear focusing microfluidic device. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 114(1):350–356, 2006.
- [71] H. Shi, C. Kleinstreuer, Z. Zhang, and C. S. Kim. Nanoparticle transport and deposition in bifurcating tubes with different inlet conditions. *Physics of Fluids*, 16(7):2199–2213, 2004.
- [72] C. C. Chen and S. H. Huang. The effects of particle charge on the performance of a filtering facepiece. *American Industrial Hygiene Association journal*, 59(4):227–233, 1998.
- [73] D. W. Townsend. Dual-modality imaging: combining anatomy and function. *Journal of nuclear medicine : official publication, Society of Nuclear Medicine*, 49(6):938–955, 2008.
- [74] T. Dobler, B. Radel, M. Gleiss, and H. Nirschl. Quasi-continuous production and separation of lysozyme crystals on an integrated laboratory plant. *Crystals*, 11(6):713, 2021.
- [75] B. Radel, M. Gleiß, and H. Nirschl. Crystal breakage due to combined normal and shear loading. *Crystals*, 12(5):644, 2022.
- [76] F. D. E. Latief, U. Fauzi, Z. Irayani, and G. Dougherty. The effect of x-ray micro computed tomography image resolution on flow properties of porous rocks. *Journal of microscopy*, 266(1):69–88, 2017.
- [77] S. T. Ho and D. W. Hutmacher. A comparison of micro ct with other techniques used in the characterization of scaffolds. *Biomaterials*, 27(8):1362–1376, 2006.
- [78] J. S. Weszka. A survey of threshold selection techniques. *Computer Graphics and Image Processing*, 7(2):259–265, 1978.
- [79] R. Kohler. A segmentation system based on thresholding. *Computer Graphics and Image Processing*, 15(4):319–338, 1981.
- [80] S. U. Lee, S. Yoon Chung, and R. H. Park. A comparative performance study of several global thresholding techniques for segmentation. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 52(2):171–190, 1990.

- [81] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In Nassir Navab, Joachim Hornegger, William M. Wells, and Alejandro F. Frangi, editors, *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*, volume 9351 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 234–241. Springer International Publishing, Cham, 2015.
- [82] J. Long, E. Shelhamer, and T. Darrell. Fully convolutional networks for semantic segmentation.
- [83] C. L. Reedy and C. L. Reedy. High-resolution micro-ct with 3d image analysis for porosity characterization of historic bricks. *Heritage Science*, 10(1), 2022.
- [84] Giulia Simão De Sousa, Camila Gomes Peçanha de Souza, and José Roberto d’Almeida. Microstructural characterization of soapstone-reinforced polyethylene composites and correlations with the macroscopic mechanical behavior.
- [85] B. J. Mullins, R. D. Braddock, I. E. Agranovski, and R. A. Cropp. Observation and modeling of barrel droplets on vertical fibres subjected to gravitational and drag forces. *Journal of colloid and interface science*, 300(2):704–712, 2006.
- [86] D. Quéré. Fluid coating on a fiber. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31(1):347–384, 1999.
- [87] R. Labbé and C. Duprat. Capturing aerosol droplets with fibers. *Soft matter*, 15(35):6946–6951, 2019.
- [88] J. Chaudhuri, K. Boettcher, and P. Ehrhard. Optical investigations into wetted commercial coalescence filter using 3d micro-computer-tomography. *Chemical Engineering Science*, 248:117096, 2022.
- [89] A. Charvet, S. Du Rolland Roscoat, M. Peralba, J. F. Bloch, and Y. Gonthier. Contribution of synchrotron x-ray holotomography to the understanding of liquid distribution in a medium during liquid aerosol filtration. *Chemical Engineering Science*, 66(4):624–631, 2011.
- [90] A. Jackiewicz, S. Jakubiak, and L. Gradoń. Analysis of the behavior of deposits in fibrous filters during non-steady state filtration using x-ray computed tomography. *Separation and Purification Technology*, 156:12–21, 2015.
- [91] F. Théron, E. Lys, A. Joubert, F. Bertrand, and L. Le Coq. Characterization of the porous structure of a non-woven fibrous medium for air filtration at local and global scales using porosimetry and x-ray micro-tomography. *Powder Technology*, 320:295–303, 2017.

- [92] M. Ueda, M. I. F. Rozy, T. Fukasawa, T. Ishigami, and K. Fukui. Phase-field simulation of the coalescence of droplets permeating through a fibrous filter obtained from x-ray computed tomography images: Effect of the filter microstructure. *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids*, 36(17):4711–4720, 2020.
- [93] J. Schindelin, I. Arganda-Carreras, E. Frise, V. Kaynig, M. Longair, T. Pietzsch, S. Preibisch, C. Rueden, S. Saalfeld, B. Schmid, J.-Y. Tinevez, D. J. White, V. Hartenstein, K. Eliceiri, P. Tomancak, and A. Cardona. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, 9(7):676–682, 2012.
- [94] E. H. W. Meijering, W. J. Niessen, and M.A. Viergever. Quantitative evaluation of convolution-based methods for medical image interpolation. *Medical Image Analysis*, 5(2):111–126, 2001.
- [95] C. N. Davies. Filtration of aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 14(2):147–161, 1983.
- [96] A. Charvet, Y. Gonthier, A. Bernis, and E. Gonze. Filtration of liquid aerosols with a horizontal fibrous filter. *Chemical Engineering Research and Design*, 86(6):569–576, 2008.
- [97] J. Fang, M. Davoudi, and G. G. Chase. Drop movement along a fiber axis due to pressure driven air flow in a thin slit. *Separation and Purification Technology*, 140:77–83, 2015.
- [98] S. U. Patel, P. S. Kulkarni, S. U. Patel, and G. G. Chase. The effect of surface energy of woven drainage channels in coalescing filters. *Separation and Purification Technology*, 87:54–61, 2012.
- [99] S. K. Friedlander. *Smoke, dust and haze: Fundamentals of aerosol behavior*. Wiley, New York, 1977.
- [100] J. Bullet, T. Gaujoux, V. Borderie, I. Bloch, and L. Laroche. A reproducible automated segmentation algorithm for corneal epithelium cell images from in vivo laser scanning confocal microscopy. *Acta ophthalmologica*, 92(4):e312–6, 2014.
- [101] Keyence Deutschland GmbH. Laserscanningmikroskop: Leitfaden für Einsteiger: Funktionsprinzip und Vorteile von Laserscanningmikroskopen.