

Zur Abscheidung von Tröpfchen-Aerosolen in filternden Abscheidern

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
an der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von

M. Sc. Richard Hassel

aus Hamm

Tag des Kolloquiums:

11.09.2023

Referent:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid

Korreferent:

Prof. Dr.-Ing. Achim Dittler

Zusammenfassung

Die Abscheidung von Tröpfchen-Aerosolen, welche in zahlreichen verschiedenen Prozessen entstehen und in der Regel unerwünscht sind, stellt bis heute eine große Herausforderung dar. Auch vor der Einspeisung von Brenngas in Gasturbinen entstehen Flüssigkeitspartikeln, die den Prozess der Stromerzeugung negativ beeinflussen. Die Konsequenzen daraus sind Wirkungsgradeinbußen und vermeidbare Umweltbelastung. Die höchste Reinheit garantieren dabei bis heute filternde Abscheider.

In dieser Arbeit soll die Möglichkeit betrachtet werden, den Abscheideprozess mathematisch mit Hilfe eines Zellmodells zu modellieren. Dafür wird jeder Schritt des Separationsprozesses genauer betrachtet. Der Gesamtprozess der Phasenseparation kann in vier einzelne Prozessschritte gegliedert werden: Das Einfangen der Aerosoltropfen, die Koaleszenz der Einzeltropfen im Filtermedium, der Flüssigkeitstransport durch das Filtermedium und der Flüssigkeitsaustrag auf der strömungsabgewandten Seite. Bei den Untersuchungen steht insbesondere die Flüssigkeitsverteilung im Vordergrund. Dafür wurde ein Versuchsstand entwickelt und aufgebaut, der den Filtrationsprozess von Tröpfchen-Aerosol simuliert. Zusätzlich wurde das Filtermaterial mit verschiedenen Messmethoden charakterisiert. Abschließend wurde eine Bewertung zur Machbarkeit gegeben.

Summary

The separation of droplet aerosol, which is generated in numerous different processes and is usually undesirable, remains a major challenge today. Even before fuel gas is fed into gas turbines, liquid particles are produced that have a negative impact on the power generation process. The consequences of this are energy loss and avoidable environmental pollution. To this day, the highest purity is guaranteed by filtering separators.

In this thesis, the possibility of mathematically modelling the separation process with the help of a cell model is considered. For this purpose, each step of the separation process will be considered in detail. The overall process of phase separation can be divided into four individual process steps: The capture of the aerosol droplets, the coalescence of the individual droplets on the fibres of the filter medium, the liquid transport through the filter medium, and the liquid discharge on the side of the filter medium facing away from the flow. The investigations focus in particular on the liquid distribution. For this purpose, a test rig was developed and set up that simulate the filtration process of droplet aerosol. In addition, the filter material was characterised using various measurement methods. Finally, a feasibility assessment was given.

Liste der Vorveröffentlichungen

Hassel, R.; Tischendorf, R.; Schmid, H.-J.: **Reducing the Transmission of SARS-CoV-2 by reusing FFP2 Masks: Evaluation of their Filtration Efficiency after Sterilization.** Air Filtration Seminar: Frankfurt, 2020

Hassel, R; Schmid, H.-J.: **Modellierung der Phasenseparation von Tröpfchen-Aerosol durch Koaleszenz in durchströmten Abscheidern.** Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Gasreinigung und Partikelmesstechnik: Online-Event, 2021

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
2 Theoretische Grundlage und Stand des Wissens	7
2.1 Koaleszenzfiltration von Tröpfchen-Aerosol in filternden Abscheidern	7
2.1.1 Auftreffen der Aerosoltropfen auf der Faser.....	9
2.1.2 Druckverlust, Sättigung und Kapillarität	16
2.1.3 Abscheidung und Wiedereintrag der flüssigen Phase.....	21
2.2 Herstellprozesse und Klassifizierung von Filtervlies	22
2.2.1 Das Trockenverfahren.....	22
2.2.2 Das Nasslegeverfahren.....	25
2.3 Methoden zur Charakterisierung von Filtervliesen	29
2.3.1 Methoden zur Bestimmung von Material- und Struktureigenschaften	29
2.3.2 Methoden zur Bestimmung der Filtrationseffizienz und des Druckverlusts	34
3 Aufbau und Funktionsweise der experimentellen Versuchsstände....	36
3.1 Filterversuchsstand.....	36
3.1.1 Gesamtaufbau der Versuchsanlage.....	36
3.1.2 Tröpfchen-Aerosol-Erzeugung	38
3.1.3 Mischkammer und Strömungskanal	42
3.1.4 Filterhalterung und Filterscheibe.....	44
3.1.5 Akquise der Messdaten.....	47
3.1.6 Steuerung der Anlage	49
3.2 Strukturanalyse von Filtervliesen	50
3.2.1 Mikro Computertomographie (μ -CT)	50
3.2.2 Durchlichtfotografie	52
3.2.3 Optische Profilometrie (Lichtschnittverfahren)	53
4 Experimentelles Vorgehen.....	57
4.1 Materialauswahl	57
4.1.1 Auswahl der Filtermedien.....	58
4.1.2 Auswahl der Tröpfchen-Aerosol-Flüssigkeit.....	59

4.1.3	Verdampfung des Tröpfchen-Aerosols.....	62
4.2	Analyse der Filtervliese auf mikroskopischer Ebene	62
4.3	Untersuchungen zur Sättigung, zur Flüssigkeitsverteilung und zur Tröpfchenabscheidung.....	68
4.3.1	Untersuchung zur Sättigung und zur Flüssigkeitsverteilung....	68
4.3.2	Untersuchung zur Tröpfchenabscheidung bei zunehmender Sättigung.....	74
4.4	Untersuchung zum Einfluss der Dicke und der Oberflächenstruktur auf die Kanalbildung	75
4.4.1	Erzeugen des Oberflächen- und des Dickenprofils	76
4.4.2	Positionsbestimmung der Flüssigkeitskanäle.....	78
5	Resultate und Schlussfolgerungen.....	81
5.1	Inhomogenität des Vlieses auf mikroskopischer Ebene	81
5.2	Sättigung, Flüssigkeitsverteilung und Tröpfchenabscheidung	87
5.2.1	Sättigung und Flüssigkeitsverteilung im Vlies	87
5.2.2	Tröpfchenabscheidung bei zunehmender Sättigung	102
5.3	Einfluss der Dicke und der Oberflächenbeschaffenheit auf die Kanalbildung	105
5.3.1	Oberflächenstruktur und Dickenprofil	105
5.3.2	Positionen der Flüssigkeitskanäle	112
6	Zusammenfassung und Ausblick	117
	Quellenverzeichnis.....	121

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Schematische Darstellung des Zellmodell-Prinzips	4
Abbildung 2.1:	Schematische Übersicht der Abscheidemechanismen am Kollektor [Sch03].....	9
Abbildung 2.2:	Tropfenform in Abhängigkeit der Benetzungseigenschaften des Fasermaterials	15
Abbildung 2.3:	Exemplarischer Verlauf der Druckdifferenz über die Betriebszeit eines Koaleszenzfiltervlieses	16
Abbildung 2.4:	Typisches Kanalmuster eines nicht benetzbaren (links) und eines benetzbaren Filtermediums (rechts) [Kam15]....	19
Abbildung 2.5:	Zugrundeliegendes Ablaufschema des Spinnvliesverfahrens.....	24
Abbildung 2.6:	Schematische Darstellung des Nasslegeverfahrens.....	26
Abbildung 2.7:	Horizontaler Aufbau für die Harzbehandlung von nassgelegten Faservliesen	28
Abbildung 2.8:	Oberflächenprofil eines nassgelegten Glasfaservlieses	30
Abbildung 3.1:	Schematisches Fließbild des Filterversuchsstands	37
Abbildung 3.2:	Technische Zeichnung des Strömungskanals mit Zerstäuber, Filterhalterung, Absolutfilter und Beschriftung aller Ein- und Ausgangsanschlüsse	37
Abbildung 3.3:	Bild des Versuchsstands im Labor.....	38
Abbildung 3.4:	Technische Zeichnung des Zerstäubers mit Detailansicht der Zweistoffdüse	40
Abbildung 3.5:	Typische Verteilung der relativen Häufigkeit und der Anzahl-Summenverteilung des Zerstäubers	41
Abbildung 3.6:	Median der Tropfengrößenverteilung des Zerstäubers und erzeugte Konzentration bei variierenden Druckniveaus im Flüssigkeitstank.....	42
Abbildung 3.7:	Technische Zeichnung des Strömungskanals mit der Filterhalterung und Detailansicht der Mischkammer	43
Abbildung 3.8:	Technische Zeichnung der Filterkammer mit Überwurfklammer	45
Abbildung 3.9:	Technische Zeichnung der Filterscheibe	46
Abbildung 3.10:	Schematische Darstellung der Durchlichtanordnung	52
Abbildung 3.11:	Schematische Darstellung eines Lichtpunkt-Triangulations-Messgerätes.....	53

Abbildung 4.1:	Sauterdurchmesser verschiedener Silikonöle mit unterschiedlichen Viskositätsstufen und gleichbleibenden Betriebsparametern des Zerstäubers.....	61
Abbildung 4.2:	Dreidimensionale Darstellung einer CT-Aufnahme des Fibermet 30M1	64
Abbildung 4.3:	CT-Schichtbild eines Bildstapels (links) und ein bearbeitetes schwarz-weiß Bild mit einem gesetzten Schwellwert (rechts).....	65
Abbildung 4.4:	Schematische Darstellung zum Anpassen des Schwellwerts der schwarz-weiß Bilder an die gemessene Porosität	67
Abbildung 4.5:	Vergrößerte Abbildungen (links 100x; rechts 300x) einer Kaschierung, abgelöst von einem Glasfaservlies mit Anhaftungen von Glasfasern	69
Abbildung 4.6:	Durchlichtotos von zwei flüssigkeitsbeladenen Filterronden (MM1044 einseitig kaschiert) für die Anströmgeschwindigkeiten von 0,05 m/s (links) und 0,425 m/s (rechts)	79
Abbildung 4.7:	Resultierende schwarz-weiß Bilder, gewonnen aus den Durchlichtotos (MM1044 einseitig kaschiert) für die Anströmgeschwindigkeiten von 0,05 m/s (links) und 0,425 m/s (rechts)	80
Abbildung 5.1:	Dreidimensionale Darstellungen der CT-Aufnahmen des Fibermets 30M1, der ganzen Probe (links) und eines vergrößerten Probenausschnitts (rechts)	82
Abbildung 5.2:	Schnittbild der CT-Aufnahmen des Fibermets 30M1	82
Abbildung 5.3:	Dreidimensionale Darstellungen der CT-Aufnahme des Glasfaservlieses 848 aus dem Inneren des Materials	83
Abbildung 5.4:	Dreidimensionale Darstellungen der CT-Aufnahme des Glasfaservlieses 848, ein vergrößerter Ausschnitt (links) und ein stark vergrößerter Ausschnitt (rechts)	83
Abbildung 5.5:	Zwei zufällig gewählte Bilder aus den Bildstapeln, die aus den CT- Aufnahmen gewonnen wurden, das Glasfaservlies 848 (links) und das Metallfaservlies 30M1 (rechts).....	84
Abbildung 5.6:	Summenverteilungen des Faservolumenanteils der analysierten Zellen bei verschiedenen Zellgrößen des Glasfaservlieses (MM1044)	85
Abbildung 5.7:	Sättigungsverhalten der Filtervliese bei unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeit	

	(Glasfaservlies ohne Kaschierung mit Stützgewebe: w = 0,4 mm; d = 0,16 mm).....	88
Abbildung 5.8:	Sättigungsverhalten der Glasfaservliese bei unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeit (ohne Kaschierung mit Stützgewebe: w = 0,4 mm; d = 0,16 mm).....	89
Abbildung 5.9:	Sättigungsverhalten des Glasfaservlieses 917 und des Polymehrfaservlieses 5112 bei unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeit (Glasfaservlies ohne Kaschierung mit Stützgewebe: w = 0,4 mm; d = 0,16 mm).....	91
Abbildung 5.10:	Sättigungsverhalten des Glasfaservlieses 848 und MM1044 sowie des Metallfaservlieses 3A0 bei unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeit (Glasfaservlies ohne Kaschierung mit Stützgewebe: w = 0,4 mm; d = 0,16 mm).....	92
Abbildung 5.11:	Druck- und Sättigungsverlauf bei zunehmender Beladung des 917-Glasfaservlieses bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s (Glasfaservlies mit Kaschierung).....	93
Abbildung 5.12:	Druck- und Sättigungsverlauf bei zunehmender Beladung des 917-Glasfaservlieses bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s mit Trendlinien für den Sättigungsverlauf (Glasfaservlies mit Kaschierung).....	95
Abbildung 5.13:	Sättigungsverläufe bei zunehmender Beladung der untersuchten Vliese bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s (Glasfaservlies mit Kaschierung)	95
Abbildung 5.14:	Durchlichtfotos vom Glasfaservlies MM1044 zu unterschiedlichen Zeitpunkten	97
Abbildung 5.15:	Vertikaler Sättigungsverlauf der Glasfaservliese (mit Kaschiert) vor dem Erreichen des quasistationären Zustands bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s und einer Versuchszeit von 40 min	99
Abbildung 5.16:	Vertikaler Sättigungsverlauf der Glasfaservliese (mit Kaschierung) nach dem Erreichen des quasistationären Zustands bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s und einer Versuchszeit von 140 min	100
Abbildung 5.17:	Aufnahme der Rückseite einer Filterscheibe während eines Sättigungsversuchs im quasistationären Betriebszustand	101

Abbildung 5.18:	Trenngrad des Glasfasermediums MM1044 mit verschiedenen Stützstrukturen (Quadratmaschengewebe / Polyesterkaschierung / Kombiniert) bei $v = 0,2 \text{ m/s}$; $c = 500 \mu\text{g/m}^3$	102
Abbildung 5.19:	Trenngrad des Glasfasermediums MM1044 mit Quadratmaschengewebe und einseitiger Polyesterkaschierung als Stützstruktur bei $v = 0,2 \text{ m/s}$; $c = 500 \mu\text{g/m}^3$	104
Abbildung 5.20:	Aufnahme der oberseitigen (links) und unterseitigen (rechts) Oberfläche eines Glasfaservlieses (Ausschussmaterial)	106
Abbildung 5.21:	Typische Höhenkarte der oberseitigen (links) und unterseitigen (rechts) Oberfläche eines nassgelegten Glasfaservlieses (Ausschussmaterial)	106
Abbildung 5.22:	Verteilung der absoluten Häufigkeit der Messpunkte der oberseitigen und unterseitigen Oberfläche eines nassgelegten Glasfaservlieses (Ausschuss).....	107
Abbildung 5.23:	Typische Anzahl-Summenverteilung der oberseitigen und unterseitigen Oberfläche eines nassgelegten Glasfaservlieses (Ausschussmaterial)	109
Abbildung 5.24:	Typische Anzahl-Summenverteilung und Verteilung der absoluten Häufigkeit der Messpunkte der Dicke eines nassgelegten Glasfaservlieses (Ausschussmaterial).....	110
Abbildung 5.25:	Typische Summenverteilungen der oberseitigen Oberflächen der untersuchten Glasfaservliese (Ausschussmaterial; 917; 848)	111
Abbildung 5.26:	Dickenprofil eines Glasfaservlieses (Ausschussmaterial) mit den Positionen der Flüssigkeitskanäle nach Erreichen des quasistationären Bereichs ($v = 0,2 \text{ m/s}$)	113
Abbildung 5.27:	Typische Summenverteilung der Dicke eines nassgelegten Glasfaservlieses (Ausschussmaterial) und die Dichteverteilung der Messpunkte, an denen sich Flüssigkeitskanäle gebildet haben.....	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Verwendete Filtermaterialien mit Herstellerangaben	58
Tabelle 4.2:	Verwendete Flüssigkeiten mit zugehörigen Stoffeigenschaften	60
Tabelle 4.3:	Verwendete Filtermaterialien für die Micro-CT- Untersuchung	63
Tabelle 4.4:	Übersicht der verwendeten Filtervliese bei den verschiedenen Sättigungsversuchen	68
Tabelle 4.5:	Einfluss der Kaschierung auf das Sättigungsverhalten von Glasfaservliesen.....	70
Tabelle 4.6:	Übersicht der verwendeten Filtervliese bei den Untersuchungen zum Einfluss der Dicke und Topografie ...	75
Tabelle 5.1:	Berechnete und experimentelle Zeit bis zum Erreichen des quasistationären Zustands ($v = 0,2 \text{ m/s}$; $c = 500$ $\mu\text{g/m}^3$)	96
Tabelle 5.2:	Sättigung zu den Durchlichtfotos vom Glasfaservlies MM1044 an bestimmten Stellen des Druckkurvenverlaufs	97
Tabelle 5.3:	Lageparameter der oberseitigen und der unterseitigen Verteilung eines nassgelegten Glasfaservlieses (Ausschussmaterial)	108

Symbole und Indizes

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	cm ²	Fläche
A_e	-	Materialabhängige Konstante
A_F	m ²	Faseranströmfläche
A_{Filter}	m ²	Filteranströmfläche
b	m	Länge
Cu	-	Cunningham Korrektur
c	g/cm ³	Konzentration
c_{roh}	g/cm ³	Anströmseitige Konzentration
c_{rein}	g/cm ³	Abströmseitige Konzentration
c_i	1/cm ³	Anzahlkonzentration
c_W	-	Widerstandskoeffizient
D_S	m	Sauterdurchmesser
D_t	m ² /s	Diffusionskoeffizient des Tropfens
d	m	Durchmesser
d_d	m	Drahtstärke
d_f	m	Faserdurchmesser
$d_{f,Nass}$	m	Nassfaserdurchmesser
d_h	m	Hydraulischer Durchmesser
d_i	m	Innendurchmesser
d_p	m	Partikeldurchmesser
d_{pore}	m	Kapillarkraftäquivalenter Poredurchmesser
d_t	m	Tropfendurchmesser
e	-	Eulerzahl
F_W	N	Strömungswiderstandskraft
G	Kg/m ²	Flächengewicht

g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h	-	Haftwahrscheinlichkeit
k_k	m	Kapillare Steighöhe
I	W/m^2	Intensität
I_0	W/m^2	Ausgangsintensität
i	m	Länge
j	m	Länge
Ku	-	Hydrodynamischer Faktor nach Kuwabara
k	m/s	Permeabilitätskonstante
k_B	J/K	Boltzmann-Konstante
$m_{\text{Flüssig}}$	kg	Flüssigkeitsmasse
\dot{m}	g/min	Massenstrom
$N_{d,0}$	$1/\text{cm}^3$	Partikelanzahl eines Partikeldurchmessers d anströmseitig
$N_{d,1}$	$1/\text{cm}^3$	Partikelanzahl eines Partikeldurchmessers d abströmseitig
n	-	Anzahl / Wiederholungen
Pe	-	Péclet Zahl
p	Pa	Druck
Δp	Pa	Differenzdruck
p_i	Pa	Anströmseitiger Druck
p_i	Pa	Sättigungsdampfdruck (über einer flachen Oberfläche)
p_s	Pa	Sättigungsdampfdruck über dem Tropfen
R	-	Sperreffektparameter
Re	-	Reynolds-Zahl
R_S	J/kgK	Spezifische Gaskonstante
r	m	Tropfenradius
r_p	m	Mittlerer Porenradius
$r_{\text{krit},e}$	m	Kritischer Radius bei einem Sättigungsverhältnis Se von $\frac{p}{p_0} = e$ mit der Eulerschen Zahl e

Se	-	Sättigungsverhältnis
S	-	Sättigung
T	K	Temperatur
t_m	s	Zeit
t	m	Dicke
t_m	m	Mittlere Dicke
V	m^3	Volumen
V_{Faser}	m^3	Faservolumen
V_{Filter}	m^3	Filtervolumen
$V_{Flüssig.}$	m^3	Flüssigkeitsvolumen
$V_{Hohlr.}$	m^3	Hohlraumvolumen
\dot{V}	l/min	Volumenstrom
\dot{V}_P	l/min	Probenvolumenstrom
\dot{V}_{Sp}	$\mu l/min$	Spritzenvolumenstrom
v	m/s	Anströmgeschwindigkeit
w	m	Maschenweite
x	m	Länge
Δx	m	Messabweichung des Flächeninhalts
y	m	Länge
z	m	Länge

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	-	Faservolumenanteil / Packungsdichte
α_L	-	Größenparameter
α_{Nass}	-	Nassfaservolumenanteil
β	-	Beta-Wert
δ	°	Winkel
γ	°	Winkel
ε	-	Porosität
ζ	°	Winkel
η	-	Auftreffgrad
η_D	-	Auftreffgrad durch den Diffusionseffekt
η_{D+R}	-	Auftreffgrad durch Diffusions- und Sperreffekt
η_F	-	Einzelfaserauftreffgrad
η_I	-	Auftreffgrad durch den Trägheitseffekt
η_{I+R}	-	Auftreffgrad durch Trägheits- und Sperreffekt
η_R	-	Auftreffgrad durch den Sperreffekt
Θ	°	Kontaktwinkel
λ_L	m	Wellenlänge des Lichts
λ	m	Mittlere freie Weglänge
μ	Pas	Dynamische Viskosität
μ_A	1/cm	Absorptionskoeffizient
μ_g	Pas	Dynamische Viskosität des Gases
μ_{Fl}	Pas	Dynamische Viskosität der Flüssigkeit
ρ	kg/m³	Dichte
$\rho_{Flüssig}$	kg/m³	Flüssigkeitsdichte
ρ_g	kg/m³	Gasdichte
ρ_m	kg/m³	Mittlere Dichte
ρ_p	kg/m³	Partikeldichte

σ	kg/s ²	Oberflächenspannung
φ	-	Einzelfaserabscheidegrad
ψ	-	Trägheitsparameter

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
A/D-Wandler	Analog-Digital-Wandler
ANSI	American National Standards Institute
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BP	Bubble Point Size / Blasendruck Test
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CT	Computertomographie
DEHS	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnungsmessstreifen
DNS	Direkte Numerische Simulation
EN	Europäische Norm
HEPA	High Efficiency Particulate Air
INDA	International Disposables Exposition and Assembly; Heute: (Association of the Nonwoven Fabrics Industry)
ISO	International Organization for Standardisation
LED	Light-Emitting Diode
MFC	Mass Flow Controller
MFP	Mean Flow Pore Size
Mol-%	Stoffmengenprozent
MPE	Multi Pass Efficiency
MPPS	Most Penetrating Particle Size
PTFE	Polytetrafluorethylen
SAP	Superabsorbent Polymers

SPE	Single Pass Efficiency
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
ULPA	Ultra Low Penetration Air
1.4301	Chrom-Nickel-Stahl

1 Einleitung

Beginnend wird eine kurze Einführung in das Thema der Tröpfchen-Aerosol-Filtration gegeben und der Bezug zum 6. Energieforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) hergestellt. Dafür ist dieses Kapitel in zwei Unterabschnitte gegliedert, wobei der Abschnitt 1.1 die grundlegende Motivation des Forschungsvorhabens erklärt und der Abschnitt 1.2 die daraus resultierende Zielsetzung ebenso wie Überlegungen zur Umsetzung des Projekts.

1.1 Motivation

Tröpfchen-Aerosol, also Flüssigkeitströpfchen in einem breiten Größenspektrum, welche in einem Gas vorliegen, treten in zahlreichen industriellen Prozessen auf und sind dort in der Regel unerwünscht. Bekannte Beispiele hierfür sind Kurbelgehäuseentlüftungen bei Verbrennungsmotoren, die Ölnebelabscheidung in ölgeschmierten Schraubenkompressoren und die Abscheidung von Kühlenschmierstoffen bei spanenden Bearbeitungsverfahren [Kam14a]. Im Anwendungsbeispiel der Kurbelgehäuseentlüftung kommen in der Regel Zentrifugalabscheider oder Prallplatten zum Einsatz, die größere Tropfen durch ihre Trägheitseigenschaften abscheiden. Die kleineren Flüssigkeitspartikeln werden unter zu Hilfenahme von Zyklen aus der Gasphase entfernt [Sau01]. Bei Schwerlastmotoren und der Abscheidung von Kühlenschmierstoffen hingegen kommen meist filternde Abscheider aus Wirrfaservliesen zum Einsatz. Sie bestehen in aller Regel aus Glasfasern, Polymerfasern oder metallischen Fasern [Lei96a; Pia01]. Bei dem Anwendungsbeispiel der Ölnebelabscheidung in ölgeschmierten Schraubenkompressoren wird ebenfalls auf ein zweistufiges System bestehend aus einem Trägheitsabscheider (Zyklon, zyklonartige Einströmung oder Prallblech) und einen Filter gesetzt. Dabei sind filternde Abscheider bei weitem die effizientesten Mittel zur Entfernung dieser Partikeln, doch die Filtration von flüssigen Aerosolpartikeln unterscheidet sich so stark von der Staubfiltration, dass sie beinahe ein eigenes Fachgebiet darstellt [Mea13a; Kam14b; Kam14a].

Ein weiterer Anwendungsbereich von Tröpfchen-Aerosol-Abscheidern ergibt sich durch das Einsatzgebiet in gasbefeuerten Kraftwerken sowie gekoppelten Gas-und-Dampf-Kraftwerken. Hier werden die großen Tropfen durch einen vorgeschalteten Zyklon vorabgeschieden, während die verbleibenden kleinen Tröpfchen durch einen filternden Abscheider entfernt werden. Diese Abscheider werden unmittelbar vor dem Einlass des Gases in die Brennkammer der Turbine installiert

und sorgen hier für eine hohe Reinheit der Verbrennungsgase. Bei dem Durchströmen des Abscheiders werden zum einen letzte gasgetragene Partikeln, zum anderen Flüssigkeitstropfen aus der Gasphase abgetrennt [Seu10; Joo06].

Das Entstehen der Flüssigkeitstropfen im Brenngas ist ein prozessbedingtes Problem. Die gasförmigen Brennstoffe werden in den meisten Fällen aus dem Versorgungsnetz bezogen, in dem die Drücke unterhalb des Betriebsdrucks der Gasturbine liegen. Durch das Komprimieren des Gases in entsprechenden Verdichterstationen können einige Bestandteile des Brenngases, insbesondere höhere Kohlenwasserstoffe, die je nach Herkunft einen Anteil von über 15 Mol – % (nasses Erdgas) ausmachen können, in die flüssige Phase wechseln. Zusätzlich können kondensierter Wasserdampf und von den Verdichtern eingebrachtes Schmiermittel als flüssige disperse Bestandteile im Brenngas vorliegen [Sch94].

Diese mitgeführten Tropfen und Partikeln führen zu Verengungen und Verstopfungen an den Brennerdüsen ebenso wie zu Anlagerungen an den Turbinenschaufeln. Daraus folgen Erosion, Korrosion und Fouling an den inneren Komponenten dieser Maschinen. Eine weitere Konsequenz der festen und flüssigen Verunreinigungen des Brenngases ist eine inhomogene Verbrennung, was wiederum zu lokalen Temperaturunterschieden im Verbrennungsraum führt. Die Folgen sind eine Verringerung des Wirkungsgrads der Turbine und ein stark erhöhter Wartungsaufwand. Eine weitere Folge der lokalen Temperaturunterschiede ist eine unkalkulierbare Zusammensetzung des Abgases sowie eine erhöhte Schadstoffentwicklung durch unvollständige Verbrennung des Erdgases. Dies gestaltet die Auslegung für Komponenten zur Nachbehandlung des Abgases sehr schwierig. Die Folge ist eine überdimensionierte Komponentenauslegung, die hohe Kosten mit sich bringt.

Vor allem Gasturbinen, die bevorzugt zur Residuallastdeckung eingesetzt werden, da sie kurze An- und Abfahrzeiten aufweisen, gewinnen einen immer größeren Stellenwert in der Energieversorgung und machen es erforderlich, höchste Brenngasqualität zu gewährleisten. Damit stellen gasbefeuerte Kraftwerke die wichtigste Brückentechnologie zur Energiewende dar. Der breit gefächerte Einsatzbereich und das über mehrere Größenordnungen reichende Leistungsspektrum solcher Turbinen machen das präzise Anfertigen von Koaleszenzabscheidern sehr schwierig.

Die aufgeführten Punkte zeigen, dass es auf jeden Fall notwendig ist, das Brenngas bereits durch primäre Maßnahmen zu behandeln, um die negativen Folgen der Verunreinigung zu unterbinden. Eine Vorbehandlung mit überdimensionierten Koaleszenzabscheidern ist heutzutage gängige Praxis. Die Konsequenz dieser überdimensionierten Auslegung ist ein erhöhter Druckverlust und daraus resultierend höhere Betriebskosten. Die Hersteller dieser Filterelemente sind durchweg bemüht, bei den geforderten Abscheideleistungen den Druckverlust so niedrig wie möglich zu halten, was allgemein einen Marktvorteil mit sich bringt.

Jedoch bedarf es zur Optimierung des Druckverlusts eines tiefgehenden Verständnisses der zugrunde liegenden Phänomene im Inneren der Filtermedien und der übergeordneten Filterelemente. Eine Möglichkeit, filternde Abscheider den jeweiligen Betriebsbedingungen entsprechend auszulegen, bestünde darin, eine Methode zu entwickeln, den Druckverlust und die Effizienz mit industriell anwendbaren Möglichkeiten vorhersagen zu können.

1.2 Zielsetzung

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit beziehungsweise die daraus resultierende Zielsetzung ist also herauszufinden, ob eine Möglichkeit geschaffen werden kann, die Abscheideeffizienz und den Druckverlust eines Filtervlieses ausreichend genau vorherzusagen und diese Daten des Vlieses auf ganze Filterelemente und Filtersysteme zu übertragen. Dabei steht die Präzision der Methode, ebenso wie die industrielle und ökonomische Anwendbarkeit, im Vordergrund der Konzeptentwicklung.

Zur Entwicklung eines solchen Rechenmodells ist es notwendig, die geometrischen Strukturen sowohl auf der mikroskopischen als auch auf der makroskopischen Ebene zu kennen und Kenntnis über deren Einfluss auf die Tröpfchen-Filtration zu haben. Dabei ist mit den geometrischen Informationen auf mikroskopischer Ebene der Faserdurchmesser, die Faserlänge und die Faserausrichtung gemeint. Die Faserausrichtung meint wiederum die Lage der Faser zur Anströmrichtung des Vlieses. Auf makroskopischer Ebene sind die geometrischen Parameter dann die Porosität beziehungsweise der Faservolumenanteil und die lokale Dicke des Vlieses.

Aus dem Gedankengang folgend, dass mit der Direkten Numerischen Simulation (DNS) alle Mikrostrukturen des Vlieses mit in die Berechnung der Filtereffizienz und des Druckverlustes eingehen und der Überlegung, die klassische Filtertheorie für die Tiefenfiltration auf das ganze Vlies anzuwenden, welche nur die Makrostrukturen betrachtet, entstand die Idee, einen Mittelweg zu finden. Das Problem bei der DNS ist, dass zwar höchst präzise Ergebnisse erreicht werden können, dadurch jedoch der Rechenaufwand enorm wird und nicht realisierbare Ausmaße annimmt. Umgekehrt verhält es sich bei der klassischen Filtertheorie, bei der die Information über die mittlere Porosität des Filtermediums zur Berechnung verwendet wird, also keine Informationen der Mikrostruktur, sondern nur makroskopische Größen in die Berechnung einfließen und es nur einen geringen numerischen Aufwand gibt.

Die Idee ist also, die Vorteile der klassischen Filtertheorie zu nutzen und trotzdem den Einfluss der Struktur auf mikroskopischer Ebene mit zu berücksichtigen. Dafür soll das Zellmodell nach Schweers [Sch93] herangezogen und angepasst

werden. Darin wird das Filtervlies, wie in Abbildung 1.1 dargestellt, in einzelne kleine Elemente, die sogenannten Zellen, zerlegt.

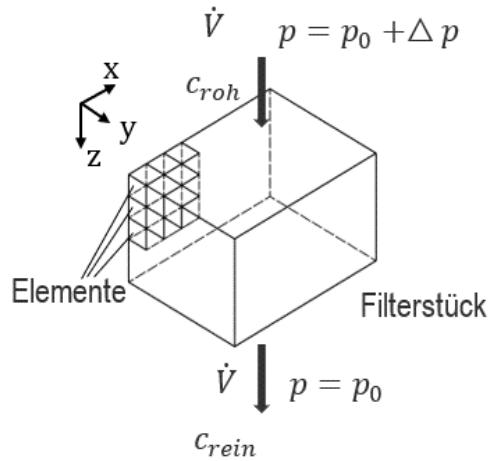


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des Zellmodell-Prinzips

Anschließend kann jedes Element mit den zuvor aufgezählten mikroskopischen Strukturdaten belegt werden, woraus wiederum die individuelle Zellpermeabilität berechnet werden kann. Bei bekanntem Volumenstrom \dot{V} kann das Geschwindigkeitsfeld durch das Vlies bestimmt werden. Anschließend kann für jedes Element der Trenngrad bestimmt werden, woraus wiederum abschließend mit den einzelnen Elementtrenngraden sukzessive die Abscheideeffizienz des ganzen Vlieses bestimmt werden kann. Der herausfordernde Parameter bei der Tröpfchen-Aerosol-Filtration im Vergleich zur Tiefenfiltration ist dabei die Flüssigkeitseinlagerung und deren Verteilung im Vlies, die sich kontinuierlich ändert. Durch die Änderung der Flüssigkeitsverteilung im Filtermaterial ändern sich wiederum das Strömungsfeld und die Tropfenabscheidung. Dies gilt insbesondere von dem Zeitpunkt des Filtrationsbeginns, bei dem es noch keine Flüssigkeitseinlagerung im Filter gibt, bis zum Zeitpunkt, an dem der quasistationäre Betriebszustand erreicht wird. Dabei ist der quasistationäre Betriebszustand zu dem Zeitpunkt erreicht, an dem sich ein Flüssigkeitsgleichgewicht entsprechend den Betriebsbedingungen, im Filter eingestellt hat. Jede Zelle des Vlieses muss also bis zum Erreichen dieses Punktes in bestimmten Zeitintervallen mit aktualisierten mikroskopischen Strukturdaten belegt werden, um die Flüssigkeitseinlagerung mit zu berücksichtigen. Anschließend muss ein neues Strömungsfeld durch das Vlies berechnet werden. Es müssen neue Trenngrade für jedes Element bestimmt werden, um daraus den neuen Gesamt trenngrad berechnen zu können.

Die Informationen, die benötigt werden, um das beschriebene Modell zu realisieren, lassen sich im Wesentlichen in zwei Gruppen einteilen. Zum einen die vliestypischen Parameter und zum anderen die Informationen zur Flüssigkeitsverteilung während des Filtrationsprozesses, die wiederum abhängig von der Vliestyp sind. Für die Vliestyp sind sowohl die mikroskopischen als auch

die makroskopischen Eigenschaften von Bedeutung. Die mikroskopischen Faserinformationen werden benötigt, um die Zellpermeabilität zu berechnen. Die makroskopische Information in Form der Dicke des Vlieses, sowohl der lokalen Schwankungen (durch die Oberflächenbeschaffenheit des Vlieses gibt es große Schwankungen in der Materialdicke) als auch über das gesamte Vlies gemittelt, werden benötigt, um die Anzahl der Elemente zu bestimmen, die in Strömungsrichtung hintereinander positioniert sind.

Die Informationen zur Flüssigkeitsverteilung, die für das vorgeschlagene Modell benötigt werden, sind zum einen die Regionen, in denen Flüssigkeit im Vlies eingelagert wird, und zum anderen die Menge an Flüssigkeit, die eingelagert wird. Beides ist abhängig von den Strukturparametern des Vlieses und den Betriebsbedingungen bei dem Filtrationsprozess. Diese Studie befasst sich zum einen damit, Möglichkeiten zu finden, die Informationen für das vorgeschlagene Modell zu beschaffen und zum anderen damit zu überprüfen, ob das Konzept auf industrieller Ebene anwendbar ist.

Zur Untersuchung der Vliesgeometrie sowie der Flüssigkeitsverteilung werden in dieser Arbeit im Wesentlichen drei verschiedene Methoden verwendet. Dabei liegt der Fokus auf der Verwendung der Micro-Computertomographie sowie der Auslotung der Grenzen dieses Verfahrens. Darüber hinaus finden die Durchlichtfotografie und die optische Profilometrie Anwendung. Zur definierten Sättigung von Vliesen wird ein Filterversuchsstand konzipiert, konstruiert, aufgebaut und verwendet.

2 Theoretische Grundlage und Stand des Wissens

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Grundlagen vorgestellt, die für das Verständnis der später präsentierten Versuche und der Diskussion der Ergebnisse notwendig sind. Dabei stehen die Grundlagen der Koaleszenzfiltration im Vordergrund, diese werden in Abschnitt 2.1 vorgestellt und bilden die grundlegende Voraussetzung für das Verständnis der gesamten Arbeit. Darüber hinaus wird in diesem Abschnitt auf den aktuellen Wissensstand und die industrielle Praxis eingegangen, es werden die neuesten bekannten Arbeiten der Wissenschaft zur Koaleszenzfiltration vorgestellt und gezeigt, an welchen Stellen es noch offene Fragen gibt. In Abschnitt 2.2 wird anschließend noch auf die Herstellmethoden von Filtervliesen und deren Eigenschaften eingegangen. Hier stehen insbesondere die Vliese im Vordergrund, die bei der industriellen Koaleszenzfiltration zum Einsatz kommen.

2.1 Koaleszenzfiltration von Tröpfchen-Aerosol in filternden Abscheidern

Als Tröpfchen-Aerosol wird das Gemisch aus Flüssigkeitsspartikeln in einem Gas bezeichnet, wobei die Tröpfchen im Wesentlichen durch thermische oder adiabatische Prozesse, wie beispielsweise Verdampfung und Kondensation, entstehen. Ebenso können Mechanismen wie die Flüssigkeitsscherung und das Spritzen sowie Grenzflächenkräfte oder Reibungskräfte ursächlich für die Entstehung sein. Diese Partikeln sind in Produktionsprozessen häufig hinderlich und können gesundheits- oder umweltschädlich sein. Zusätzlich gibt es Anwendungen, bei denen die Tropfen solcher Nebel das Produkt einer Fertigung darstellen und zurückgewonnen werden müssen. Zum Entfernen beziehungsweise Einsammeln der Tropfen (also zur Phasenseparation des Tröpfchen-Aerosols) werden in der industriellen Praxis überwiegend Faservliesfilter verwendet und in kommerzielle Filtereinheiten verbaut. Die zugrunde liegenden Phänomene der Koaleszenzfiltration sind bis heute weitgehend unverstanden [Mea14].

Während des Betriebs durchlaufen Koaleszenzfilter mehrere Stadien. Zunächst treffen die flüssigen Partikeln, analog zur Tiefenfiltration von Feststoffpartikeln, auf den einzelnen Fasern auf. Besitzen die Fasern benetzende Eigenschaften in Bezug auf die Flüssigkeit des Tröpfchen-Aerosols, bildet sich ein Flüssigkeitsfilm auf der Faseroberfläche, der bei zunehmender Dicke infolge der Plateau-Rayleigh-Instabilität in eine Aufreihung von Tropfen zerfällt [Roe75; Nei99; Hae15]. Bei nicht benetzenden Fasermaterialien in Bezug auf die Flüssigkeit des

Tröpfchen-Aerosols bilden sich hingegen diskrete Tropfen aus, die durch Impaktion weiterer Tropfen aus dem Aerosol anwachsen. In beiden Fällen wachsen die Flüssigkeitsansammlungen im Filtermedium während des Betriebs weiter an und der Differenzdruck über das Filter nimmt zu. Sind die Einlagerungen groß genug, wird die Flüssigkeit in Folge der Strömungsscherkräfte durch das Filtermaterial getrieben. Der Flüssigkeitstransport findet in makroskopischen Bereichen des Vlieses statt. Es bildet sich ein Flüssigkeitskanal durch das Vlies. Auf der Rückseite läuft die Flüssigkeit nach dem Austritt aus dem Fasermaterial der Schwerkraft folgend ab. Bei phobischen Medien in Form von Tropfen, bei philen Materialien in einem Flüssigkeitsfilm. In diesem Betriebsstadion des Filters findet kein Druckanstieg mehr statt und die Sättigung bleibt konstant. Ein quasistationärer Betriebszustand ist erreicht. Dieser Gleichgewichtszustand bleibt stabil, solange sich der Volumenstrom oder die Tröpfchenkonzentration nicht ändern oder sich Feststoffpartikeln in dem Vlies einlagern. Auf der Rückseite des Filters können durch die Scherkräfte der Strömung bereits abgeschiedene Tröpfchen wieder in die Gasphase eingetragen werden. Mehrere Autoren [Cha10; Con04] schlagen vor, den Betrieb von Koaleszenzfiltern bis zum Gleichgewichtszustand in vier Phasen einzuteilen:

- Phase 1: Die Tröpfchen treffen auf den Fasern auf und lagern sich im Material ein. Die effektive Porosität und die verfügbare Faseroberfläche sinken. Der Druckverlust nimmt zu und die Filtereffizienz sinkt.
- Phase 2: Durch Koaleszenz und Umverteilung der Flüssigkeit im Vlies steigt der Druckverlust stark an und die Filtereffizienz wiederum nimmt stark ab.
- Phase 3: In dieser Phase erhöht sich der Strömungswiderstand deutlich, was wiederum zu einem Anstieg des Geschwindigkeitsfelds innerhalb der Faserstruktur führt. Daraus folgen eine Verbesserung der Abscheidung durch Trägheit und gleichzeitig eine Verringerung der Abscheidung auf Basis des Diffusionseffektes (vgl. Abschnitt 2.1.1).
- Phase 4: In dieser Phase bilden sich die Flüssigkeitskanäle durch den Filter abschließend aus und es kommt zur Flüssigkeitsfilmbildung auf der Rückseite des Filters. Diese Phase ist gekennzeichnet durch den quasistationären Zustand, in dem Differenzdruck und Sättigung stabil bleiben.

Diese Kategorisierung des Filtrationsprozesses in vier Phasen setzen einen konstanten Volumenstrom und eine stabile Tröpfchen-Konzentration voraus [Mea17].

2.1.1 Auftreffen der Aerosoltropfen auf der Faser

Das Auftreffen der Aerosoltropfen erfolgt analog zu den Abscheidemechanismen der Tiefenfiltration. Dabei wirken im Wesentlichen vier Mechanismen, die für die Abscheidung an einem Kollektor, in diesem Fall der einzelnen Fasern, verantwortlich sind und sich teilweise überschneiden [Hin99]:

- Der Diffusionseffekt (Brownsche Partikeldiffusion)
- Der Sperreffekt
- Der Trägheitseffekt
- Elektrostatische Kräfte

Der Diffusionseffekt basiert auf der Brownschen Partikeldiffusion, die 1828 von Robert Brown [Bro28] postuliert wurde. Dabei bewegt sich ein Partikel auf einer unvorhersehbaren unregelmäßigen Bahn durch das Trägerfluid. In einem Partikelgrößenbereich von $d_p \leq 0,1 \mu\text{m}$ werden Partikeln nahezu ausschließlich durch diesen Mechanismus zur Faser transportiert.

Der Sperreffekt kommt immer dann zum Tragen, wenn die geometrische Ausdehnung des Partikels beim Folgen der Trajektorie um die Faser ursächlich für das Auftreffen ist. Dieser Mechanismus ist im Partikelgrößenbereich von $0,5 \mu\text{m} \leq d_p \leq 1 \mu\text{m}$ der dominierende.

Der Trägheitseffekt beruht auf der Massenträgheit des Partikels. Bei hoher Strömungsgeschwindigkeit und großer Partikelmasse kann der Partikel der Umlenkung der Strömung nicht folgen und wird auf die Faseroberfläche transportiert. Dieser Effekt dominiert bei einer Partikelgröße ab etwa $d_p \geq 1 \mu\text{m}$. [Gai12].

Der elektrostatische Abscheideeffekt basiert auf der Ablenkung einer geladenen Partikel in einem elektrischen Feld und kann nur dann eintreten, wenn der Kollektor und die Partikel ungleich geladen sind oder geladen und neutral sind. Eine Darstellung der genannten Abscheidemechanismen ist in Abbildung 2.1 gezeigt.

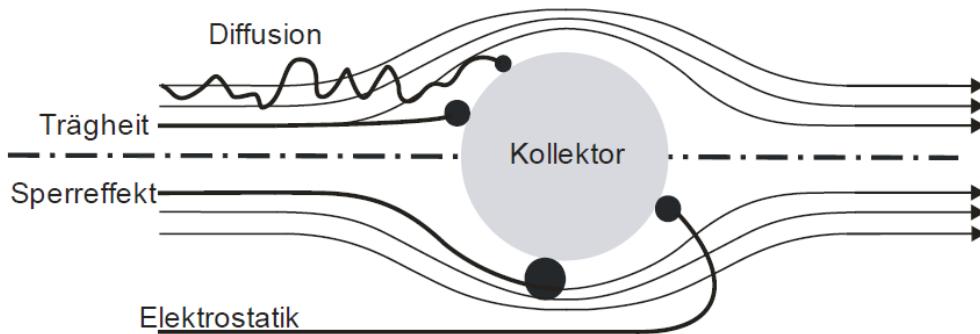


Abbildung 2.1: Schematische Übersicht der Abscheidemechanismen am Kollektor [Sch03]

Die Wirkung der genannten Effekte hängt dabei von den stofflichen und geometrischen Eigenschaften der Partikeln und der Fasern ab. Hinzu kommen die stofflichen Einflüsse des Trägergases [Sch03]. Genau genommen ist der Tropfen jedoch erst am Kollektor abgeschieden, wenn er auch haften bleibt.

$$\varphi = \eta_F \cdot h \quad (2.1)$$

Es gilt also, dass der Einzelfaserabscheidegrad φ das Produkt aus Einzelfaser-auf treffgrad η_F und der Haftwahrscheinlichkeit h ist. In den für die Koaleszenzfiltration üblicherweise verwendeten Strömungsgeschwindigkeiten kann jedoch von einer Haftung ausgegangen werden [Hol15; Mul07; Lor09]. Weiter wird auf den Wiedereintrag bereits abgeschiedener Tropfen in Abschnitt 2.1.3 eingegangen.

Um den Wirkungsgrad der Abscheidemechanismen bestimmen zu können, muss das Strömungsfeld um die einzelne Faser herum bekannt sein. Bei einem realen Medium für die Tröpfchen-Aerosol-Filtration, ebenso wie bei Medien für die Tiefenfiltration, wird das Strömungsfeld durch die benachbarten Fasern im Material stark beeinflusst. Daher wird zur Berechnung eine konzentrische Referenzfläche um die einzelne Faser herum gelegt, in der es wiederum möglich ist, die Stokes-Gleichung zu lösen [Bro93]. Zur Bestimmung der Randbedingungen haben sich die Theorie nach Kuwabara [Kuw59] und nach Happel [Hap58] durchgesetzt. Sie führen zu den exaktesten Lösungen der Stokes-Gleichung [Nie19]. Detaillierte Informationen zu den Strömungsfeldtheorien sind in [Cou12] zu finden.

Zur Berechnung der Partikelabscheidung durch die beschriebenen Effekte an einzelnen Fasern schlagen verschiedene Autoren semiempirische Näherungen vor. Diese basieren auf den Gleichungen, die für die Staubfiltration entwickelt wurden und sind auf Grund ihrer Auslegung für zylindrische Fasersysteme nur für das frühe Betriebsstadium der Koaleszenzfiltration anwendbar (Phase 1). Für die Abscheidung durch den Sperreffekt und den Diffusionseffekt wurden einige empirische Korrelationen in den Ausdrücken vorgenommen, um die Anwendbarkeit für die Tröpfchen-Aerosol-Filtration zu verbessern. Der elektrostatische Abscheideeffekt kommt bei der Öltröpfchen-Filtration in kaum nennenswertem Umfang zum Tragen. Reine Öle sind dielektrische Stoffe und tragen in der Regel nur eine geringe Ladung. Außerdem werden sie auf Fasern gesammelt, die üblicherweise bereits mit demselben Öl benetzt sind. Schmieröle oder andere Flüssigkeiten, die elektrisch leitende Zusätze oder Verunreinigungen beinhalten, können Ladungen tragen [Mea17]. Geladene Fasern würden bei Kontakt mit einer organischen Flüssigkeit ihre Ladung sofort verlieren [Hin99]. Zur Berechnung der Tropfenabscheidung durch den Trägheitseffekt muss die Grenzpartikelbahn bekannt sein. Diese stellt die Trajektorie einer Partikel dar, auf welcher die Partikel mit der Faser gerade noch in Kontakt kommt, anstatt die Faser, der Strömung folgend, ohne

Berührung zu passieren. Die Partikelbahn kann durch Lösen der Bewegungsgleichung mit der Randbedingung des Tropfendurchmessers bestimmt werden. Der Trägheitsauftreffgrad η_I des Tropfens auf die Faser kann also als Funktion von dimensionslosen Kennzahlen angegeben werden.

$$\eta_I = f(Re, R, \psi) \quad (2.2)$$

Darin ist Re die Reynolds-Zahl der Faserumströmung, R der Sperreffektparameter:

$$R = \frac{d_t}{d_f} \quad (2.3)$$

und ψ Trägheitsparameter:

$$\psi = Cu \frac{\rho_p \cdot d_t^2 \cdot v}{18 \cdot \mu \cdot d_f} \quad (2.4)$$

mit:

- | | | |
|-------|---|------------------------|
| d_t | = | Tropfendurchmesser |
| d_f | = | Faserdurchmesser |
| v | = | Anströmgeschwindigkeit |
| μ | = | Dynamische Viskosität |

und Cu die Cunningham Korrektur:

$$Cu = 1 + \frac{2 \cdot \lambda}{d_t} \left(1,257 + 0,4 \cdot \exp \left(-\frac{1,1 \cdot d_t}{2 \cdot \lambda} \right) \right) \quad (2.5)$$

mit:

- | | | |
|-----------|---|-------------------------|
| λ | = | Mittlere freie Weglänge |
|-----------|---|-------------------------|

Näherungen zum Beschreiben der Partikelabscheidung durch den Trägheitseffekt sind ausschließlich in bestimmten Strömungsbereichen gültig. Es lässt sich aus den Ergebnissen mehrerer Autoren [Alb31; Sub69] folgende Näherung ableiten:

$$\eta_I = \frac{\psi}{0,75 + \psi} \quad (2.6)$$

für:

$$Re > 500 \quad \text{und} \quad \psi < 20$$

Muhr und Löffler [Löf72] bezogen eine Näherung für den Grenzschichtbereich mit ein und erweiterten somit den Anwendungsbereich bis zu einer Reynoldszahl von $Re > 50$. Auf Basis ihrer Berechnungen postulierten sie die Näherungsgleichung für den Auftreffgrad im Trägheits- und im Sperreffektbereich η_{I+R} für $50 < Re < 500$:

$$\eta_{I+R} = \frac{\psi^3}{\psi^3 + f_1 \cdot \psi^2 + f_2 \cdot \psi + f_3} + R \quad (2.7)$$

$$f_1 = -0,0133 \ln Re + 0,931$$

$$f_2 = +0,0353 \ln Re - 0,360$$

$$f_3 = -0,0537 \ln Re + 0,398$$

Für die Strömung im Reynolds-Bereich $1 < Re < 60$, der für die Koaleszenzfiltration die größte Relevanz hat, wurden Ergebnisse von Suneja und Lee [Sun73] veröffentlicht, die später von weiteren Autoren aufgegriffen und angepasst wurden. Die Näherungen beziehen sich ebenfalls auf den Trägheits- und den Sperreffektbereich:

$$\eta_{I+R} = \left(\frac{\psi}{\psi + 0,8} - \frac{2,56 - \log_{10} \cdot Re - 3,2 \cdot R}{10\sqrt{\psi}} \right) (1 + R) \quad (2.8)$$

Darüber hinaus gibt es von [Hil81] eine Näherungsgleichung zur Partikelbahnberechnungen bei einem Strömungsfeld von $Re < 1$, die für eine feststehende Partikeldichte von $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ Gültigkeit besitzen [Sch93; Hil81].

Für den Wirkungsgrad der Abscheidung durch den Sperr- und den Diffusionseffekt wurden empirische Anpassungen der bekannten Näherungsgleichungen für die Anwendung auf Tröpfchen-Aerosole vorgenommen. Basierend auf dem Kuwabara-Strömungsfeld schlugen Lee und Liu [Lee82] folgenden Ausdruck für den Wirkungsgrad des Sperreffekts vor:

$$\eta_R = \frac{1+R}{2 \cdot Ku} \left(2 \ln(1+R) - 1 + \alpha + \left(\frac{1}{1+R} \right)^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) - \frac{\alpha}{2} (1+R)^2 \right) \quad (2.9)$$

mit:

α = Faservolumenanteil

und Ku der Hydrodynamische Faktor nach Kuwabara:

$$Ku = -\frac{1}{2} \ln \alpha - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} \quad (2.10)$$

Auf Basis der experimentellen Arbeit der Autoren wurde die Näherung durch einen Koeffizienten ergänzt und vereinfacht. Die Vereinfachung gilt, wenn das Verhältnis von Aerosoltropfendurchmesser zu Faserdurchmesser, also der Sperr-effektparameter R klein ist:

$$\eta_R = 0,6 \left(\frac{1-\alpha}{Ku} \right) \frac{R^2}{1+R} \quad (2.11)$$

Die Effizienz der Diffusionsabscheidung η_D an einzelnen Fasern kann ebenfalls mit einem Ausdruck von Lee und Liu [Lee82] beschrieben werden:

$$\eta_D = 1,6 \left(\frac{1-\alpha}{Ku} \right)^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (2.12)$$

mit der Péclet Zahl Pe :

$$Pe = \frac{v_0 \cdot d_t}{D_t} \quad (2.13)$$

mit dem Diffusionskoeffizienten des Tropfens D_t :

$$D_t = \frac{C u \cdot T \cdot k_B}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_t} \quad (2.14)$$

mit:

$$\begin{aligned} k_B &= \text{Boltzmann-Konstante} \\ T &= \text{Temperatur} \end{aligned}$$

Eine allgemeinere Lösung ist von Cheng et al. [Che90] vorgeschlagen worden:

$$\eta_D = A_e \cdot Pe^{-\frac{2}{3}} \quad (2.15)$$

Darin ist A_e eine materialabhängige Konstante, die von der Faserstruktur des Filtermediums abhängig ist. Die Näherungsgleichung (2.15) findet bevorzugt Anwendung in der Praxis, vorausgesetzt der Materialparameter A_e ist bekannt. Die Werte für A_e können jedoch weit auseinander gehen. So wurden von Cheng und Yeh [Che80] Werte zwischen 1,52 (reale Filtermedien) und 2,7 (Gewebestrukturen) gefunden.

Der Gesamtabscheidegrad der Faser η_F kann im einfachsten Fall als Summe der einzelnen Abscheidemechanismen betrachtet werden:

$$\eta_F = \eta_I + \eta_R + \eta_D \quad (2.16)$$

Dabei gibt es jedoch Überschneidungen der einzelnen Effekte und es kommt zu einer Überbewertung des Faserabscheidegrads. Lee und Liu [Lee82] gehen in ihrer Arbeit davon aus, dass ein Mechanismus vorherrschend ist und betrachten die Summe der Abscheidemechanismen durch Diffusion und Sperreffekt als den Gesamtabscheidegrad.

Raynor und Leith [Ray00] berücksichtigen neben dem Diffusions- und dem Sperreffekt auch den Träigkeitseffekt zur Berechnung der Gesamtabscheidung der Faser. Sie schlagen eine Näherung vor, welche die Überschneidungen der einzelnen Effekte berücksichtigen soll:

$$\eta_F = \eta_I + \eta_R + \eta_D - \eta_D(\eta_R + \eta_I) \quad (2.17)$$

Auch Hinds [Hin99] schlägt einen Term vor, der Trägheits-, Sperr- und Diffusionseffekt berücksichtigt:

$$\eta_F = 1 - (1 - \eta_R)(1 - \eta_D)(1 - \eta_I)(1 + \eta_{D+R}) \quad (2.18)$$

mit:

$$\eta_{D+R} = \frac{1,24 \cdot R^{2/3}}{(Ku \cdot Pe)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.19)$$

Die Auswahl der Näherungsgleichungen zur Bestimmung der Fasereffizienz sollte auf Basis der vorherrschenden Bedingungen im Filter ausgewählt werden. Der dominante Abscheidemechanismus ist also das maßgebliche Kriterium zur Auswahl des Rechenmodells [Mea17; För99].

Wenn ein Tropfen mit einer einzelnen Faser in Kontakt kommt, bildet sich, in direkter Abhängigkeit zur Benetzbartkeit der Faser, eine Tropfenform aus. Die Benetzbartkeit der Faser hängt dabei von den Eigenschaften der Flüssigkeit und den Eigenschaften der Faser ab. Die Flüssigkeit bildet eine der beiden in Abbildung 2.2 gezeigten Formen oder eine Mischform davon aus. Die Tropfenformen werden als „Barrel shape“-Tropfen und als „Clamshell shape“-Tropfen bezeichnet.

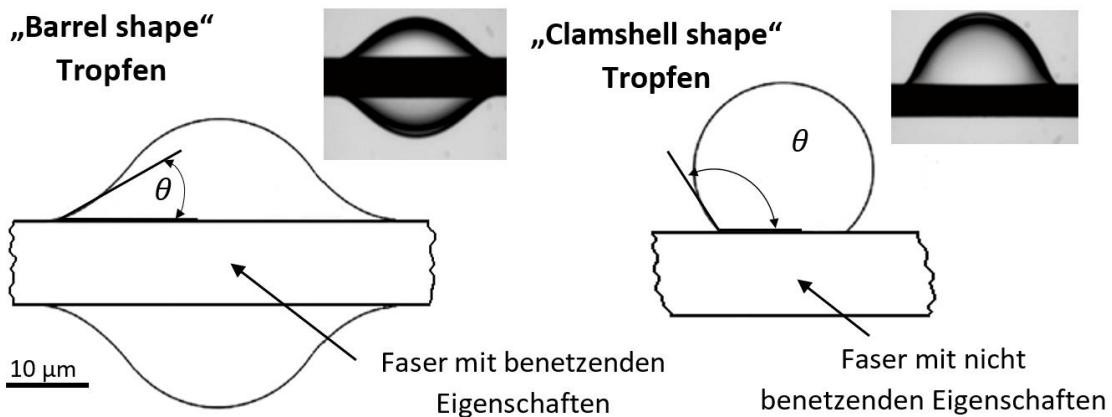


Abbildung 2.2: Tropfenform in Abhängigkeit der Benetzungseigenschaften des Fasermaterials

Abbildung 2.2 zeigt auf der linken Seite die Zeichnung eines „Barrel shape“-Tropfens mit einem relativ kleinen Kontaktwinkel und auf der rechten Seite die Zeichnung eines „Clamshell shape“-Tropfens mit einem entsprechend großen Kontaktwinkel. Die beiden Bilder der Tropfenformen sind experimentell gewonnen [Era13]. Bei weiterer Beladung der Faser bildet sich im benetzbarer Fall eine Flüssigkeitsschicht um die Faser aus. Im phobischen Fall verbleiben die Tropfen mit großem Kontaktwinkel an der Faser und wachsen durch das Auftreffen weiterer Tropfen an [Mul05; Mul06]. Infolge der Flüssigkeitsanlagerungen im Vlies und damit an den Fasern verändert sich die für die Tropfenabscheidung zur Verfügung stehende Faserfläche stetig bis zum Erreichen des quasistationären Bereichs.

Zusätzlich ändern sich die Porosität und damit der Faservolumenanteil im Medium. Auch die sich ausbildende Drainageschicht auf der strömungsabgewandten Seite, bei benetzenden Medien, hat einen Einfluss auf die Tropfenabscheidung. Die vorgestellten Näherungen gelten also für den Betriebsbeginn und die beginnende Beladung eines Filters. Der Einfluss der Beladungsphase und der Flüssigkeitsverteilung im Medium auf die Tropfenabscheidung stehen im Fokus aktueller Forschungen [Pen19a].

2.1.2 Druckverlust, Sättigung und Kapillarität

Der Druckverlust ist bei den meisten Filtrationsanwendungen von ebenso großer Bedeutung wie die Partikelabscheidung, in einigen wenigen Anwendungsfällen sogar von größerer Bedeutung. Druckverlust bedeutet immer eine Verringerung des Wirkungsgrads und damit eine Erhöhung der Betriebskosten. Der Druckverlust eines Koaleszenzfiltermediums im Betrieb ist immer die Summe aus,

- dem Druckverlust des Filtermediums selbst
- und dem Druckverlust der eingelagerten Flüssigkeit.

Abbildung 2.3 zeigt den typischen Verlauf eines benetzbaren Koaleszenzfiltermediums während der Betriebszeit.

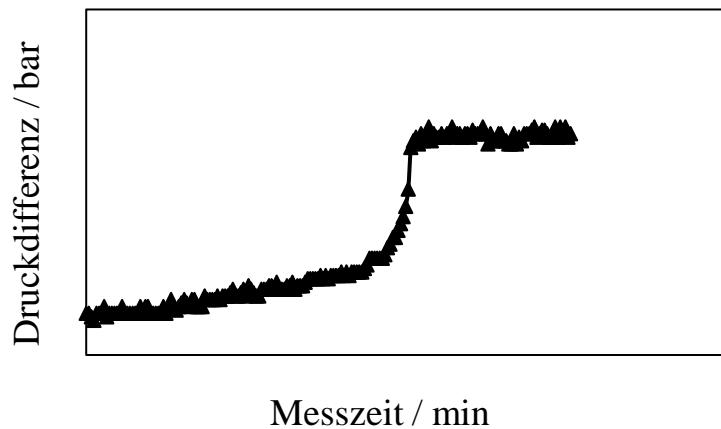


Abbildung 2.3: Exemplarischer Verlauf der Druckdifferenz über die Betriebszeit eines Koaleszenzfiltervlieses

Zu Beginn der Filtration entsteht, in Abhängigkeit der Betriebs- und Materialparameter, ein durch das Filtermaterial verursachter Druckverlust. Es lagern sich erste Tröpfchen an den Fasern des Vlieses ab und koaleszieren. Dabei steigt der Druckverlust über das Medium langsam an. Durch Koaleszenz der Tröpfchen auf den Fasern und Umverteilung der Flüssigkeit im Vlies kommt es während der weiteren Betriebszeit zum stetigen Anstieg des Differenzdrucks bis hin zu einem steiler werdenden Anstieg. Es verbessert sich die Partikelabscheidung durch den Trägheitseffekt und es bildet sich ein Flüssigkeitsfilm auf der strömungsabgewandten

Seite des Filtermaterials aus. Der quasistationäre Betriebszustand ist erreicht [Mea17]. Es wird also über die Zeit gemittelt genauso viel Flüssigkeit durch das Tröpfchen-Aerosol in das Filter eingetragen, wie durch die Drainage ausgetragen wird. Aktuelle Untersuchungen [Kol19a] weisen jedoch darauf hin, dass sowohl der Differenzdruck als auch die Sättigung während des stationären Zustands weiter ansteigen. Dabei weisen Medien mit feinerer Porenstruktur einen langsameren Anstieg auf, als Medien mit größeren Strukturen.

Der durch das Filtermedium selbst zu Betriebsbeginn hervorgerufene Druckverlust lässt sich aus dem Widerstandsmodell herleiten. Er ist das Resultat der Strömungskraft F_W , die auf die Faser ausgeübt wird [Sch93]. Zur Berechnung kann das Widerstandsgesetz für die Umströmung eines Körpers als grobe Näherung verwendet werden:

$$F_W = c_W \cdot A_F \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot v^2 \quad (2.20)$$

mit:

- ρ_g = Dichte des Gases
- c_W = Widerstandskoeffizient
- A_F = Faseranströmfläche
- v = Strömungsgeschwindigkeit

Unter der Annahme senkrecht angeströmter Fasern mit gleichbleibendem Durchmesser d_F und einer homogenen Packungsdichte α folgt für den Druckgradienten durch das Vlies:

$$\frac{\Delta p}{t} = \frac{2}{\pi \cdot d_F} \cdot \rho_g \cdot c_W \cdot \alpha \cdot v^2 \quad (2.21)$$

Aus diesem Ansatz kann mittels Zellmodell von Kuwabara [Kuw59] oder Happel [Hap58] eine Berechnung des Druckverlustes durch das Filtermedium erfolgen, oder es wird die von Davis entwickelte halbempirische Näherung verwendet, die zum Beschreiben von unbenetzten Filtern gilt [Dav52]. Der empirische Teil in der Klammer berücksichtigt dabei den Faseranteil, der nicht senkrecht zur Strömung steht:

$$\Delta p = \frac{v \cdot \mu_g \cdot t}{d_F^2} (64\alpha^{\frac{3}{2}}(1 + 56\alpha^3)) \quad (2.22)$$

Unter der Annahme, dass die Flüssigkeit homogen im Filtermedium verteilt ist und die Fasern alle zum gleichen Teil benetzt sind, wurde von Davis eine angepasste Gleichung vorgestellt, um die fortschreitende Flüssigkeitsbeladung des Filters zu berücksichtigen:

$$\Delta p = v \cdot \mu_g \cdot t \frac{64\alpha_{Nass}^2 (1 + 56\alpha_{Nass}^3)}{d_{F;Nass}^2} \quad (2.23)$$

mit:

$$\mu_g = \text{Dichte des Gases}$$

$$\alpha_{Nass} = \alpha + \frac{m_{Flüssig}}{A_{Filter} \cdot \rho_{Flüssig} \cdot t} \quad (2.24)$$

und

$$d_{F;Nass} = d_F \sqrt{1 + \frac{m_{Flüssig}}{A_{Filter} \cdot \rho_{Flüssig} \cdot t \cdot \alpha}} \quad (2.25)$$

Er ersetze die Terme des Faserdurchmessers d_F und des Faservolumenanteils α durch einen Term für den Nassfaserdurchmesser $d_{F;Nass}$ und einen Term für den Nassfaservolumenanteil α_{Nass} . Weiter sind darin A_{Filter} , die Anströmfläche des Filters, $\rho_{Flüssig}$, die Dichte der flüssigen Phase, sowie $m_{Flüssig}$, die Masse der Flüssigphase, enthalten. Die Gleichung spiegelt jedoch nicht die physikalischen Phänomene im Filtermedium wider, liefert aber recht gute Ergebnisse im Anfangsstadium der Flüssigkeitsbeladung.

Für den quasistationären Zustand steht die folgende semiempirische Gleichung zur Verfügung [Lie85]:

$$\Delta p_s = \Delta p \left(1,09 \left(\alpha \frac{t}{d_F} \right)^{-0,561} \left(\frac{v \cdot \mu_{Fl}}{\sigma \cdot \cos \theta} \right)^{-0,477} \right) \quad (2.26)$$

mit:

$$\mu_{Fl} = \text{Dynamische Viskosität der Flüssigkeit}$$

$$\sigma = \text{Oberflächenspannung der Flüssigkeit}$$

$$\theta = \text{Kontaktwinkel}$$

$$\Delta p = \text{Der Differenzdruck des unbenetzten Filtermediums}$$

Die Kapillarität von Filtervliesen hat bei der Koaleszenzfiltration einen großen Einfluss auf den Flüssigkeitstransport im Filtermedium und damit auch auf das Sättigungsverhalten des Materials. Die Kapillarkräfte sind gemeinsam mit den Scherkräften der Strömung die dominierenden Kräfte im Medium. So bildet die Kapillarität die Grundlage für eine Reihe von Modellen zur Koaleszenzfiltration. Es gibt einige Arbeiten, die zu diesem Thema veröffentlicht wurden [Jag09; Mea13b; Ash09]. Diese verwenden überwiegend Modifikationen der Richards-Gleichung [Ric31] und der Washburn-Gleichung [Was21]. Die Richards-Gleichung kann aus der Darcy-Gleichung und der Kontinuitätsgleichung hergeleitet werden. Die Washburn-Gleichung wiederum beschreibt die Strömung in kapillaren Systemen. Allgemein wird davon ausgegangen, dass die Modelle, die auf der Richards-Gleichung basieren, eine höhere Genauigkeit besitzen, welche jedoch auf Kosten der Rechenzeit geht. Kapillarbasierte Modelle sind eine wichtige Erweiterung der Koaleszenzfiltertheorie und können das Wissen über die Flüssigkeitsverteilung und deren Transport im Medium widerspiegeln. Kenntnis über den Flüssigkeitstransport und die Flüssigkeitsverteilung bedeutet damit zugleich Kenntnis über das Sättigungsverhalten des Filtermediums.

Die Sättigung S ist als der mit Flüssigkeit gefüllte Anteil des Hohlraumvolumens vom Filtervliesen definiert:

$$S = \frac{V_{Flüss.}}{V_{Filter} - V_{Faser}} = \frac{V_{Flüss.}}{V_{Hohlr.}} \quad (2.27)$$

Dabei ist $V_{Flüss.}$ das Volumen der Flüssigkeit im Filter und $V_{Hohlr.}$ das Hohlraumvolumen des Filters, was wiederum die Differenz des Filtervolumens V_{Filter} und des Faservolumens V_{Faser} ist. Es bilden sich während des Filtrationsprozesses Flüssigkeitskanäle durch den Filter aus, also bildlich gesprochen, Flüssigkeitszyliner innerhalb der Filterstruktur, in denen sich die Flüssigkeit bevorzugt durch das Material schiebt. Dieses Verhalten tritt sowohl bei phobischen wie auch bei philen Medien auf und führt, wie bereits besprochen, zu einem starken Anstieg des

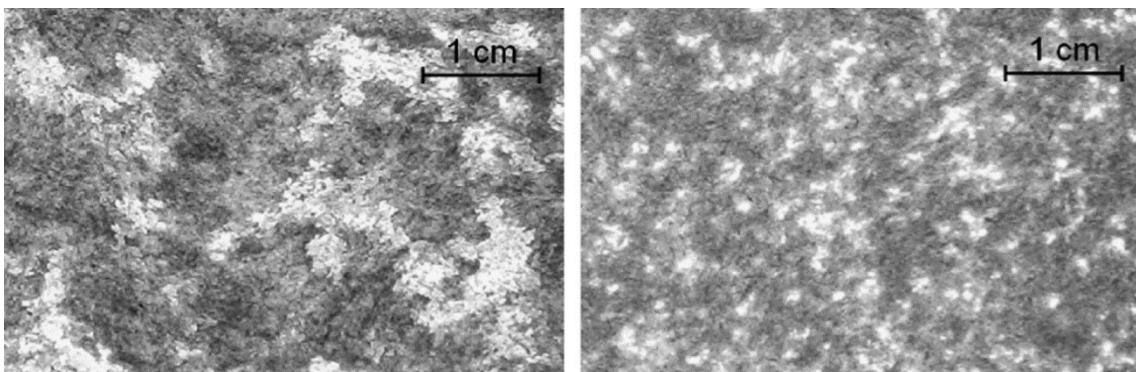


Abbildung 2.4: Typisches Kanalmuster eines nicht benetzbaren (links) und eines benetzbaren Filtermediums (rechts) [Kam15]

Druckverlusts. Der Unterschied zwischen phobischen und philen Materialien bei der Ausformung der Flüssigkeitskanäle durch das Vlies ist im Wesentlichen durch die Größe und die Form der Kanäle gegeben [Kam14b]. Aktuelle Studien [Pen21b; Pen19b] untersuchen den Einfluss der Inhomogenität des Vlieses auf die Positionen der Kanalbildung und deren Form und Ausprägung.

Abbildung 2.4 zeigt zwei typische Kanalmusterausprägungen nach Erreichen des quasistationären Betriebszustands. Auf der linken Seite ist ein phobisches Filtermedium gezeigt und auf der rechten Seite ein philes Material. Die hellen Flächen sind die Bereiche, in denen sich Flüssigkeitskanäle durch das Vlies gebildet haben. Es ist zu erkennen, dass die räumliche Ausdehnung der Flüssigkeitskanäle bei dem nicht benetzbar Medium wesentlich ausgeprägter ist als bei dem benetzbar Medium. Zur phänomenologischen Beschreibung der Zusammenhänge von Flüssigkeitstransport und Differenzdruck gibt es folgende Annahme:

Der lineare Druckanstieg zu Beginn des Filtrationsprozesses verhält sich proportional zur Flüssigkeitsbeladung. Er ist also das Resultat der abnehmenden Porosität und der damit zunehmenden Strömungsgeschwindigkeit und deren Scherkräften in Folge der Flüssigkeitseinlagerung im Vlies. In diesem Schritt bildet sich ein Flüssigkeitsfilm auf der Faseroberfläche und die Flüssigkeit verliert seine Tröpfchenidentität und wird in die Kanalbereiche transportiert, in denen sich die flüssige Phase durch das Vlies bewegt. Der Drucksprung, der im weiteren Verlauf der Filtration auftritt, ist das Resultat eines Effekts, der an der strömungsabgewandten Seite des Vlieses auftritt. Die Flüssigkeit muss bei benetzbar Filtermaterialien die Kapillarkräfte des Vlieses überwinden. Bei nicht benetzbar Materialien verhält es sich genau umgekehrt. Zum Eintritt des Flüssigkeitsfilms in das Material wird Energie benötigt, die sich in Form eines steiler werdenden Druckanstiegs bemerkbar macht. Der Zeitpunkt des Druckanstiegs während des Filtrationsprozesses ist in Folge dessen abhängig von den Benetzungseigenschaften des Filtermaterials [Kam15; Kam14a; Mea17].

Zur Beschreibung des Sättigungsverhaltens gibt es nur eine kleine Anzahl an Modellen, die alle empirischer Natur sind [Mea13a; Ray00; Lie85]. Diese Modelle funktionieren jedoch nur für die Kombination von Flüssigkeit und Filtermaterial präzise, an denen sie auch entwickelt wurden. Die Übertragbarkeit auf andere Systeme ist schwierig und die Ergebnisse sind ungenau. Darüber hinaus ist bei einigen Systemen das Wissen über den Differenzdruck zur Berechnung der Sättigung notwendig. Die Näherungen aus den oben genannten Arbeiten beinhalten einige gemeinsame Parameter. Beispiele dafür sind der Faserdurchmesser, die Porosität beziehungsweise der Faservolumenanteil, die Faseranströmgeschwindigkeit und Angaben zur verwendeten Flüssigkeit. Eine gute Übersicht über die Näherungsgleichungen liefert [Mea17]. Die Auswahl des Rechenmodells hängt letztendlich von den Eigenschaften des Filters und der Verfügbarkeit des Differenzdrucks ab.

2.1.3 Abscheidung und Wiedereintrag der flüssigen Phase

Die Flüssigkeit, die in dem Filter abgeschieden und in Kanälen durch das Filtermaterial transportiert wird, tritt abschließend auf der Reinseite durch das Material wieder aus und fließt der Gravitation folgend ab. Bei benetzenden Filtermaterialien geschieht dies in Form eines Flüssigkeitsfilms, bei nicht benetzbaren Materialien in Form von Tropfen. Ein Flüssigkeitsabtransport durch die Gravitationskraft tritt innerhalb des Fasermaterials in der Regel nicht auf, da die Kapillarkräfte innerhalb des Materials dem entgegenwirken. In industriellen Filtersystemen wird die Flüssigkeit am Boden des Filters in einem strömungsberuhigten Bereich gesammelt. Dieser Bereich wird als Filtersumpf bezeichnet und üblicherweise von Zeit zu Zeit manuell geleert. Es gibt jedoch auch Filtersysteme, die den Sumpf bei einem bestimmten Füllstand automatisch leeren. Das Abfließen der Flüssigkeit auf der strömungsabgewandten Seite bezeichnet man allgemein als „Drainage“.

Es kann während des Filtrationsprozesses vorkommen, dass ein Teil des Flüssigkeitsfilms durch die austretende Gasströmung auf der Rückseite mitgerissen wird. Dabei entsteht ein sekundäres Tröpfchen-Aerosol auf der Reinseite des Filters. Es wird also bereits abgeschiedene Flüssigkeit wieder in die Gasphase eingebracht. Das Auftreten dieses Effektes ist ungewollt und unbedingt zu vermeiden. Dieses Phänomen ist bei den Filterherstellern bekannt und man spricht, aus dem englischen Sprachgebrauch heraus stammend, vom „Re-Entrainment“ und dem „blow-off“ Effekt. Das Auftreten dieses Effekts wurde auch in unterschiedlichen wissenschaftlichen Arbeiten beobachtet und veröffentlicht [Con04; Lei96b; Ray00] und tritt insbesondere bei stark benetzenden Medien auf [Pen19a]. Üblicherweise wird ein sehr breites Tropfenspektrum mit zwei Maxima erzeugt. Das erste Maximum liegt in einem Tropfengrößenbereich von $1 - 10 \mu\text{m}$ und das Zweite in einem Größenbereich von $100 - 500 \mu\text{m}$. Das erste Maximum der Verteilung ist recht schmal und die Anzahl der Tröpfchen ist größer als die Anzahl der Tröpfchen des zweiten Maximums, das recht breit verteilt ist. Das Tröpfchenspektrum reicht insgesamt von unter $0,1 \mu\text{m}$ bis hin zu mehreren Millimetern [Wur15a].

Die größeren Tröpfchen entstehen durch die Gasströmung, welche die Flüssigkeit aus dem Flüssigkeitsfilm herausreißt. Die kleineren Tröpfchen, sogenannte Satelliten- oder Tochtertropfen, entstehen als Nebeneffekt beim Ausreißen der größeren Tropfen aus der Flüssigkeitsdrainage. Bei der Entstehung der Tropfen wird die Strömungsgeschwindigkeit als einer der kritischen Parameter gesehen. Zur Abschätzung der Kraft, die zum Abriss eines Tropfens benötigt wird, der durch seine Oberflächenspannung an einer Faser haftet, definiert man in der Regel eine kritische Weberzahl [Woz03; Wal90]. Das Abreißen einzelner Tropfen aus der Drainageschicht ist jedoch nicht der einzige bekannte und ursächliche Mechanismus bei der Entstehung des sekundären Tröpfchen-Aerosols. Es ist bekannt, dass platzzende Gasblasen beim Strömungsdurchtritt ein multimodales Tropfenspektrum

erzeugen, das in die sekundär Tröpfchenverteilung mit eingeht [Wur15b]. Die Untersuchungen von [Wur17] zeigen jedoch, dass die mittlere Entrainment-Konzentration stärker von der Aerosolkonzentration abhängt, als von der Anströmgeschwindigkeit. Weiter zeigt der Autor, dass die Drainagefilmdicke neben der Anströmgeschwindigkeit einen signifikanten Einfluss auf die Blasen- und Sekundärtropfenbildung hat.

Je nach vorherrschendem Mechanismus entsteht also eine unterschiedliche Tröpfchengrößenverteilung, die mutmaßlich von den Grenzflächeneigenschaften der Materialkombination abhängt. Bei benetzbaren Filtermedien, an denen sich eine Drainageschicht auf der Reingasseite bildet und eher der Effekt der platzen Gasblasen auftritt, sollte die Sekundärtröpfchenverteilung multimodal sein. Die nicht benetzbaren Materialien, bei denen die Drainage in Tropfenform erfolgt, sollte das Phänomen des Tropfenabisses dominieren. Es gibt jedoch noch keinen Nachweis zu dieser Theorie [Wur15b; Wur15a].

2.2 Herstellprozesse und Klassifizierung von Filtervlies

Die für die Filtrationsanwendung produzierten Vliesstoffe können nach verschiedenen Kriterien in Klassen eingeteilt werden. So kann beispielsweise eine Unterteilung nach der Faserstoffart, der Faserfeinheit, der Faservorzugsrichtung, der Faserlänge, der Anordnung der Bindestellen, der verwendeten Vliesverfestigungsmethode oder nach dem Herstellverfahren vorgenommen werden [ISO03; Fuc12]. Eine häufig verwendete Unterteilung ist die nach dem Herstellprozess, woraus sich zwei Hauptverfahrensgruppen zur Herstellung von Vliesstoffen ergeben. Zum einen das Trockenverfahren, bei dem das Vlies in einem gasförmigen Medium gebildet wird, und zum anderen das Nassverfahren, bei dem das Vlies in einem flüssigen Medium, meistens Wasser, gebildet wird [Hut07].

2.2.1 Das Trockenverfahren

Das Trockenverfahren zur Vliesherstellung lässt sich wiederum in fünf wichtige Unterfahrensgruppen einteilen:

- Das Luftlegeverfahren
- Das Trockenlegeverfahren (Kardieren)
- Das Spinnvliesverfahren
- Das Schmelzblasverfahren (Meltblown)
- Das Elektrospinnverfahren

Neben den fünf genannten Fertigungsprozessen gibt es noch weitere, experimentelle Verfahren sowie Misch- und Sonderformen, die hier jedoch insgesamt eine untergeordnete Rolle spielen.

Das Luftlegeverfahren

Bei diesem Verfahren werden trockene Zellstofffasern in einen Luftstrom eingebracht, der das Material auf ein Kollektorgewebe aufbringt. Dabei werden die verwendeten Fasern häufig mit superabsorbierenden Polymeren (SAP) vermengt. Diese bestehen in der Regel aus Natriumpolyacrylat und sind in der Lage, das bis zu 300-fache ihres Eigengewichtes an polarer Flüssigkeit aufzunehmen [Zeu05; EDA]. Die wichtigsten Erzeugnisse dieses Herstellverfahrens sind saugfähige Materialien für Hygieneprodukte. Für die Filtration ist dieses Verfahren nicht von Relevanz [Hut07; Fuc12].

Das Trockenlegeverfahren (Kardieren)

Das Trockenlegeverfahren unterscheidet sich von dem Luftlegeverfahren im Wesentlichen durch die Eigenschaften des eingesetzte Ausgangsmaterials und die Art und Weise der Verarbeitung im Fertigungsprozess. Das wichtigste Rohmaterial für trockengelegte Strukturen sind Stapelfasern, die mit Hilfe aerodynamischer und mechanischer Kräfte vereinzelt und dispergiert werden, um anschließend das Vlies zu formen. Die Formgebung erfolgt durch ein Walzenwerk, in dem einige Walzen mit zahnartigen Garnituren oder feinen Hähchen ausgestattet sind. Durch diesen Prozess wird den Fasern eine Vorzugsrichtung entlang des Umfangs der Walzen gegeben. Nach der Formgebung kann das Vlies, in Abhängigkeit der weiteren Verwendung, durch thermische, chemische und mechanische Verfahren verfestigt werden. Viele dieser so erzeugten Vlies- und Filzmaterialien werden für die Filtration verwendet [Fuc12; Hut07].

Das Spinnvliesverfahren

In diesem Verfahren werden Polymere aufgeschmolzen und versponnen. Es gibt mehrere verschiedene Spinnvliessysteme, denen jedoch allen das gleiche in Abbildung 2.5 gezeigte Schema zugrunde liegt. Im ersten Schritt wird das Polymer extrudiert und gefiltert, bevor es weiter in eine Spinndüse befördert wird. Die Spinndüse selbst besitzt tausende feinste Bohrlöcher, durch die das geschmolzene Polymer gedrückt wird, wodurch eine Schar von Filamenten entsteht. Diese kühlen ab und werden mit Hilfe von Luftströmungen durch eine Venturidüse geleitet, in der ein Streckvorgang der Filamente stattfindet. Hinter der Venturidüse befindet sich eine Verteilkammer, in der die Filamente durch eine turbulente Strömung verwirbelt und verschlungen werden. Die verwirbelten Filamente werden im nächsten Schritt über eine Absaugung auf ein Förderband bewegt und abschließend mit einer Kalander- oder Prägewalze verfestigt. Damit wird eine thermische Verbindung an den Kontaktstellen der einzelnen Filamente erzeugt. Die gängigsten Polymere für dieses Verfahren sind Polyester, Nylon, Polyethylen und Polypropylen.

Typische Faserdurchmesser dieses Herstellprozesses liegen in einem Bereich von über $20 \mu\text{m}$ [Gri19; Zha98; Hut07].

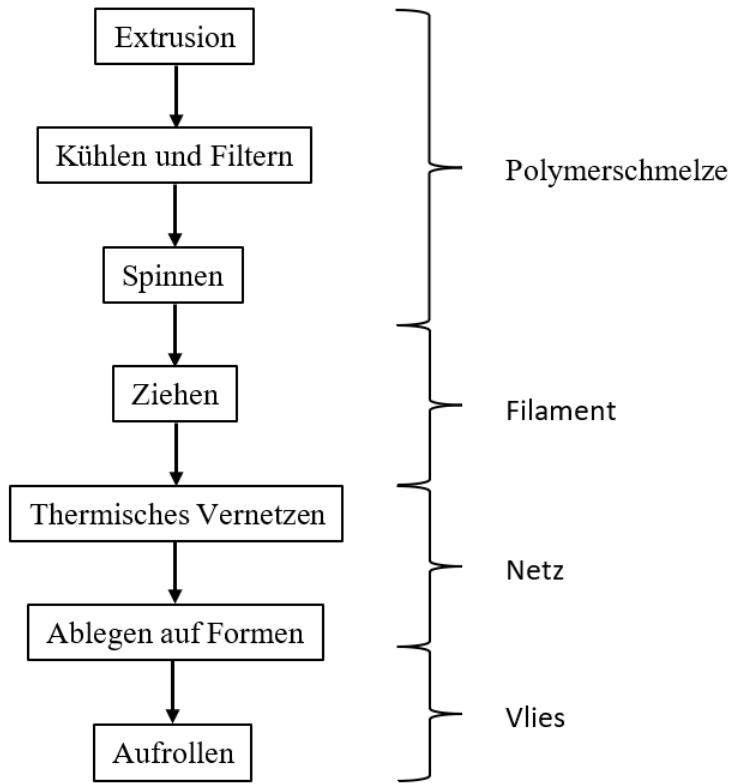


Abbildung 2.5: Zugrundeliegendes Ablaufschema des Spinnvliesverfahrens

Das Schmelzblasverfahren (Meltblown)

Bei dem Schmelzblasverfahren werden, ebenso wie bei dem Spinnvliesverfahren, Polymere aufgeschmolzen und durch eine Spinndüse extrudiert [Dut08]. Der Hauptunterschied ist der, dass heiße Luft mit hoher Geschwindigkeit in der Nähe der Spinndüsen eingeblasen wird, wodurch die Filamente direkt am Austrittspunkt gestreckt werden. Anschließend werden die Filamente durch Luftströme heruntergekühlten und auf einer Trommel oder einem Sieb zum Vlies gelegt. Abschließend wird das Vlies über ein Walzenwerk verfestigt. Der üblicherweise erzielte Filamentdurchmesser beträgt $2 – 4 \mu\text{m}$. Die Porosität liegt zwischen 75 – 95 % bei einer sehr homogenen Porengrößenverteilung [Dut08]. Der wichtigste Unterschied in Bezug auf die Materialkennwerte ist im Vergleich zu dem Spinnvliesverfahren die Feinheit der Filamente. Diese Eigenschaft macht schmelzblasene Vliese zu idealen Materialien für die Flüssigkeits- und die Gastfiltration [Hut07]. Ein weiterer großer Anwendungsbereich ist die Herstellung von Verbundmaterialien [Dra19; Fuc12].

Das Elektrospinnverfahren

Das Elektrospinnen ist ein Verfahren, das erstmals von Anton Formhals im Jahre 1934 patentiert wurde [For30]. Dabei wird eine Polymerlösung oder ein Polymer durch eine feine Kapillare geleitet, die gleichzeitig als Elektrode dient. Als Gegenelektrode wird eine bewegliche Oberfläche (Rolle, Fließband) verwendet. Zwischen Elektrode und Kollektor wird eine Hochspannung angelegt. Die Lösung oder das Polymer wird durch das elektrische Feld von der Spitze der Kapillare zum Kollektor gezogen. Durch die Bewegung der Katodenoberfläche orientieren sich die Fasern in eine Vorzugsrichtung. Mit diesem Spinnverfahren lassen sich Faserstärken in einer Größenordnung von um die 100 nm erreichen [Fon99]. Die Faserdurchmesser, die bei Vliesen für den Einsatz im Filtrationsbereich verwendet werden, liegen in einem Bereich um 250 nm [Gra02]. Das Verfahren ist aktuell schwer einstellbar, die Eigenschaften des resultierenden Vlieses sind kaum vorhersagbar und können nur über langwierige empirische Optimierung der Parameter erreicht werden. Darüber hinaus sind nur Schichtdicken in einem Bereich von wenigen μm möglich. Durch die letztgenannten Punkte hat sich das Elektrospinnverfahren in der industriellen Anwendung noch nicht durchgesetzt. Trotzdem gibt es Anwendungen in der Luftfiltration, was gleichzeitig der wichtigste Markt für diese Materialien ist [Fon99; Gre07; Wen12].

2.2.2 Das Nasslegeverfahren

Das Nasslegeverfahren ist für die Filter- und Filtermedienhersteller ein sehr bedeutender Herstellprozess. Es liefert einen Großteil der Glasfaservliese, die in der Filtration Anwendung finden [Jon13]. Darüber hinaus wird eine beträchtliche Menge der Vliesstoffe, welche unter die INDA-Definition (Association 25ft he Nonwoven Fabrics Industry) fallen, über dieses Verfahren hergestellt [IND]. So sind nahezu alle HEPA- und ULPA- Filtermedien [DIN19a] und die daraus hergestellten Filter aus nassgelegten Glasfasermedien hergestellt [Jon13]. Das gilt darüber hinaus auch für die meisten von der ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) qualifizierten Filtervliese [ASH].

Der Nasslegeprozess selbst kann in zwei einzelne Arbeitsbereiche gegliedert werden. Der Nassbearbeitungsschritt, in dem die Formgebung des Rohmaterials stattfindet, und der Trockenbearbeitungsschritt, in dem das Wasser entzogen wird und mögliche weitere thermische und mechanische Arbeitsschritte durchgeführt werden. Abbildung 2.6 zeigt schematisch die grundlegenden Prozessschritte und deren Einteilung in den Nass- und in den Trockenbereich.

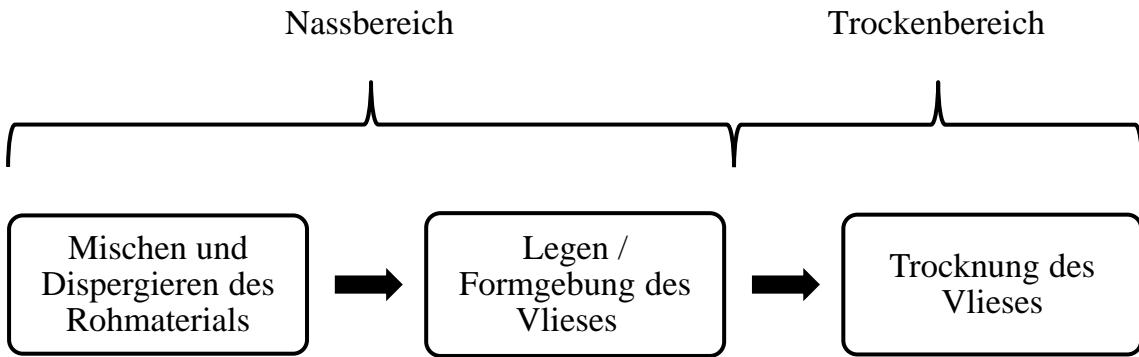


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung des Nasslegeverfahrens

Formgebung des nassgelegten Vlieses

Zu Beginn des Herstellprozesses wird das Rohmaterial in einen Dispersionsbehälter gegeben und dort mit Wasser vermischt. Als Rohmaterial werden die verwendete Faserart sowie mögliche Zusatzstoffe und Bindemittel bezeichnet. Der dabei entstehende Brei wird anschließend der Nasslegemaschine zugeführt, wobei er auf dem Weg dorthin noch vorbereitende Verarbeitungsschritte durchlaufen kann. Dazu gehören beispielsweise das Sieben, um grobe Verunreinigungen zu entfernen, sowie das Fibrillieren und das Mahlen der Fasern, um eine bessere Vernetzung des Vlieses zu erreichen. Anschließend wird der Brei über eine Schlitzdüse, die eine homogene Fasersuspension aufrecht hält und als Stoffauflauf bezeichnet wird, auf die Stofflaufbahn aufgeschlämmt. Die Stofflaufbahn ist ein bewegliches Sieb, das die aufgelegte Schlammschicht in einer gleichmäßigen Bewegung in den Trocknungsbereich der Anlage transportiert und die überschüssige Flüssigkeit absickern lässt. Die beschriebene Anlage wird als Langsiebmaschine bezeichnet und zur Herstellung von Papierfiltermedien verwendet, zu denen auch die als HEPA- und ULPA-Filtermedien klassifizierten Vliese aus Mikroglasfasern zählen. Zur Produktion von Filtermaterialien aus schwer zu dispergierenden Stoffen und Synthetikfasern werden speziell für diesen Zweck entwickelte Maschinen und Sonderbauformen verwendet. Beispiele hierfür sind der Rotoformer, der Deltaformer und Schrägsiebmaschinen, die auch als Hydroformer bezeichnet werden [Ngu15]. Der wesentliche Unterschied ist, dass diese Bauformen mit einer geringeren Faserdichte im Wasser (< 0,1%) arbeiten. Herkömmliche Langsiebmaschinen liegen in einem Bereich zwischen 0,3 – 0,8% [AVK14; Tes13].

Trocknung des nassgelegten Vlieses

Bevor das Vlies zur Aufwickelpule gelangt, muss das Wasser aus dem Material entfernt werden, ohne dabei die poröse Struktur zu zerstören. Dafür werden häufig Saugvorrichtungen verwendet, die den Feuchtigkeitsgehalt auf 50 – 60 %

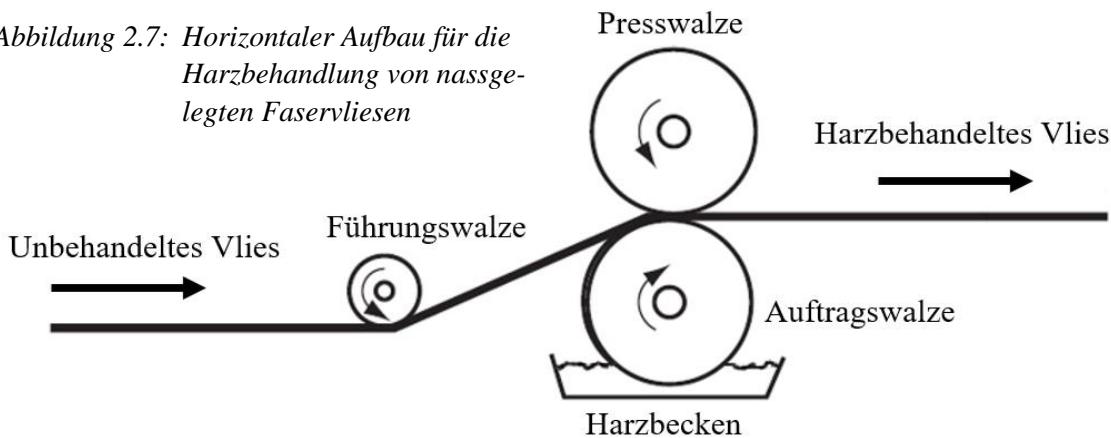
senken [Hut07]. Bei Produkten, bei denen die Porosität eine untergeordnete Rolle spielt, kommen auch mechanische Vorrichtungen wie Pressen oder Walzen zum Einsatz. Der Rest der Feuchtigkeit muss durch thermische Verfahren entfernt werden. Die gebräuchlichsten Technologien dafür sind dampfbeheizte Zylindertrockner und Heißlufttrockner. Es werden aber auch auf Infrarot- und Mikrowellenstrahlung basierende Geräte oder Kombinationen aus den genannten Verfahren eingesetzt. Für Filtermedien wird die Trocknung mit Heißluft bevorzugt, in der Regel in Form eines Flachbetttrockners, der für unterschiedliche Trocknungsgrade und für die eventuell benötigte Aushärtung des Bindemittels präzise eingestellt werden kann [AVK14].

Binden des nassgelegten Vlieses

Der Prozess des Bindens oder des Verfestigens ist selten ein für sich alleinstehender Prozessschritt, anders als beispielsweise die Formgebung oder das Trocknen. Das Binden kann sowohl in den formgebenden Prozessschritt als auch in den des Trocknens eingebettet sein. Ebenso ist es möglich, jedoch unüblich, das Binden als nachbehandelnden Schritt durchzuführen. Die Möglichkeiten, eine Verfestigung vor der Formgebung zu erwirken, sind Wasserstoffbrückenbildung, Mahlen des Zellstoffes oder Zugabe von Bindemitteln. Die Wasserstoffbrückenbindung ist der grundlegende Bindemechanismus für die Papierherstellung. Auch viele Vliesmaterialien für die Filtration beinhalten einen gewissen Prozentsatz an Zellstoff. Besteht das Rohmaterial aus Polymerfasern mit niedrigem Schmelzpunkt, oder werden solche als Bindemittel beigemengt, ist eine thermische Behandlung im Prozessschritt des Trocknens möglich, um die gewünschte Festigkeit und Integrität des Materials zu erzielen. Nassfeste Harze können ebenfalls als Bindemittel verwendet werden und benötigen im weiteren Prozess Wärme, um auszuhärten. Es gibt diverse weitere Harze und chemische Mittel, die dem Rohmaterial beigemengt werden können, um die Festigkeitseigenschaften des Vlieses zu verbessern. Bei Filtervliesen wird die Verfestigung in der Regel durch eine Harzbehandlung nach der Formgebung erzielt. Dem Rohmaterial beigemengte Bindemittel haben dabei üblicherweise nur die Aufgabe, das nassgelegte Vlies für die Trocknung und Harzbehandlung zu stabilisieren [Ble10; Ber].

Die Harzbehandlung verfolgt den Zweck, dem Filtermedium die gewünschte strukturelle Integrität zu verleihen, die für die Anforderungen der Endanwendung des Filters erforderlich sind. Die Stabilisierung mit dem Harz kann sowohl in-line, also innerhalb der Trocknungsstrecke, wie auch off-line als nachgeschalteter Prozess erfolgen. Ein einfacher Aufbau in horizontaler Anordnung ist in Abbildung 2.7 gezeigt.

Abbildung 2.7: Horizontaler Aufbau für die Harzbehandlung von nassgelegten Faservliesen



Bei dem horizontalen Aufbau läuft die Vliesbahn unter einer Führungsbahn entlang und dann weiter durch ein Walzenpaar hindurch. Die untere Walze, die als Auftragswalze bezeichnet wird, trägt das Harz auf die Vliesbahn auf, während die obere Walze, die als Presswalze bezeichnet wird, die Vliesbahn in den Spalt zwischen beiden Walzen zwingt. Die Auftragswalze dreht sich dabei zur Benetzung der Oberfläche und dem Transport des Harzes zum Vlies durch ein Harzbecken, in dem sich die Harzlösung befindet. Die Presswalze übt nur einen geringen Druck auf die Vliesbahn aus und dient eher als Führungsrolle. Ziel des Prozesses ist es, das Vlies mit dem Harz vollständig zu sättigen. Die Harzaufnahme des Vlieses wird dabei primär über den Harzanteil in der Lösung und nur sekundär über die Spaltbreite des Walzensatzes gesteuert. Neben dem horizontalen Aufbau ist eine weitere häufig verwendete Anordnung der vertikale Aufbau. Dabei wird das Vlies senkrecht durch einen Walzensatz bewegt, mit dem das Harz aufgetragen wird. Die vertikale Anordnung ermöglicht eine höhere Feststoffkonzentration im Harz und lässt sich damit etwas ökonomischer betreiben [Hut07; Fuc12]. Filter, in denen harzgebundenes nassgelegtes Faservlies verarbeitet ist, machen mit Abstand das größte Produktvolumen der Filterindustrie aus [Gri18; Leu18].

Um die Festigkeit weiter zu steigern, werden die Filtermedien in den meisten Anwendungsfällen zusätzlich noch kaschiert. Das bedeutet, sie werden ein- oder beidseitig mit einer dünnen Lage (in der Regel 2-3 Faserstärken) eines anderen Vlieses mit stabileren, dickeren und längeren Fasern laminiert. Hinzu kommt bei der Verwendung von Glasfasern, dass diese bei Exposition gesundheitsschädlich sind und eine Weiterverarbeitung ohne Kaschierung hohe Sicherheitsanforderungen mit sich bringt [Tes13; Eur15]. Häufig werden Medien, die mit dem Spinnvliesverfahren oder mit dem Schmelzblasverfahren hergestellt werden, verwendet. Die Kaschierung wird mit Latexklebstoff oder mit Schmelzklebstoff aufgebracht. Strenggenommen gelten diese Vliese als Verbundvlies [Hut07].

Eigenschaften von nassgelegtem Faservlies

Auf Grund der Vielzahl an Varianten und Möglichkeiten der Veredelung und Verfestigung von nassgelegten Faservliesen ist es nicht sinnvoll, pauschale Aussagen über die Eigenschaften zu treffen. Betrachtet man nur die Filtermedien, die nassgelegt und aus Glasfasern hergestellt werden, kristallisieren sich aber einige allgemein gültige Eigenschaften heraus. Es zeigt sich, dass nahezu alle HEPA und ULPA Filtermedien in diese Gruppe fallen. Außerdem besitzen diese Medien ohne weitere Stabilisierung eine geringe Festigkeit. Mit abnehmender Faserstärke steigt die Filtereffizienz und gleichzeitig der Druckverlust über das Medium, was sich sowohl über die Filtertheorie [Sch93; Gai12; Löf88] als auch über zahlreiche Untersuchungen zu diesem Thema herleiten lässt. Umgekehrt proportional dazu sinkt die Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung [Qin06; Hus09]. Ein weiteres Merkmal dieser Filtermedien ist eine, auf makroskopischer Ebene betrachtet, inhomogene Oberfläche. Bei der Aufschwemmung der Fasersuspension auf das Trägersieb entsteht eine hügelige Topologie auf der Oberseite des Vlieses. Daraus folgt eine nicht eindeutig bestimmbarer Dicke des Vlieses [Leu18]. Eine weitere Eigenschaft dieser Filtermediengruppe ist die geringe Dicke von unter 2 mm [Lyd22; Bin22; Hol22].

2.3 Methoden zur Charakterisierung von Filtervliesen

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen für Vliesstoffe und nur ein Teil davon sind Filtrationsanwendungen. Genauso zahlreich und unterschiedlich sind die Anforderungen an die Eigenschaften der Vliesmaterialien in Abhängigkeit der Endanwendung. Die Eigenschaften, die für die Filtration von wesentlicher Bedeutung sind, werden im Folgenden vorgestellt. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die industriellen Standardprozeduren gelegt. Die wichtigsten Eigenschaften in der Filtration sind die Abscheideeffizienz und der Druckverlust über das Medium, wobei beide genannten Merkmale auf strukturelle Eigenschaften sowie auf Materialeigenschaften zurückzuführen sind. Zunächst werden die Verfahren zur Material- und Strukturcharakterisierung vorgestellt, anschließend die wichtigsten Testprozeduren zum Ermitteln des Druckverlusts und der Abscheideeffizienz.

2.3.1 Methoden zur Bestimmung von Material- und Struktureigenschaften

Es gibt diverse gängige Methoden zum Bestimmen der Material- und Struktureigenschaften, die in verschiedenen nationalen und internationalen Normen und Standards geregelt sind. Hinzu kommen zahlreiche experimentelle Methoden, die in der Forschung und Entwicklung, bei sehr speziellen Filtrationsanwendungen und bei der Entwicklung von Prototypen, zur Charakterisierung herangezogen

werden. Im Weiteren werden einige der wichtigsten Verfahren und Standards vorgestellt.

Die Dicke

Die Dicke eines Vlieses bezeichnet den Abstand von Oberseite zu Unterseite und scheint auf den ersten Blick recht einfach bestimmbar zu sein. In den gebräuchlichsten Normen der ANSI/TAPPI T 411 [ANS15], der INDA NWSP 120.1 [IND20], der EDANA NWSP 120.6 [EDA15], der DIN EN ISO 534 Teil 2:2012 [DIN12] und der ISO 9073 Teil 2:1995 [DIN97] werden Prüfmethoden beschrieben, bei denen ein Druckstempel mit einer definierten Geometrie und einer definierten Kraft auf das Material gedrückt wird. Anschließend wird, je nach Norm, manuell oder automatisch, die Dicke gemessen. Jedoch sind Vliese hoch voluminöse und komprimierbare Strukturen. Die aufgelegte Kraft führt also immer zu einer Deformation der Oberflächen und zu einer Unterbewertung der Dicke. Ist die Kraft wiederum zu gering, bleibt der Druckstempel auf den ersten Fasern stehen, die von der Oberfläche hervorstehen. Das führt zu einer Überbewertung der Dicke. Ein weiteres Problem, das insbesondere bei nassgelegten Vliesen auftritt, ist die Unebenheit der oberseitigen Oberfläche des Vlieses (vgl. Abschnitt 2.2.2) [Leu18].

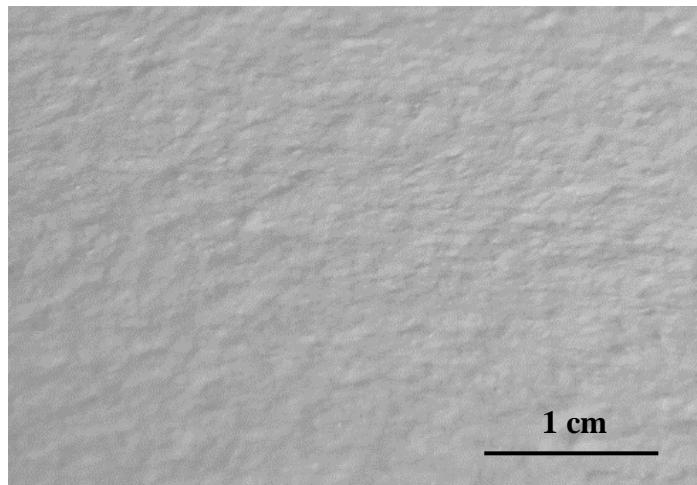


Abbildung 2.8: Oberflächenprofil eines nassgelegten Glasfaservlieses

Abbildung 2.8 zeigt die Oberfläche eines nassgelegten Glasfaservlieses mit seitlicher Beleuchtung und erkennbarem Schattenwurf durch die Erhöhungen auf der Oberseite des Materials. Die Dicke wird immer an kleinen Bereichen der Vliesbahn gemessen, was bei der Oberflächentopologie zu einer Fehlinterpretation der Dicke in beliebige Richtung führen kann [Hut07; Fuc12; DIN97].

Das Flächengewicht

Das Flächengewicht ist die Masse des Vlieses bezogen auf eine bestimmte Fläche. Es folgt üblicherweise dem metrischen System und wird in (SI) Einheiten

angegeben. Eine häufig verwendete Einheit ist g/m^2 . Für Filtervliesstoffe liegt das Flächengewicht üblicherweise zwischen $10\text{ g}/m^2$ und $900\text{ g}/m^2$. Bei Filtermedien, die aus mehreren Lagen bestehen, können einzelne elektrogesponnene Lagen im Nanogrammbereich pro Quadratmeter liegen [Hut07]. Nassgelegte Glasfasermedien besitzen üblicherweise ein Flächengewicht zwischen $50\text{ g}/m^2$ und $200\text{ g}/m^2$ [Hol22]. Die gebräuchlichen Prüfmethoden sind die ISO 9073 Teil 1:1989 [DIN92], die DIN EN ISO 536 Teil5:2020 [DIN20] und die ANSI/TAPPI T 410 [ANS13].

Die Packungsdichte und die Porosität

Die Packungsdichte, auch Faservolumenanteil genannt, ist der Anteil des festen Materials in einer Volumeneinheit des Filtermediums. Die Begrifflichkeit des Faservolumenanteils ist hier nicht exakt, da ebenfalls das Bindemittel und sonstige Zusatzstoffe in die Packungsdichte und somit in den Faservolumenanteil mit eingehen. Die Porosität ist der Hohlraumanteil in gleichem Volumen des Filtermediums. Der Faservolumenanteil α kann aus dem Flächengewicht G der Dicke t und einer mittleren Dichte ρ_m berechnet werden.

$$\alpha = \frac{G}{t \cdot \rho_m} \quad (2.28)$$

Aus dem Faservolumenanteil folgt die Porosität ε :

$$\varepsilon = 1 - \alpha = 1 - \left(\frac{G}{t \cdot \rho_m} \right) \quad (2.29)$$

Eine pauschale Aussage zur Porosität beziehungsweise zum Faservolumenanteil von Filtermedien ist nicht möglich. Die Porosität von nassgelegten Glasfasermedien liegt in der Regel zwischen 85% und 95% [Hol22; Gai12] und weist eine große Schwankungsbreite über das Vlies auf. Zur Bestimmung der makroskopischen Porositätsschwankungen werden experimentelle bildverarbeitende Analysemethoden untersucht und verwendet [Pen21b]. Auch die Methode mittels Microcomputertomografie steht aktuell im Fokus der Wissenschaft [Pen19b]. Die mittlere Porosität des Vlieses wird über das Gewicht und das Volumen des Vlieses bestimmt.

Die Luftdurchlässigkeit (Permeabilität)

Zum Bestimmen der Luftdurchlässigkeit kommen, je nach verwendeter Norm, zwei verschiedene Methoden zum Einsatz. Entweder wird der Volumenstrom durch eine definierte Fläche bei einem bestimmten Differenzdruck oder der Differenzdruck bei einem vorgegebenen Volumenstrom und einer definierten Fläche gemessen. Die gebräuchlichsten Standards sind die ISO 9237:1995 [DIN95], die

ASTM D 3574 [AST17] und die ANSI/TAPPI T 460 [ANS21]. Die Luftpurchlässigkeitsmessung basiert auf dem Darcy-Gesetz:

$$\dot{V} = -\frac{k}{\mu_g} \cdot \frac{\Delta p}{t} \quad (2.30)$$

Dabei sind \dot{V} der angelegte oder gemessene Volumenstrom, k die materialspezifische Permeabilitätskonstante, μ_g die für jede Messung zu bestimmende Viskosität der Luft, t die Dicke des Filtermediums und Δp der Differenzdruck über das Filtermedium. Die Angabe der Luftpurchlässigkeit erfolgt üblicherweise in $l/m^2 s$ bei $200 Pa$ [Fuc12].

Die Porengrößenverteilung

Zur Porengrößenanalyse von Filtermedien und Membranen hat sich im industriellen Bereich die Kapillarflussporometrie als bewährte Technologie durchgesetzt. Bei diesem Messverfahren wendet man die Kanaltheorie an, die das poröse Material vereinfacht als ein System von kreisförmigen Kanälen betrachtet und die Anwendbarkeit der Gesetzmäßigkeit von Hagen-Poiseuille voraussetzt. Das Analyseverfahren gibt zwei in der Praxis häufig verwendete Kennwert aus:

- Den maximalen Parendurchmesser (Bubble Point Size (BP) oder Blasendruck Test)
- Den mittleren Parendurchmesser (Mean Flow Pore Size (MFP))

Das Messverfahren wird in den Normen ASTM F 316 [AST19] und ISO 4003 beschrieben. Handelsübliche Messgeräte geben einen messbaren Porengrößenbereich von $0,015 \mu m$ bis $500 \mu m$ an [Sch19; Ant22].

Bei dem Bubble Point Test wird das Filtermedium in ein Lösungsmittel (in der Regel Isopropanol) getaucht und abgewartet, bis das Lösungsmittel die poröse Struktur vollständig gesättigt hat. Anschließend wird das Filtermedium, das sich weiterhin unterhalb des Flüssigkeitsspiegels befindet, langsam und von unten mit Druckluft beaufschlagt. Der Druck wird langsam und kontinuierlich oder in definierten Stufen gesteigert. Das Lösungsmittel wird in Abhängigkeit der Porengröße aus dem Material verdrängt. Sobald an der Oberfläche des Filtermediums ein kontinuierlicher Luftaustritt in Form einer Blasensäule zu erkennen ist, wird der Luftdruck nicht weiter erhöht. Aus der anliegenden Druckdifferenz kann über die Gleichung nach Hagen-Poiseuille der kapillarkraftäquivalente Parendurchmesser des Filtermediums bestimmt werden.

$$d_{pore} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{\Delta p} \quad (2.31)$$

Darin ist d_{pore} der Poredurchmesser, σ die Oberflächenspannung des Lösungsmittels, θ der Benetzungswinkel des Fasermaterials und Δp die gemessene Druckdifferenz. Genau genommen wird die Druckdifferenz vor der Berechnung noch um den statischen Druck der Flüssigkeitssäule auf dem Filtermedium, also der Eintauchtiefe des Materials, korrigiert [DIN90; Her96].

Die Kapillarflussporometrie, die erstmals von Erbe [Erb33] vorgeschlagen wurde, basiert auf dem gleichen physikalischen Prinzip wie die Bestimmung des Bubble Points. Eine kleine Probe des Filtermaterials wird vollständig mit einer benetzenden Flüssigkeit gesättigt. Anschließend wird mit einem meist gasförmigen Medium, das auf der Unterseite des Filtermaterials anliegt, mit langsam steigendem Druck die Flüssigkeit aus dem Filtermaterial verdrängt. Das Verwenden einer weiteren Flüssigkeit als Verdrängungsfluid ist ebenfalls möglich, jedoch eher unüblich [Mor08]. Der erste Durchbruch des Gases ist der bereits beschriebene Bubble Point. Nach Erreichen dieses Punktes wird der Differenzdruck über das Filtermedium weiter erhöht. Damit verbunden steigt auch der Volumenstrom durch das Filtermedium, welcher wiederum gemessen wird. Aus dem Differenzdruck und dem Volumenstrom kann sukzessiv die Porengrößenverteilung abgeleitet werden [Kol18]. Zum Bestimmen der MFP wird eine weitere Messung mit demselben Material durchgeführt, bei der der Volumenstrom über die Druckdifferenz gemessen wird. Der MFP ist die kapillarkraftäquivalente Porengröße bei dem Differenzdruck, bei dem der Durchfluss durch ein benetztes Medium 50% des Durchflusses durch das trockene Medium beträgt. Bei dieser Kennzahl handelt es sich trotz widersprüchlicher Namensgebung nicht um die mittlere Porengröße im Filtermedium. Der Durchfluss durch Poren mit großem Durchmesser ist in der Regel überproportional größer als der Durchfluss im kleinen Porengrößenbereich [Lif05; Hut07].

Neben den beiden genannten und industriell gebräuchlichen Verfahren gibt es eine Vielzahl weiterer Methoden, die zur Bestimmung der Porengröße oder der Porenstruktur zum Einsatz kommen. Insbesondere in der Forschung und Entwicklung oder bei bestimmten Sonderanwendungen werden alternative Verfahren angewandt. So können beispielsweise bei flachen elektrogesponnenen Filtermedien die Poren mit bildgebenden Methoden ausgewertet werden [Hut07]. Weitere nicht so gebräuchliche Methoden sind bestimmte Sonderformen der Porosimetrie, die mit flüssig-flüssig Systemen oder einer nicht benetzenden Flüssigkeit arbeiten. Auch die BET-Messung nach Brunauer, Edward und Teller [Bru38] kann unter bestimmten Voraussetzungen zur Charakterisierung von Filtermedien eingesetzt werden. Dabei wird ein Gas, in der Regel Stickstoff, an der Oberfläche eines Substrats, also dem porösen Medium, adsorbiert. Die adsorbierte Menge des Gases gibt Aufschluss über die Größe der Porenoberfläche. In der Forschung gibt es seit einigen Jahren den Trend, bestimmte Filtermedien mit der Micro-Computertomographie (CT) zu analysieren und zu charakterisieren [Thé17]. Der einschränkende Faktor bei dieser Methode ist die Auflösung. Eine sinnvolle Auflösung bis in den

Submikronbereich ist nach dem heutigen Stand der Technik kaum möglich [Rit11].

2.3.2 Methoden zur Bestimmung der Filtrationseffizienz und des Druckverlusts

Auch bei der Bestimmung der Filtereffizienz und den daraus gewonnenen Kennwerten verhält es sich wie bei der Material- und Strukturcharakterisierung. Es existieren eine große Anzahl an Testverfahren sowie nationale und internationale Richtlinien zur Durchführung. Man unterscheidet im Wesentlichen den „Single pass Test“ und den „Multi pass Test“. Beide Testmethoden können sowohl in der flüssigen Phase als auch in der Gasphase durchgeführt werden. Der Druckverlust über den Filter oder das Filtermedium wird üblicherweise in den Testständen zusammen mit dem Effizienztest durchgeführt.

Der Single pass Effizienz Test (SPE)

Bei dem SPE-Test durchläuft das verunreinigte Testfluid den Filter oder das Filtervlies einmal und wird anschließend mit einem Absolutfilter gereinigt, bevor es die Teststrecke verlässt. Je nach Aufbau, Normung und Phase des Testfluid wird es nach dem Durchströmen des Absolutfilters in das Vorratsreservoir zurückgeführt, in einem separaten Sammelbehälter gespeichert oder in die Umwelt entlassen. Der Test der Filtereffizienz wird üblicherweise mittels Partikelzähler vor und hinter dem Testfilter durchgeführt. Manche Standards definieren alternativ oder ergänzend ein gravimetrisches Verfahren zur Effizienzbestimmung. Dabei wird dem Testfluid eine bekannte Menge an Verunreinigung zugegeben, mit dem der Filter während des Versuchs beaufschlagt wird. Vor und nach dem Test findet eine Gewichtsbestimmung von Testfilter und Absolutfilter statt, aus deren Differenz wiederum der Gesamtabscheidegrad berechnet werden kann. Alternativ kann eine Konzentrationsbestimmung in definierten Zeitintervallen vor und hinter dem Filter erfolgen. Bei diesem Versuchsaufbau ist es üblich, den Abscheidegrad η als Kennwert zu verwenden:

$$\eta = \frac{c_{roh} - c_{rein}}{c_{roh}} \quad (2.32)$$

Dabei ist c_{roh} die Konzentration auf der Anströmseite und c_{rein} die Konzentration auf der Abströmseite des Testfilters. Üblich ist die Bestimmung der Massenkonzentration, was jedoch nicht in allen Standards zwingend vorgegeben ist. Ist das Testfluid gasförmig, wird häufig der Fraktionsabscheidegrad in dem Partikelgrößenbereich angegeben, in dem die meisten Partikeln durch das Filtermedium durchdringen. Diese Partikelgröße wird als „most penetrating particle size“ (MPPS) bezeichnet. Die Druckdifferenz wird über Druckaufnehmer vor und hinter

dem Filter bestimmt. Üblicherweise wird zusätzlich die Schmutzspeicherkapazität in Relation zur Druckdifferenz ermittelt. Beispiele für den SPE-Test sind in der DIN EN ISO 16890:2017 [DIN17] und der ISO 12500:2007 [ISO07] beschrieben.

Der Multi pass Effizienz Test (MPE)

Bei dem MPE-Test wird, im Gegensatz zum SPE-Test, das Fluid nach Durchströmen des Testfilters wieder zurück in den Testkreislauf gebracht. Zusätzlich wird kontinuierlich über den gesamten Testverlauf neuer Teststaub in das System gegeben. Das bedeutet, dass zusätzlich zu den kontinuierlich zudosierten Partikeln auch die durch den Filter durchgedrungenen Partikeln für den folgenden Durchlauf durch den Filter wieder zur Verfügung stehen. Bei diesem Testaufbau wird die Effizienz über Partikelzähler vor und hinter dem Testfilter ermittelt und in definierten Zeitabschnitten zusammengefasst. Die Effizienz des Filters wird üblicherweise als Beta-Wert β angegeben. Dieser Wert spiegelt das Verhältnis der Anzahl an Partikeln einer Größenklasse $N_{d,0}$ vor dem Filter zu der Anzahl an Partikeln derselben Größenklasse $N_{d,1}$ hinter dem Filter über einen bestimmten Testzeitraum des Versuchs wider:

$$\beta = \frac{N_{d,0}}{N_{d,1}} \quad (2.33)$$

Die Druckdifferenz wird über Drucksensoren ermittelt und dient als Abbruchkriterium für den Test. Mit Abbruchkriterium ist hier der Punkt gemeint, an dem der Test beendet wird. Die Testprozedur wird unter anderen in der ISO 16889:2008 [ISO08] und der ISO 4572:1981 [ISO81] im Detail beschrieben. Der Test stammt aus der Flüssigkeitsfiltration und zielt darauf ab, kuchenbildende Filter zu begutachten und zu beurteilen [Ver04].

3 Aufbau und Funktionsweise der experimentellen Versuchsstände

Zur schnellen und kostengünstigen Untersuchung von Koaleszenzfiltermedien auf ihr Verhalten im Filtrationsprozess wurde ein Filterscheibenversuchsstand konzipiert, konstruiert und gefertigt. Der Aufbau wird in Abschnitt 3.1 vorgestellt und ermöglicht es, das jeweilig verwendete Filtermedium vor und nach dem Filtrationsprozess zu untersuchen und die individuelle Filtrationseffizienz zu charakterisieren. Die experimentellen Aufbauten zur Untersuchung der Filtermedien sind in Abschnitt 3.2 dargestellt.

3.1 Filterversuchsstand

Mit dem entwickelten Filterversuchsstand können bei Umgebungstemperatur die folgenden Charakteristika ermittelt werden:

- Druckverlust der Filtermedien über den gesamten Zeitraum des Filtrationsprozesses
- Trenngrad der Filtermedien über den gesamten Zeitraum des Filtrationsprozesses
- Trenngrad der Lagenaufbauten und Einfluss von Stützstrukturen
- Sättigungsverhalten der Filtermedien

Der Aufbau der Anlage ist in mehrere Unterabschnitte gegliedert, welche das Konzept und die Funktion der einzelnen Kernkomponenten beschreiben, sowie einen Abschnitt (Abschnitt 3.1.1), der auf den gesamten Anlagenaufbau und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten eingeht.

3.1.1 Gesamtaufbau der Versuchsanlage

Mit dem schematischen Fließbild des Filterversuchsstands (Abbildung 3.1) wird im Folgenden die Funktionsweise erläutert. Der Zerstäuber arbeitet nach dem Zweistoffdüsen-Prinzip und benötigt Druckluft zum Erzeugen des Tröpfchen-Aerosols. Das Tröpfchen-Aerosol strömt weiter in die Mischkammer, wo zur Einstellung der Konzentration und zur besseren Durchmischung des Nebels partikelfreie Druckluft zugegeben werden kann. Anschließend durchströmt das Aerosol die Filterkammer, in der sich der Testfilter befindet. Das Reingas durchströmt

abschließend einen nachgeschalteten Absolutfilter, um letzte gasgetragene Partikel abzuscheiden, bevor das Gas die Anlage verlässt. Der Aufbau der Anlage ist also als SPE Test ausgelegt. Vor und hinter dem Testfilter befinden sich jeweils ein Druckaufnehmer und eine Probenahmestelle, mit denen zum einen der Differenzdruck aufgezeichnet werden und zum anderen die Tröpfchengrößeverteilung vor und hinter dem Filter bestimmt werden kann.

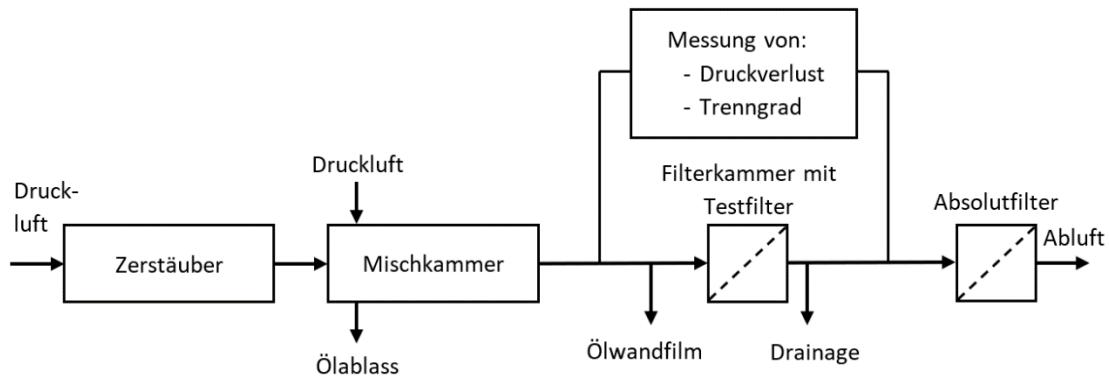


Abbildung 3.1: Schematisches Fließbild des Filterversuchsstands

Abbildung 3.2 zeigt die technische Umsetzung des Aufbaus mit allen Ein- und Auslassanschlüssen. Ein Bild der Versuchsanlage im Labor ist Abbildung 3.3 gezeigt.

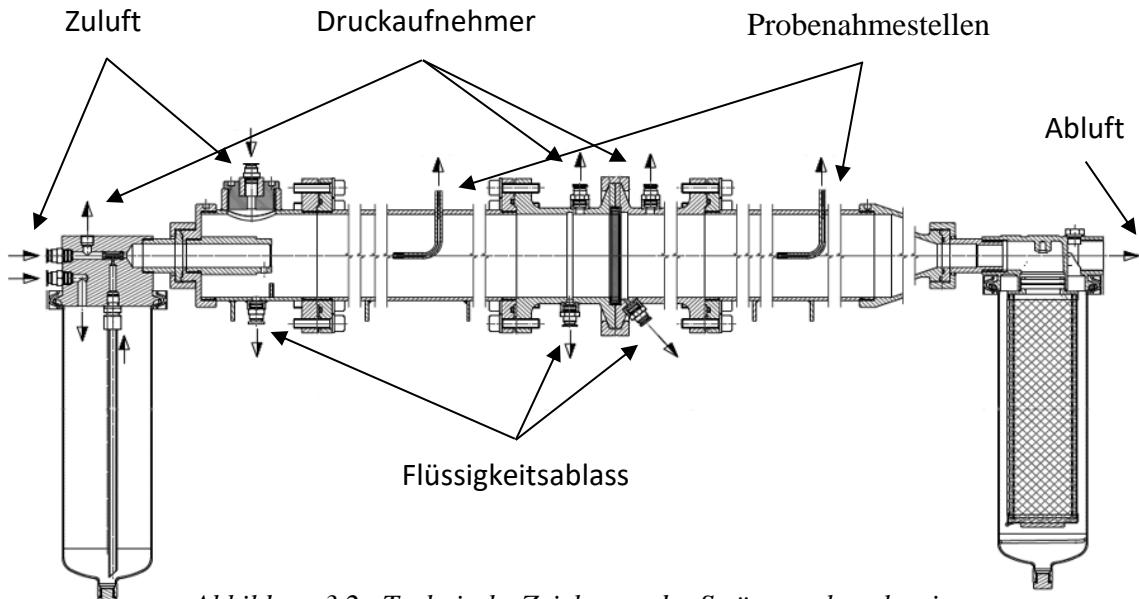


Abbildung 3.2: Technische Zeichnung des Strömungskanals mit Zerstäuber, Filterhalterung, Absolutfilter und Beschriftung aller Ein- und Ausgangsanschlüsse

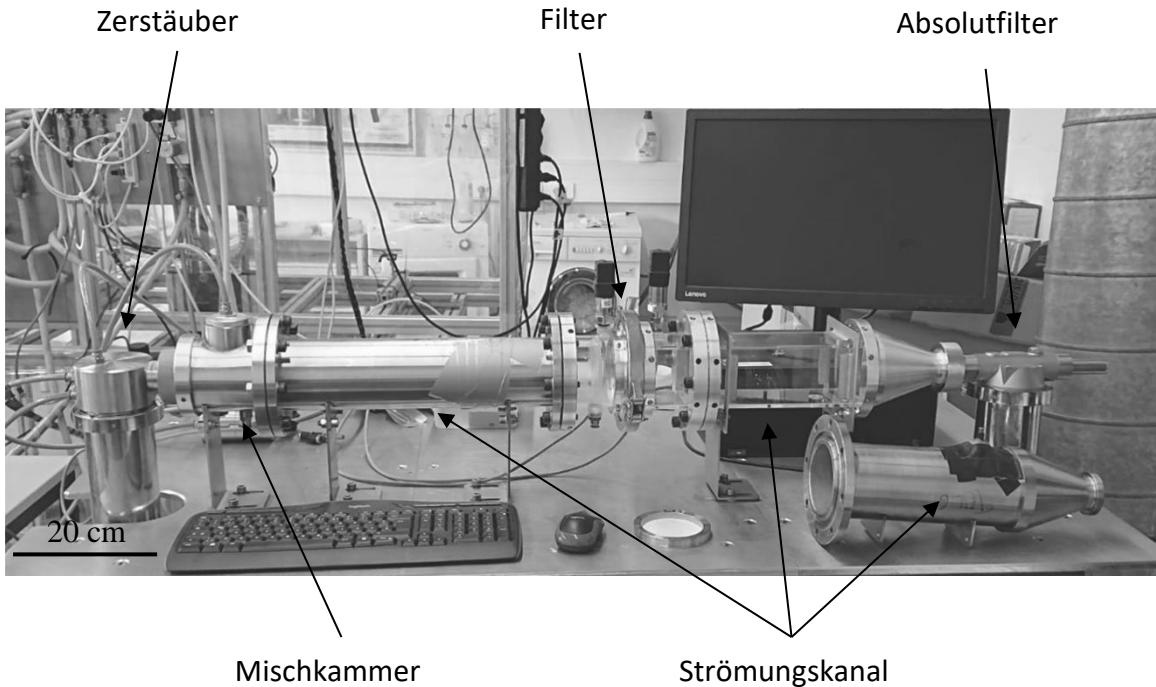


Abbildung 3.3: Bild des Versuchsstands im Labor

3.1.2 Tröpfchen-Aerosol-Erzeugung

Die Erzeugung von Tröpfchen-Aerosol kann auf Kondensation oder Dispersion basieren. Das Dispersionsverfahren kann wiederum in das Rotationsverfahren und das Zerstäubungsverfahren eingeteilt werden [Ker75]. Zwei weitere Möglichkeiten der Unterteilung sind zum einen in thermische und mechanische Tropfen erzeugungsverfahren, sowie in Bottom-up und Top-down Verfahren [Woz03; Nag06]. Im Folgenden wird auf die erstgenannte Einteilungsmethodik zurückgegriffen und die drei Verfahren werden vorgestellt.

Tröpfchen-Aerosol-Erzeugung auf Basis von Kondensation

Bei der Aerosol Erzeugung mittels Kondensation kann bei allen relevanten Gerätebauformen ein weitgehend monodisperses Aerosol erzeugt werden. Dafür ist immer eine homogene Keimbildung notwendig, die sehr aufwendig zu realisieren seien kann. Die bekanntesten technischen Bauformen sind der Funken-Aerosolgenerator, der Aerosolgenerator nach Scheibel und Porstendorfer, der Sinclair-LaMer-Aerosolgenerotor und der Aerosolgenerator nach Rapaport und Weinstock [Ver16]. Sowohl der Sinclair-LaMer-Aerosolgenerotor als auch der Aerosolgenerator nach Rapaport und Weinstock bieten die Möglichkeit, ein Öltröpfchen-Aerosol, also einen Ölnebel bei Umgebungsbedingungen, zu erzeugen [Kam14a; Ver16]. Bei dem Prinzip nach Sinclair-LaMer werden zuerst Kondensationskeime erzeugt und anschließend in einem heterogenen Kondensationsprozess

aufkondensiert [Sin49; Mui67]. Bei dem Prinzip nach Rapaport und Weinstock wird eine Flüssigkeit in einer Zweistoffdüse dispergiert. Dabei entsteht ein polydisperse Aerosol, welches anschließend weitgehend verdampft wird. Die übrigbleibenden Tropfen werden im folgenden Prozessschritt wieder aufkondensiert [Rap55]. Weitere Sonderformen der Aerosolerzeugung, basierend auf Kondensation, sind das Partikelwachssystem [Reb92] und der Fallfilmgenerator [Nic70].

Tröpfchen-Aerosol-Erzeugung auf Basis von Rotation (Dispersionsverfahren)

Bei den Rotationszerstäubern wird die zu zerstäubende Flüssigkeit auf der Rotationsachse eines rotierenden Bauteils (Scheibe, Teller, Bechersprühgerät, etc.) aufgebracht. Durch die Zentrifugalbeschleunigung nach außen bildet sich eine gleichmäßige Benetzung auf der Rotationsoberfläche [Hew93]. Am Rand der Rotationsscheibe, also der Tropfen-Abrisskante, bildet sich, je nach Bauform und Betriebsweise des Zerstäubers, ein monodisperses [Wal49] oder polydisperses [Ryl59; Hew92] Tröpfchen-Aerosol. Mit diesem Verfahren lassen sich Tropfen in einem vergleichsweise großen Tropfengrößenbereich ($x > 10 \mu\text{m}$) erzeugen.

Tröpfchen-Aerosol-Erzeugung auf Basis von Zerstäubung (Dispersionsverfahren)

Die Zerstäuber hingegen erzeugen eine breite Partikelgrößenverteilung und generieren damit in allen für die Tröpfchen-Aerosol-Filtration relevanten Partikelgrößenklassen genügend Partikeln, um eine gute Statistik für die Trenngradberechnung zu erhalten [Wal80; Woz03]. Außerdem bietet sich eine breite Verteilung zur Charakterisierung von Filtern und Filtermedien an, um die Abscheideeffizienz über den relevanten Partikelgrößenbereich zu bestimmen. Hinzu kommt, dass die Partikelgrößenverteilung der von Kompressoren sehr ähnlich ist [Kam14a]. Auch die schlichte Bauweise und die einfache Bedienung [Mer68] der pneumatischen Zerstäuber, auch Zweistoffdüsen genannt, sind Argumente, die für den Einsatz dieser Bauform sprechen. Der in dieser Arbeit verwendete Druckluftzerstäuber (Abbildung 3.4) besteht aus einer speziell entwickelten Zweistoffdüse (Abbildung 3.4 (Detailansicht)), die nach dem Collison-Prinzip [May73] arbeitet, und einem Drucktank mit vorgeschalteter Druckregelung, um die Flüssigkeitszufuhr in die Zweistoffdüse und damit die Aerosolkonzentration c präzise zu steuern.

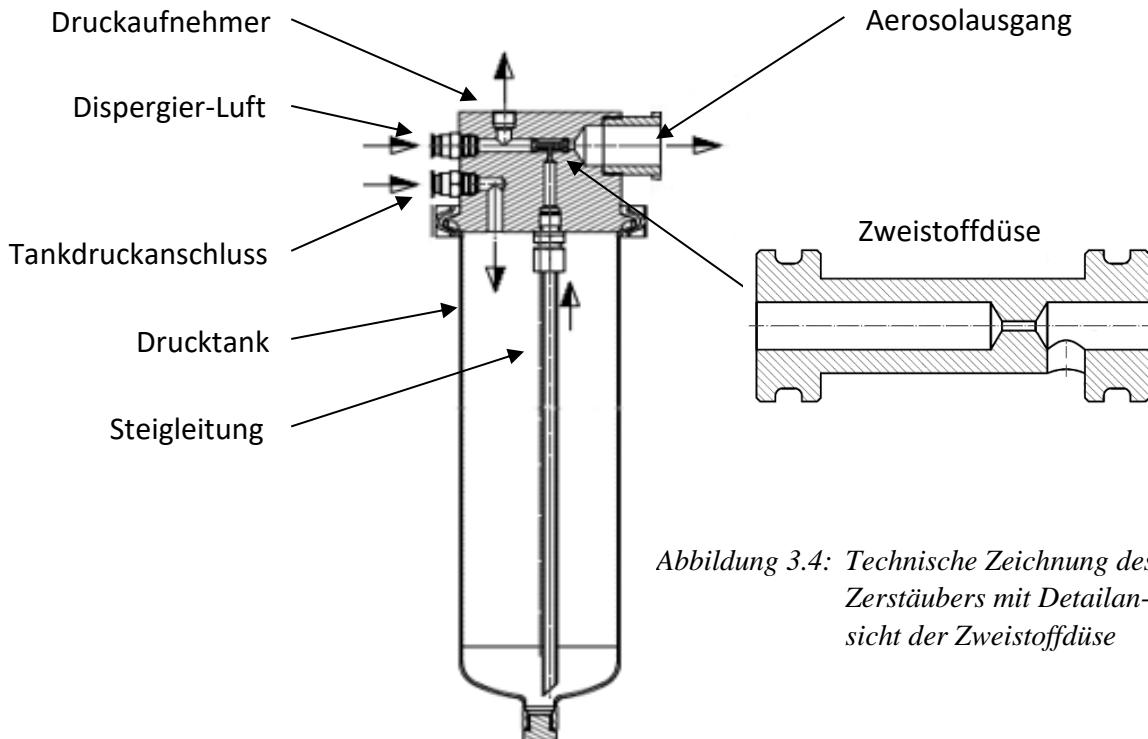


Abbildung 3.4: Technische Zeichnung des Zerstäubers mit Detailansicht der Zweistoffdüse

Der Zerstäuber wird mit partikelfreier Druckluft betrieben, welche durch die Zweistoffdüse strömt. Hinter der Querschnittsverengung entspannt sich die Druckluft und beschleunigt. Durch den dabei entstehenden Unterdruck (Bernoulli-Effekt) [Bös14] wird die zu dispergierende Flüssigkeit die Steigleitung hochgesogen. Zusätzlich kann ein Überdruck über den Tankdruckanschluss im Drucktank erzeugt werden, über den der Flüssigkeitsvolumenstrom gesteuert werden kann. Diese Modifikation sollte in Kombination mit einer einstellbaren Steigrohrverengung einen stabileren Betrieb des Zerstäubers ermöglichen. Da die Einstellung der Parameter zum Zudosieren der Flüssigkeit aus dem Drucktank jedoch sehr aufwändig war, wurde der Drucktank in Vorversuchen mit dem Testaufbau durch eine Spritzenpumpe ersetzt, womit eine stabilere Tröpfchenkonzentration im Trägergas erzeugt werden konnte. Direkt vor der Einbauposition der Düse befindet sich ein Anschluss für einen Druckaufnehmer, durch den der Differenzdruck über die Düse bestimmt werden kann. In der Zweistoffdüse wird die zudosierte Flüssigkeit in Folge der Kelvin-Helmholz-Instabilität [Hel68] in ein feindisperses Tröpfchen-Aerosol dispergiert. Die Kelvin-Helmholz-Instabilität beschreibt den Strahlzerfall durch das Wachstum instabiler Oberflächenwellen [Rei82; Wu86; Car09; Bat12]. Das so erzeugte Tröpfchen-Aerosol verlässt den Zerstäuber am Aerosolausgang und strömt in Richtung der Mischkammer.

Die vom Zerstäuber typischerweise erzeugte Partikelgrößenverteilung (Abbildung 3.5) ähnelt einer logarithmischen Normalverteilung, welche zur Beschreibung von Tröpfchen-Aerosolen häufig Verwendung findet [Kam14a]. Dabei gibt es jedoch Abweichungen im Partikelgrößenbereich ab mehreren Mikrometern.

Weitere Verteilungen die, häufig herangezogen werden, sind die RRSB-Verteilung (Rosin, Rammler, Sperling, Bennett) [Ros33; Ves80; Kiz18] und die Troesch-Verteilung [Tro54]. Die Rosin-Rammler-Verteilung ist eine empirische Verteilung, die in der Regel zur Darstellung von Stäuben Anwendung findet [Mug51]. Die Troesch-Verteilung hingegen wird durch dimensionsanalytische und statistische Überlegungen hergeleitet und basiert auf den physikalischen Grundlagen des Strahlzerfalls [Web31; Ray79; Ohn36].

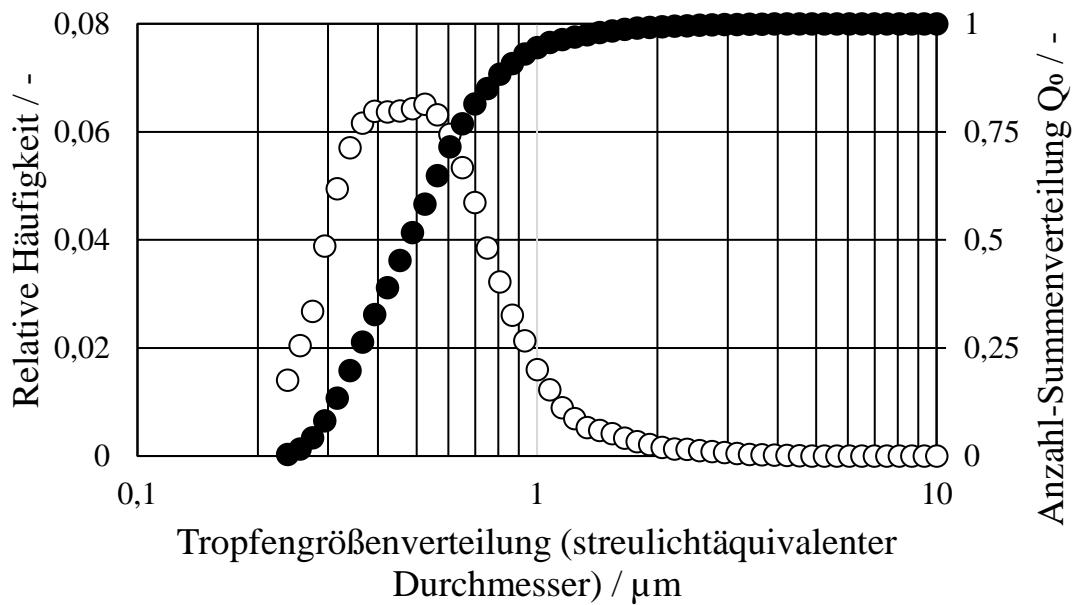


Abbildung 3.5: Typische Verteilung der relativen Häufigkeit und der Anzahl-Summenverteilung des Zerstäubers

Zur Charakterisierung des Zerstäubers wurden Versuche durchgeführt, bei denen der Volumenstrom und damit die resultierende Druckdifferenz über der Zweistoffdüse variiert wurde. Darüber hinaus wurde der Druck im Flüssigkeitstank variiert. Die Ergebnisse beider Studien sind in Abbildung 3.6 und Abbildung 3.5 gezeigt. Mit dem Differenzdruck über der Düse korreliert die Strömungsgeschwindigkeit in der Düse und damit wiederum die Tropfengrößeverteilung, hier dargestellt durch den Medianwert. Es findet mit steigendem Differenzdruck eine Verschiebung der Verteilung hin zum kleineren Tropfengrößenbereich statt. Ursächlich dafür sind die höheren Scherkräfte in der Düse. Aus der Bernoulli-Gleichung geht hervor, dass die erzeugte Tröpfchenkonzentration mit dem Differenzdruck über den Zerstäuber in Beziehung steht. Mit zunehmender Druckdifferenz steigt der Unterdruck hinter der Engstelle und damit auch der Volumenstrom im Steigrohr. Bei der gewählten Bauform mit Drucktank spielt dieser Effekt jedoch nur eine untergeordnete Rolle.

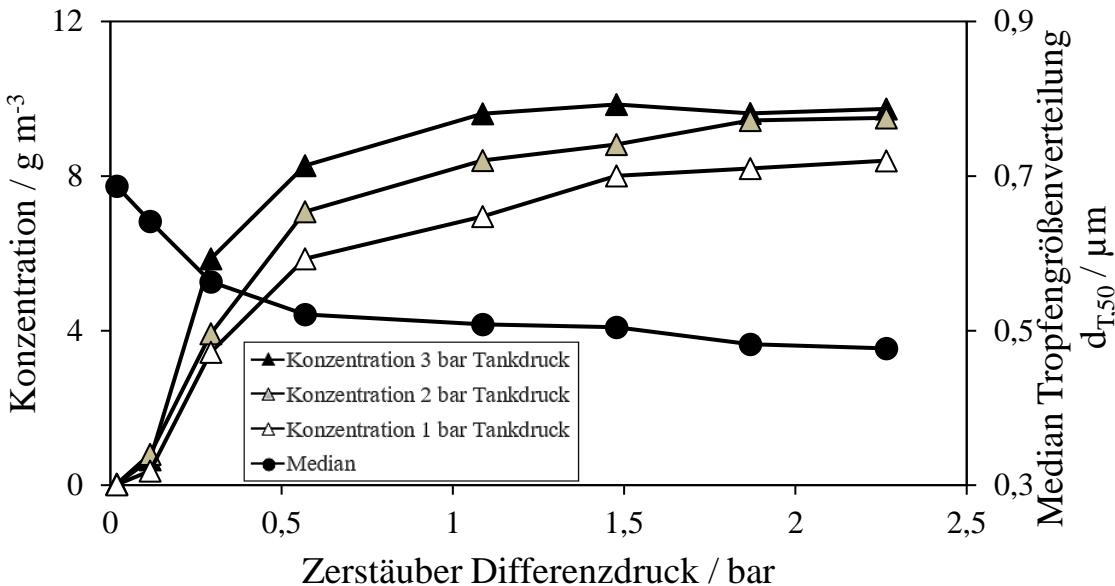


Abbildung 3.6: Median der Tropfengrößenverteilung des Zerstäubers und erzeugte Konzentration bei variierenden Druckniveaus im Flüssigkeitstank

Bei einer Erhöhung des Druckniveaus im Drucktank steigt der Volumenstrom in der Steigleitung des Zerstäubers ebenfalls an. Die für die Zerstäubung zur Verfügung stehende Flüssigkeit hinter der Düse nimmt zu. Damit steigt auch die Aerosolkonzentration an, bis zu einem kritischen Tankdruck, der bei über 3 bar ermittelt wurde, bei dem die Düse mit Flüssigkeit geflutet wird und kein sinnvoller Betrieb mehr gewährleistet ist. Im niedrigen Differenzdruckbereich ist die Partikelkonzentration relativ gering, und der Tankdruck hat nur einen geringen Einfluss. Es wird nur ein geringer Teil der zur Verfügung stehenden Flüssigkeit zerstäubt. Der überwiegende Teil wird als Flüssigkeitswandfilm (Abschnitt 3.1.3) in den Strömungskanal transportiert.

3.1.3 Mischkammer und Strömungskanal

Die Mischkammer erfüllt neben dem namensgebenden Zweck der Vermischung die Aufgabe, größere gasgetragene Tröpfchen des Zerstäubers abzuscheiden und den Flüssigkeitswandfilm im Strömungskanal zu verringern. Bei dem Flüssigkeitswandfilm handelt es sich um nicht dispergierte Flüssigkeit aus der Zweistoffdüse und Tröpfchen-Aerosol, das sich im Strömungskanal und der Mischkammer abgesetzt hat. Dieses wird durch die Scherkräfte der Strömung an den Innenwänden des Strömungskanals in Strömungsrichtung transportiert. Der Strömungskanal hat neben der Strömungsführung den Zweck, die Strömung zu beruhigen, bevor sie die Testfilterscheibe erreicht.

Mischkammer

Der Strömungskanal mit den Probenahmestellen, die Mischkammer (Detailansicht) sowie die Filterhalterung mit einer Filterscheibe (Abschnitt 3.1.4) sind in Abbildung 3.7 gezeigt. Die Mischkammer ist direkt mit dem Zerstäuber über ein Einlassrohr verbunden. Die Achse des Einlassrohres bildet mit der Achse des Strömungskanals eine Linie. Am hinteren Ende des Einlassrohres befinden sich ein Steg und ein Ablauf an der Unterseite, an dem bereits sedimentierte, größere Tropfen abfließen können. Zusätzlich ist es möglich, am Ausgang des Einlassrohres eine Impaktorplatte zu installieren. Die so abgeschiedene Flüssigkeit sammelt sich am Boden der Mischkammer an, wo sich ein Ablauf befindet. Der Ablauf führt zu einem Vorratsgefäß, in dem die abgeschiedenen Tropfen gesammelt werden.

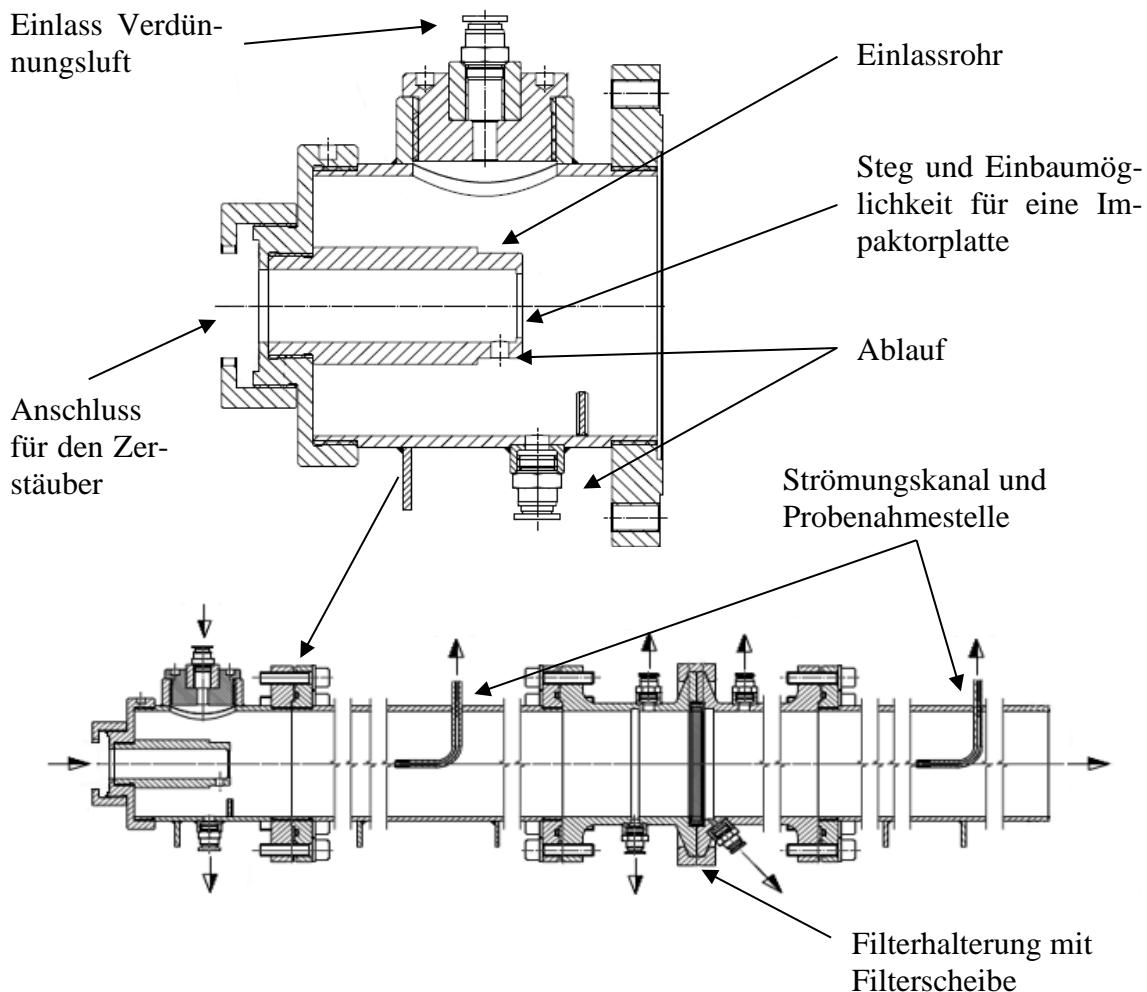


Abbildung 3.7: Technische Zeichnung des Strömungskanals mit der Filterhalterung und Detailansicht der Mischkammer

Die im Gasstrom verbleibenden feineren Tropfen verlassen das Einlassrohr und werden in der Mischkammer mit partikelfreier Druckluft vermischt. Der Einlass für diese Verdünnungsluft befindet sich an der Oberseite der Mischkammer senkrecht zur Achse des Einlassrohres und des Strömungskanals. Die Bauweise ermöglicht eine effektive Vermischung des Tröpfchen-Aerosols mit partikelfreier Druckluft und führt zu einer homogenen Konzentration im Test-Aerosol.

Strömungskanal

Der Strömungskanal bildet das Verbindungsstück zwischen Mischkammer und Filterhalterung auf der Anströmseite des Filters und zwischen Filterkammer und dem Absolutfilter auf der Abströmseite (Abbildung 3.7). Für den Innendurchmesser d_i des Kanals wurden 89 mm gewählt, was dem Innendurchmesser der Filterhalterung und der Filterscheibe entspricht (Abschnitt 3.1.4). Durch die Wahl des identischen Durchmessers ist es nicht notwendig, eine Verjüngung der Rohrleitung zu installieren, was wiederum Turbulenzen vor der Filterscheibe verhindert [Pol40; ISO07]. Die Positionen zur isokinetischen Probenahme befinden sich vor und hinter der Filterscheibe und sind in einem solchen Abstand gewählt, dass die Strömung eine möglichst geringe Turbulenz aufweist. Um eine repräsentative Probenahme zu gewährleisten, sollte der Mindestabstand zur letzten vorgelagerten Störstelle mindestens drei Mal den hydraulischen Durchmesser d_h des Strömungskanals betragen [Deu08; VDI19]. Der hier gewählte Abstand vor der letzten vorgelagerten Störstelle bis zur Probenahmestelle vor der Filterscheibe beträgt $3,6 \times d_h$, der Abstand von der Filterscheibe bis zur hinteren Probenahmestell, beträgt $3,4 \times d_h$. Bevor das Testaerosol die Anlage verlässt, werden letzte gasgetragene Partikeln hinter der reingasseitigen Probenahmestelle durch einen Absolutfilter (U16) [DIN19a] abgeschieden. Sowohl die Mischkammer als auch der Strömungskanal bestehen aus Chrom-Nickel-Stahl (1.4301). Zusätzlich wurde ein zweiter abströmseitiger Teil des Strömungskanals aus Acrylglass gefertigt und kann zur optischen Beobachtung der Phänomene hinter dem Filter gewechselt werden (vgl. Abbildung 3.3). Das aus Acrylglass bestehende Teil besitzt eine quadratische Abmessung mit demselben Querschnitt wie das Chrom-Nickel-Stahl-Bauteil.

3.1.4 Filterhalterung und Filterscheibe

Zur Positionierung der Testfilter in Strömungskanälen zwecks Charakterisierung gibt es viele verschiedene Konzepte [Kam14a; ISO07]. Alle Installationsarten zielen darauf ab, die Einflüsse von unerwünschten Strömungseffekten, sowohl der Gasphase als auch der koaleszierten Flüssigphase im Filtermedium, so gering wie möglich zu halten. Ziel ist es, die sich überlagernden Effekte im Filtrationsprozess separat betrachten zu können und eine gute Reproduzierbarkeit von Experimenten zu gewährleisten. In den folgenden beiden Abschnitten wird die konstruktive Umsetzung der Filterhalterung und der Filterscheibe beschrieben.

Filterhalterung

Die Filterhalterung ist in Abbildung 3.8 dargestellt und besteht aus drei Teilen, einem anströmseitigen Teil, einem abströmseitigen Teil und einer TC-Überwurfkammer (Position 3). Die Filterhalterung und die Filterscheibe besitzen einen runden Querschnitt mit einem Innendurchmesser von $d_i = 89$ mm. Die Filterscheibe (Abbildung 3.9) wird zwischen dem an- und abströmseitigen Bauteil positioniert. Infolge der konischen Innengeometrie der Klammer und der ebenfalls konischen Geometrie der Verbindungsflansche der An- und Abströmseite wird die Filterscheibe auf der entsprechenden Position in die dafür vorgesehenen Passungen gepresst. An den stirnseitigen Kontaktstellen der Filterhalterungshälften mit der Filterscheibe befindet sich jeweils eine PTFE-Flachringdichtung, um Bypass-Strömungen und ein Eindringen von Flüssigkeit zwischen Filterscheibe und Filterhalterung zu verhindern. An den beiden oberhalb gelegenen Anschlüssen sind Druckaufnehmer zum Aufzeichnen des Differenzdrucks angebracht.

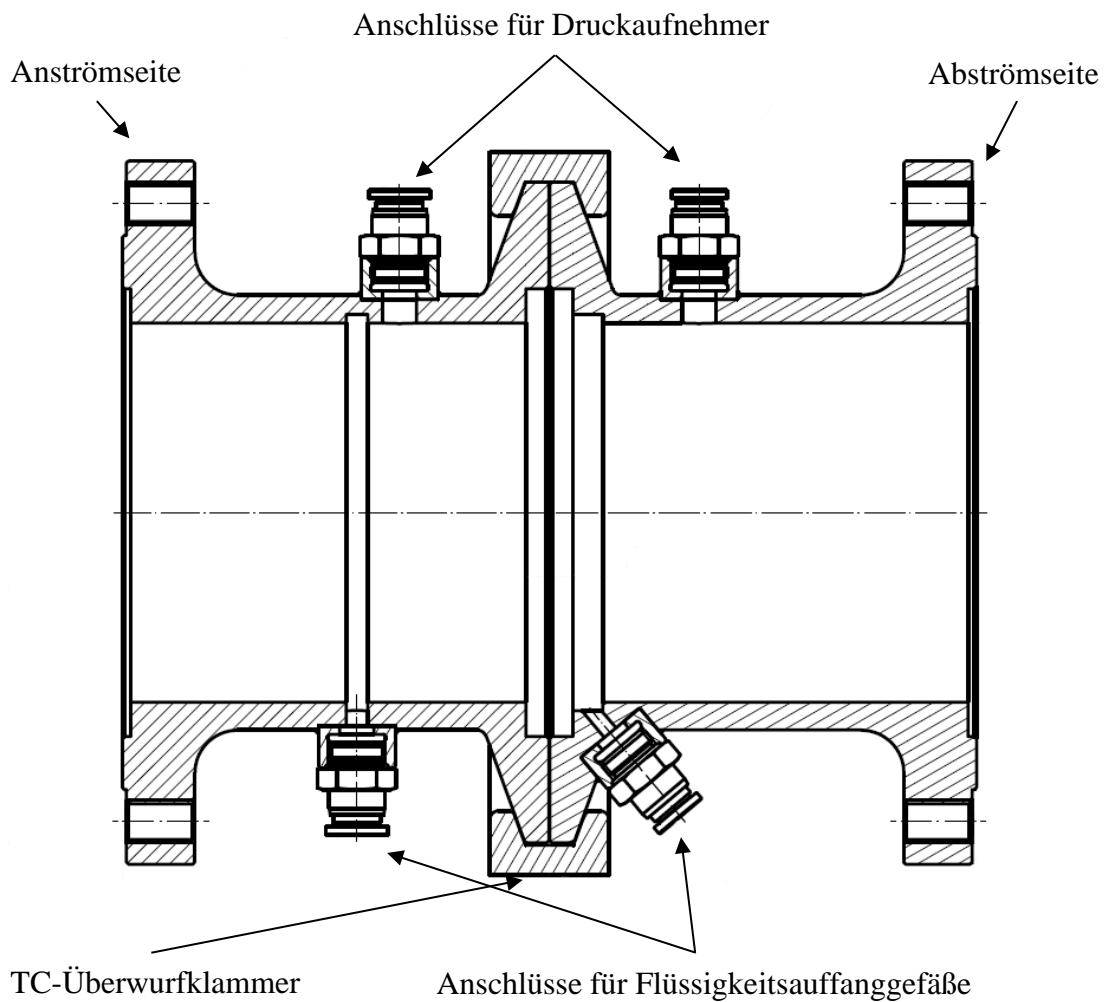


Abbildung 3.8: Technische Zeichnung der Filterkammer mit Überwurfkammer

Am unten gelegenen Anschluss auf der Abströmseite befindet sich ein Auffanggefäß für die Drainageflüssigkeit. An dem zweiten unteren Anschluss, anströmseitig zur Filterscheibe, befindet sich ebenfalls ein Abfluss, der zu einem Auffanggefäß führt. Darin wird die Flüssigkeit des abgeschiedenen Flüssigkeitswandfilms gesammelt. Die Nut, die sich im Umfang der anströmseitigen Filterhalterungshälfte befindet, ist eine Falle für den Flüssigkeitswandfilm. Wenn dieser bis an die Filterscheibe gelangt, wird er bei benetzbarem Material in Folge der Kapillarkräfte in das Filtermedium gesaugt. Daraus resultiert eine Verfälschung der Messwerte von Druckverlust, Trenngrad und Sättigung. Der Flüssigkeitswandfilm sammelt sich in der Nut und fließt von dort, der Schwerkraft und dem Umfang des Strömungskanals folgend, in den Filterumpf [ISO07]. Die Filterhalterung ist ebenso wie der Strömungskanal in doppelter Ausführung angefertigt worden und besteht einmal aus Chrom-Nickel-Stahl (1.4301) und einmal aus Acrylglas. Auf der Abströmseite besitzt das Acrylglasteil, ebenso wie der oben beschriebene Strömungskanal aus Acrylglas, einen quadratischen Querschnitt mit identischer Fläche.

Filterscheiben

Die Filterscheiben besteht aus zwei Hälften die ineinander gesteckt werden (Abbildung 2.1). Die Filterlagen werden zwischen die beiden Hälften gelegt und mit Epoxidharz verklebt.

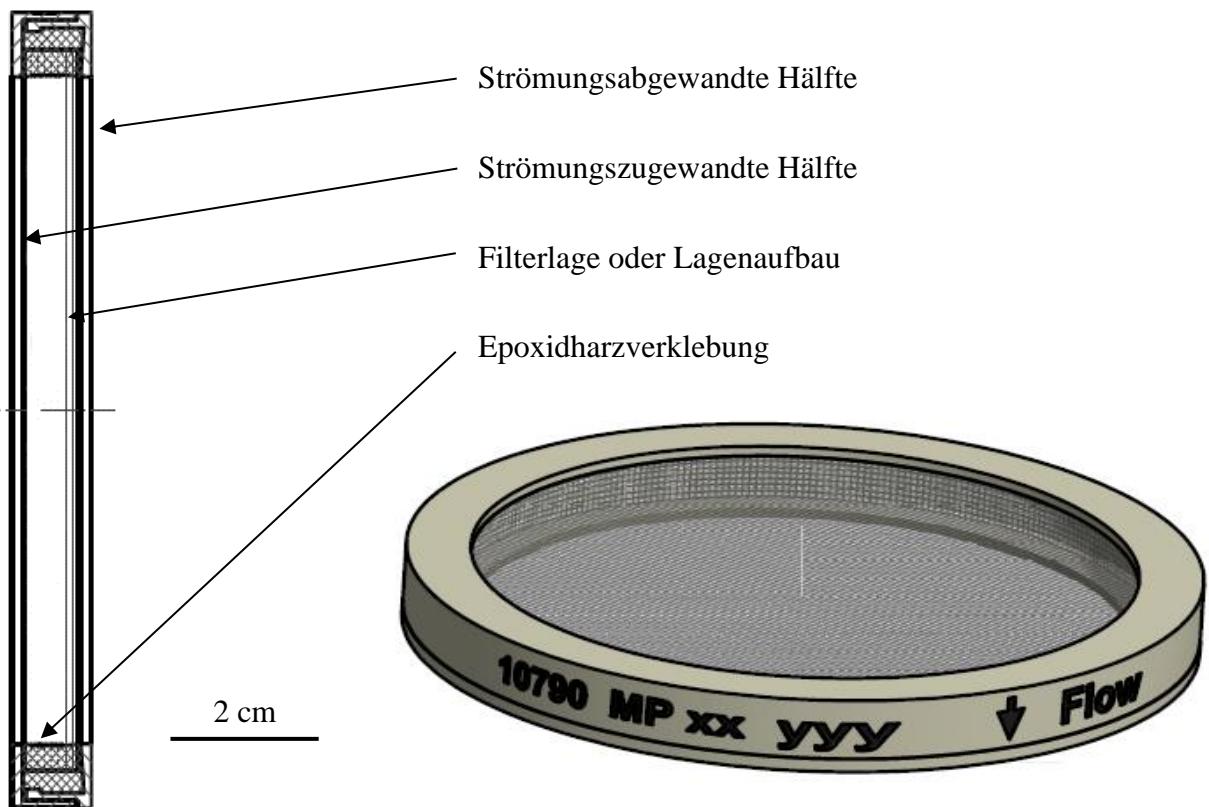


Abbildung 3.9: Technische Zeichnung der Filterscheibe

Zusätzlich kann eine Stützstruktur, beispielsweise ein Lochblech oder Quadratmaschengewebe, auf der strömungsabgewandten Seite mit verklebt werden. Solche Stützstrukturen sind bei handelsüblichen Filterelementen die letzte Lage im Filterlagenaufbau und dienen als Stützgeometrie für das Filtermaterial. Ohne diese Stützstrukturen würde das Filtermaterial infolge des Druckunterschieds zwischen An- und Abströmseite reißen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Diese Bauform ermöglicht es, sowohl unterschiedliche Stützstrukturen als auch verschiedene Filtermedien zu untersuchen. Darüber hinaus können kaschierte und unkaschierte Filtermaterialien und verschiedene Lagenaufbauten, also verschiedene Filtermedien hintereinander, untersucht werden. Das Testfilter hat nach dem Verkleben denselben Innendurchmesser wie der Strömungskanal und dieselbe Dicke wie die Passung der Filterhalterung. Somit wird mit den beiden PTFE-Flachringdichtungen ein Übermaß in der Dicke der Scheibe und mit der TC-Überwurfklammer eine Presskraft in axialer Einspannrichtung erzeugt.

3.1.5 Akquise der Messdaten

Der Filtrationsversuchsstand ermöglicht es, den Druckverlust über die Filterscheibe durch zwei Absolutdrucksensoren zu bestimmen. Zusätzlich kann die Sättigung der Filterscheibe über die Porosität des untersuchten Mediums und die Gewichtsdifferenz bestimmt werden. Der Trenngrad der Filterscheibe wird über die Messung der Tröpfchengrößenverteilung vor und hinter der Scheibe berechnet.

Messung der Tröpfchengrößenverteilung im Aerosol

Da hier mit Tröpfchen in einer Größe von bis zu wenigen Mikrometern (vgl. Abschnitt 3.1.2) gearbeitet wurde und deren Form als annähernd sphärisch angenommen werden kann, ist ein Weißlichtspektrometer der Firma Palas GmbH (welas® Digital 3000; Sensoren: 2100/2300) zum Einsatz gekommen. Dieses Messgerät basiert auf der optischen Streulichtanalyse an Einzelpartikeln [Pal; Pfe22]. Bei diesem Messverfahren werden die einzelnen Partikeln mit Weißlicht beleuchtet und deren abgestrahlte Streulichtintensität mit einem Fotodetektor in elektrische Signale umgewandelt. Die Lichtstreuung an einer einzelnen Partikel ist eine Funktion ihrer Form, ihres Brechungsexponenten und ihrer Größe. Anschließend werden die Signale mit einer eindeutigen Kalibrierkurve verglichen und entsprechenden Partikelgrößenklassen zugeordnet. Die so erzeugten Einzelsignale werden rechnergestützt verarbeitet und bilden die Basis für ein Histogramm. Das zugrunde liegende physikalische Prinzip dieses Messverfahrens basiert auf der Auswertung von elektromagnetischer Strahlung, die auf eine einzelne Partikel trifft und mit ihr interagiert. Bei dieser Interaktion wird ein Teil der elektromagnetischen Strahlung von der Partikel absorbiert und der anderer Teil durch Beugung, Brechung und Reflexion gestreut [Bar11; Boh98]. Zur Interpretation des Streulichts und zur Berechnung der Partikelgröße werden verschiedene Bereiche

definiert, die in Abhängigkeit des Verhältnisses von Partikeldurchmesser d_p zur Wellenlänge λ_L des einfallenden Lichts eingeteilt sind. Hierzu ist ein dimensionsloser Größenparameter α_L definiert:

$$\alpha_L = \frac{\pi \cdot d_p}{\lambda_L} \quad (3.1)$$

- Der **Rayleigh-Bereich** ($\alpha_L \ll 1$) findet bei sehr kleinen Partikeln Anwendung. Bei Wellenlängen im Bereich des sichtbaren Lichts ($\lambda_L \approx 0,5 \mu m$) beträgt die Partikelgröße etwa $0,02 \mu m$.
- Der **Mie-Bereich** ($0,1 \leq \alpha_L \leq 50$) ist, bei Wellenlängen des sichtbaren Lichts, gültig für Partikelgrößen von etwa $0,02 \mu m$ bis $10 \mu m$.
- Der **Fraunhofer Bereich** ($\alpha_L \gg 10$), der auch als Bereich der geometrischen Optik bezeichnet wird, findet entsprechend der Wellenlänge des sichtbaren Lichts Anwendung für Partikeln ab der Größe von etwa $2 \mu m$.

Alle Bereiche können mit der Lorenz-Mie-Theorie beschrieben werden. Für Partikeln im Fraunhofer-Bereich wird die Lorenz-Mie-Theorie aufgrund ihrer Komplexität jedoch nicht genutzt, da es einfachere Modelle zur Beschreibung gibt [Mie08; Sti09].

Zum Kalibrieren des welas® Digital 3000 werden ideal sphärische monodisperse Latexpartikeln verwendet [Pal]. Diese werden beim Durchqueren des Sensors einzeln gezählt und über die gemessene Streulichtintensität den entsprechenden Größenklassen zugeordnet. Vom Hersteller ist für das verwendete Messgerät eine maximale Partikelanzahlkonzentration von $c_i = 10^5 cm^{-3}$ angegeben. Der messbare Partikelgrößenbereich liegt zwischen $0,2 - 40 \mu m$. Der Probenahmevolumenstrom ist konstant, beträgt $\dot{V}_p = 5 l/min$ und wird nach der Analyse nicht zurück in den Strömungskanal geführt. Sowohl die maximale Partikelkonzentration als auch der Probenahmevolumenstrom sind abhängig von den eingesetzten Sensoren [Pal]. Durch die Position der beiden Probenahmestellen vor und hinter dem Filter wird der Trenngrad der Filterscheibe bestimmt. Hierzu werden jeweils unmittelbar nacheinander stattfindende Messungen mit zwei verschiedenen Sensoren (welas 2100 und welas 2300) vor und hinter dem Filter durchgeführt.

Ermittlung der Druckdifferenz

Druckmessgeräte können in unmittelbare und mittelbare Geräte unterteilt werden. Bei den unmittelbaren Druckmessgeräten handelt es sich um Geräte, deren Messverfahren sich direkt auf die physikalische Größe des Drucks beziehen. Beispiele hierfür sind das Kolbenmanometer und das U-Rohr-Manometer. Bei den mittelbaren Geräten beruht das Messverfahren auf anderen physikalischen

Effekten, aus denen der Druck abgeleitet wird [Pro08]. Zu den indirekten Geräten gehören auch die hier verwendeten resistiven Drucksensoren, bei denen die mechanische Größe des Drucks in ein proportionales elektrisches Signal umgewandelt wird. Dazu befindet sich eine Membran in dem Sensor, an der sich strukturiert angeordnete und als Messbrücke zusammengeschaltete Dehnungsmessstreifen (DMS) befinden. Durch die Verformung der Membran werden die DMS je nach Position gestaucht oder gestreckt und deren elektrischer Widerstand ändert sich. Das sich ergebende elektrische Signal wird abgegriffen [Gaß09].

Zur Bestimmung der Druckdifferenz über den Testzeitraum sind resistive Drucksensoren unmittelbar vor und hinter der Filterscheibe, an den jeweiligen Hälften der Filterhalterung angebracht (Abbildung 3.8). Die Druckdifferenz der Filterscheibe wird über den aufgezeichneten Druck der beiden einzelnen Sensoren berechnet. Die Druckmessumformer sind vom Typ S-20 der Firma WIKA Alexander Wiegand SE & Co.KG und zeichnen sich durch eine sehr gute Nichtlinearität ($\pm 0,25\% \text{ der Spanne}$) und eine robuste Bauform aus. Die Sensoren wurden für anspruchsvolle Applikationen in der Forschung und Entwicklung konzipiert [WIK]. Der Messbereich liegt zwischen 0 – 2,5 bar (Absolutdruck) und das Ausgangssignal der Sensoren beträgt 4 – 20 mA. Das Ausgangssignal wird mit einem A/D-Wandler aus der USB-200 Serie der Firma Measurement Computing GmbH [Mea] digitalisiert, am Messrechner der Versuchsanlage visualisiert und aufgezeichnet.

Bestimmen der Sättigung

Zum Bestimmen der Sättigung werden die Filterlagen vor dem Montieren mit den Filterscheibenhälften (vgl. Abschnitt 3.1.4) gewogen und deren individuelles Flächengewicht G bestimmt. Das Flächengewicht der Proben schwankte dabei um weniger als 2 % um das vom Hersteller der Medien angegebene Flächengewicht. Nach der Montage der Filtermedien mit den Filterscheibenhälften werden die fertigen Scheiben erneut gewogen. Eine dritte Gewichtsbestimmung findet nach dem durchgeföhrten Versuch statt. Die Differenz zwischen der zweiten und der dritten Gewichtsbestimmung ist das Gewicht der im Vlies eingelagerten Flüssigkeit. Über das individuelle Flächengewicht und die mittlere Dicke t des Mediums kann die individuelle Porosität ε für jede Filterscheibe bestimmt werden. Abschließend wird noch die Dichte ρ der Fasern aus Borosilikatglas ($2,23 \text{ g cm}^{-3}$) und die Dichte der verwendeten Flüssigkeit zur Berechnung der Sättigung, also den Anteil des mit Flüssigkeit gefüllten Filterhohlraumvolumens, verwendet. Die Sättigung wird analog der Formel (2.27) berechnet.

3.1.6 Steuerung der Anlage

Der Gasvolumenstrom über den Zerstäuber wird, ebenso wie der Verdunstungsluft-Volumenstrom, über Massendurchflussregler (MFC) des Typs „EL-

FLOW Select“ der Firma Bronkhorst Deutschland GmbH geregelt. Die MFC’s arbeiten nach dem kalorimetrischen Prinzip, wobei in der Regelstrecke zwei thermische Widerstandselemente angeordnet sind, deren Temperaturdifferenz untereinander sich proportional zum Massendurchfluss verhält [Ber06; Pro08]. Die verwendeten Regler arbeiten nach dem Bypass-Prinzip. Dabei wird nur ein Teil des zu regelnden Massenstroms zur Messung verwendet. Der Hersteller gibt eine Genauigkeit von ($\pm 0,5\%$ der Spanne) an [Bro22]. Der Differenzdruck über die Düse des Zerstäubers wird gemessen und aufgezeichnet. Er korreliert mit dem Volumenstrom durch die Düse. Über eine Software können der gewünschte Zerstäubungsvolumenstrom und der Verdünnungsvolumenstrom eingestellt werden. Sowohl die Vorgabewerte als auch die Realwerte werden von der Software mitgeschrieben. Der Tankdruck und damit der für die Zerstäubung zur Verfügung stehende Flüssigkeitsvolumenstrom wird mit einem Präzisionsdruckregler manuell eingestellt. Damit können also die Filteranströmgeschwindigkeit und die Partikelkonzentration des Zerstäubers unabhängig voneinander eingestellt werden. Die Partikelmesstechnik wird über die Software des Herstellers (Palas GmbH) gesteuert und über einen separaten Computer bedient.

3.2 Strukturanalyse von Filtervliesen

Neben den Untersuchungen zum Filtrationsverhalten von Faservliesen wurde in dieser Studie ein weiterer Schwerpunkt auf die Strukturanalyse der Medien gelegt. Dafür wurden Versuche auf mikroskopischer und auf makroskopischer Ebene durchgeführt, wofür im Wesentlichen drei verschiedene Methoden angewendet wurden. Das verwendete Messequipment wird im Folgenden vorgestellt, und der experimentelle Aufbau der Versuche wird erläutert. Die zur Untersuchung herangezogenen Techniken sind die Mikro-Computertomographie, die Durchlichtphotographie und die optische Profilometrie. Aus den daraus gewonnenen Daten sollen Rückschlüsse auf Zusammenhänge zwischen Filtrationsverhalten und Vliesstruktur der einzelnen Medien gewonnen werden.

3.2.1 Mikro Computertomographie (μ -CT)

Die Computertomographie (CT) ist ein bildgebendes Verfahren, das seinen Ursprung in der Medizintechnik hat und 1972 das erste Mal zum Einsatz kam. Dabei wird ein Computer benutzt, um aus der Absorption von Röntgenstrahlung, die aus verschiedenen Richtungen durch ein Untersuchungsobjekt dringt und dem Lambert-Beer’schen Gesetz folgt, digitale Schnittbilder zu berechnen. Das Lambert-Beer’sche Gesetz, auch Bouguer-Lambert-Beer’sche Gesetz genannt, wurde 1729 von Pierre Bouguer formuliert und beschreibt die Intensitätsabschwächung einer Strahlung beim Durchdringen eines Mediums, das eine absorbierende Substanz enthält. Dabei ist die Intensitätsabschwächung von der Konzentration der

absorbierenden Substanz, der Art der Substanz und der durchstrahlten Länge abhängig. Das Gesetz gilt ebenfalls für den Abfall der Intensität von elektromagnetischer Strahlung in strahlungsdämpfenden Stoffen:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\mu_A(\lambda)xc} \quad (3.2)$$

Darin sind $I_0(\lambda)$ die ungeschwächte Ausgangsintensität der Strahlung und $I(\lambda)$ die geschwächte Intensität, die aus dem absorbierten Material austritt. Der stoffspezifische Absorptionskoeffizient wird mit $\mu_A(\lambda)$ bezeichnet. Dabei sind alle Parameter abhängig von der Wellenlänge der Strahlung. Das Formelzeichen x stellt nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz die durchstrahlte Länge der Probe und c die Konzentration des strahlungsdämpfenden Stoffs dar. Ist die gesamte Probe strahlungsdämpfend und es handelt sich nicht um ein Gemisch, ist $c = 1$ [Bee52; May19; Pet04]

Im weiteren Verlauf der technologischen Entwicklung ergaben sich verschiedene Anwendungsmöglichkeiten außerhalb der Medizintechnik, die das Verfahren vor neue Herausforderungen stellte. Heute unterscheidet sich die materialtechnische Computertomografie im Wesentlichen durch die Variabilität der Einsatzmöglichkeiten in Bezug auf die Materialvielfalt und die Probengröße. Die Entstehung der Micro-Computertomografie ist die konsequente Weiterentwicklung der Technologie für den Einsatz in der Forschung und Entwicklung [Orh20; Buz04].

Der heutige Stand der Technik ist die Kegelstrahltomografie, bei der ein dreidimensionaler Volumenkörper der Probe erzeugt wird. Dazu wird das Prüfobjekt mittels Röntgenstrahlung aus unterschiedlicher Richtung durchstrahlt, wobei das Prüfobjekt rotiert und die Röntgenquelle und der Detektor fest positioniert sind. Der typische Aufbau eines solchen Systems besteht also aus einer Röntgenquelle, einem Flachbilddetektor und einer hochpräzisen Probenrotationseinheit. Die Probe wird also um 360° gedreht und von der Röntgenstrahlung durchdrungen. Dabei steht die Probe senkrecht zum Röntgenstrahl, zwischen Röntgenquelle und Detektor. Während der Rotation werden in vordefinierten Positionen, nach regelmäßigen identischen Rotationsbewegungen der Probe (beispielsweise alle $0,3^\circ$) zweidimensionale Aufnahmen gemacht. Daraus wird mittels Computeralgorithmus der dreidimensionalen Volumenkörper rekonstruiert [Orh20; Rit04].

Bei heutigen Micro-CT Geräten sind Volumenelementauflösungen im Submikronbereich möglich. Bei Geräten dieser Bauart wird häufig von Nano-CT Geräten gesprochen. Für die Messungen in dieser Arbeit wurde ein Phönix nanotom® von der Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH verwendet. Das Gerät besitzt eine $180kV / 15W$ nanofocus Röntgenröhre, einen 5 Megapixel Detektor und ist für Probengrößen zwischen $1 - 120 mm$ ausgestattet. Mit der Kombination aus Detektor und Röntgenröhre kann eine theoretische Volumenelementauflösung von unter $500 nm$ erreicht werden [Neu17; Alb19].

3.2.2 Durchlichtfotografie

Bei der Durchlichtfotografie oder auch Transmissionslichtfotografie handelt es sich um ein bildgebendes Verfahren, bei dem die Lichtquelle, von der Kamera aus betrachtet, hinter der Probe angeordnet ist. Wird ein stark vergrößertes Bild der Probe angefertigt, spricht man von der Durchlichtmikroskopie. Bei dieser Beleuchtungstechnik wird das Licht durch die Probe geleitet und dabei teilweise oder vollständig gestreut, reflektiert und absorbiert. Das Licht, das an der Probe vorbei, also nicht durch die Probe hindurch, auf das Kameraobjektiv fällt, wird nicht, oder nur in sehr geringem Maß, gestreut oder absorbiert. So entsteht ein Schattenbild der Geometrie des Probenkörpers, im Fall der vollständigen Absorption des Lichts durch die Probe. Bei transparentem oder teilweise transparentem Probenmaterial entsteht ein kontrastreiches Bild der durchstrahlten Probe in Abhängigkeit der optischen Dichte des Materials [Hau14; May14]. Auch hier kann das Lambert-Beer'sche Gesetz zur Beschreibung der Intensitätsschwächung verwendet werden. Aus der Gleichung geht hervor, dass sowohl die Materialdicke als auch die Konzentration einen Einfluss auf die Intensitätsschwächung haben. Bei Fasermedien mit den beschriebenen transparenten oder teiltransparenten Eigenschaften, wie Glasfaservlies und Kunststoffvlies sie für die Koaleszenzfiltration üblicherweise aufweisen, können mit Hilfe der Durchlichtanordnung also Intensitätsschwankungen über die Vliesfläche bildlich erfasst werden. Diese Intensitätsschwankungen spiegeln sich im Kontrast des Bildes wider und beinhalten Informationen über die Dicke des Vlieses und die Homogenität der Faserverteilung, sowohl auf mikroskopischer wie auch auf makroskopischer Ebene. Wie bereits andere Arbeiten zeigen, kann diese Methode bei gesättigten Vliesten verwendet werden, um die Bereiche auszumachen, an denen sich Flüssigkeitskanäle durch das Vlies gebildet haben [Kam14a]. Die eingelagerte Flüssigkeit in Form von Kanälen verringert die Strahlungsintensität wesentlich weniger als die Wirrfaserstruktur der unbenetzten Bereiche. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsdurchführung ist in Abschnitt 4.4 gegeben.

In Abbildung 3.10 ist die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus gezeigt. Links ist die Lichtquelle zu sehen, in der Mitte die Probe und auf der rechten Seite die Kamera.

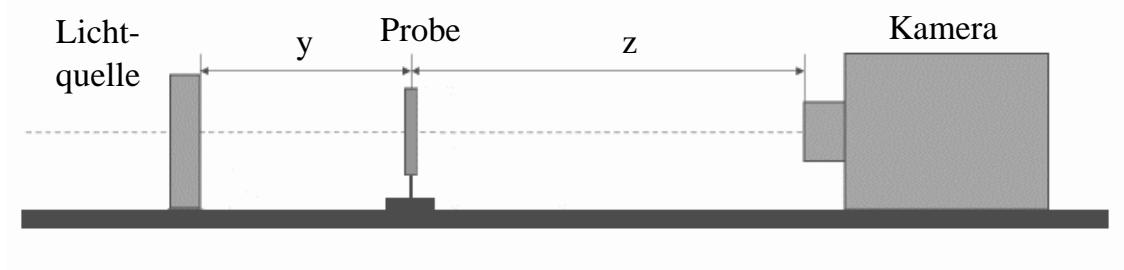


Abbildung 3.10:Schematische Darstellung der Durchlichtanordnung

Die beiden Abstände y und z sind variabel und wurden je nach Zielsetzung der Versuche festgelegt. Als Lichtquelle wurden zwei verschiedene Weißlicht-Flächenlampen aus dem Fotoequipment verwendet. Zur Bilderstellung eine Kamera des Typs Nikon D5300. Der gesamte Aufbau ist für die jeweiligen Versuche so verkleidet worden, dass kein störendes Fremdlicht an die Probe und die Kamera gelangen konnte.

3.2.3 Optische Profilometrie (Lichtschnittverfahren)

Die optische Profilometrie ist ein berührungsloses Analyseverfahren zur Bestimmung der Topografie von Oberflächen. Dabei gibt es eine große Anzahl verschiedener optischer Sensoren und Messsysteme, denen letzten Endes jedoch allen derselbe systematische Aufbau aus Strahlungsquelle, Beleuchtungs- und Abbildungsoptik, Detektoreinheit sowie Signal und Datenauswerteeinheit zu Grunde liegt [Trä98]. Eine Methode, die aus der geodätischen Messtechnik stammt, ist die Triangulation. Abbildung 3.11 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines Lichtpunkt-Triangulations-Messgerätes. Das Messobjekt, dessen Abstand zur Bezugs ebene gemessen werden soll, wird mit einer punktförmigen Lichtquelle beleuchtet. Das Streulicht wird unter dem Winkel δ mit Hilfe einer Abbildungslinse auf dem positionsempfindlichen Detektor abgebildet. Demnach muss die Oberfläche des Messobjekts die optische Eigenschaft besitzen, ein Teil des von der Strahlungs quelle kommenden Lichts zu streuen.

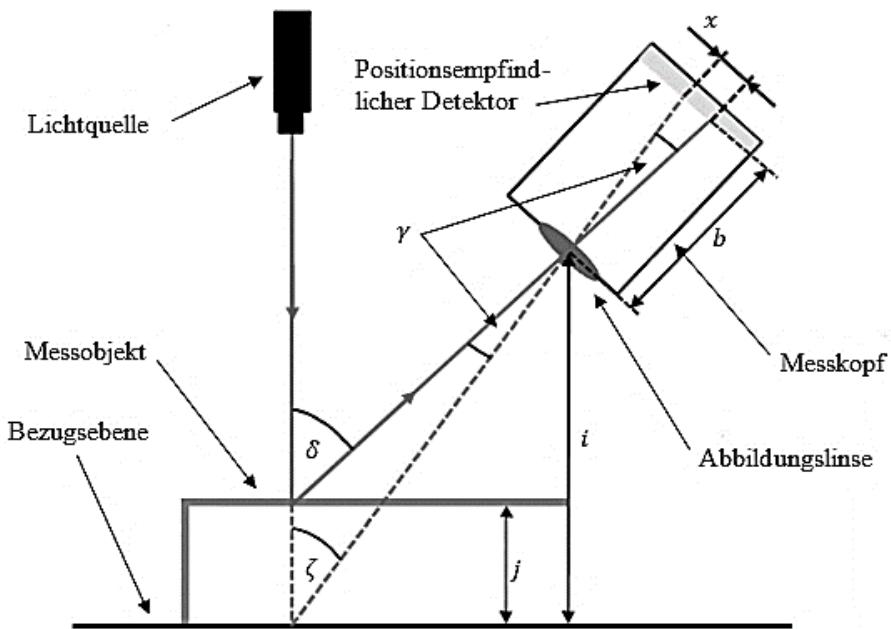


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung eines Lichtpunkt-Triangulations-Messgerätes

Bei ausschließlich reflektierenden Eigenschaften des Messobjekts gelangt kein Licht auf den Detektor. Aus der Position des Lichtpunkts auf dem Detektor wird mit Hilfe der geometrischen Beziehungen des Triangulationsdreiecks der Abstand der Objektoberfläche zum Sensor bestimmt [Ber11; Flü56; Trä98].

Die konsequente Weiterentwicklung des Punktlicht Triangulationsmessverfahrens ist das Linienschnittverfahren, bei dem anstelle der punktförmigen Beleuchtung und Auswertung eine Lichtlinie erzeugt und ausgewertet wird. Der Verlauf dieser Linie spiegelt also die direkte zweidimensionale Kontur des Messobjekts wider. Mit diesem Verfahren wird aus der diffusen Lichtstreuung die Oberfläche des Messobjekts rekonstruiert, wobei erheblich größere Datenmengen pro Zeit ausgewertet werden. Die Lichtquelle muss ortsfest und die Messkopfposition hinsichtlich Winkel und Abstand zur Bezugsebene bekannt sein. Eine Rekonstruktion des Messobjekts ist nur in den Bereichen möglich, die von der Lichtquelle und dem Messkopf erreicht werden können. Typische Winkelstellungen von Lichtquelle zu Messkopf liegen zwischen $\zeta = 30^\circ$ und $\zeta = 60^\circ$ [STE]. Die Höhe des Messobjektes j zur Bezugsebene wird nach Gleichung 3.3 berechnet [Wec09]:

$$j = \frac{\sin \gamma}{\sin(\zeta + \gamma)} \cdot \frac{i}{\cos \delta} \quad (3.3)$$

Als Detektoreinheiten kommen zur Positionsbestimmung der Lichtlinie CCD Flächenkameras oder CMOS Sensoren [Key] zum Einsatz, die mit Hilfe von Mikroprozessoren die Triangulationsmessung durchführen, nachdem die Helligkeitswerte der einzelnen Bildpunkte digitalisiert wurden. Die Wahl der Kamera bestimmt damit die Auflösung des Messsystems. Für die Lichtquelle kommen aufgrund ihrer Fokussierbarkeit und der daraus resultierenden scharf abgebildeten Linie ausschließlich Laser und Laserdioden zum Einsatz. Die Erzeugung der Linie erfolgt über ein Zylinderobjektiv oder über einen schnell bewegten Laserpunkt, wobei man dann von einem Laserscanner spricht [Dem02; Trä98].

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten System handelt es sich um das 3D-Profilometer der Modellreihe VR-6000 von der Firma KEYENCE DEUTSCHLAND GmbH. Dieses Modell arbeitet mit einer Weißlicht LED als Lichtquelle für die Messung und ist mit zwei Kameras ausgestattet, wovon eine Kamera für Messungen im mikroskopischen Bereich und die andere für Messungen im makroskopischen Bereich verwendet wird. Die Einteilung in den mikroskopischen und den makroskopischen Bereich ist vom Hersteller getroffen und bezieht sich auf die stufenweise einstellbare Vergrößerung. In den Makrobereich fallen demnach die Vergrößerungsstufen 12x, 25x, 38x und 50x. In den Mikrobereich die Vergrößerungsstufen 40x, 80x, 120x und 160x. Beide Bildaufnahmegeräte sind mit einem 4 Megapixel CMOS Sensor ausgestattet. Bei allen verwendeten Objektiven, also den Sende- und den Empfangsobjektiven, handelt es sich um doppelt telezentrische

Objektive. Die Messgenauigkeit in der Höhe wird vom Hersteller mit $\pm 2,5 \mu m$ ohne computergestützte Bildzusammensetzung und mit $\pm 4 \mu m$ mit Bildzusammensetzungsfunktion in jeweils der Z-Achse angegeben. Die Wiederholgenauigkeit ist mit $\pm 1 \mu m$ im Makromodus und mit $\pm 0,5 \mu m$ im Mikromodus beziffert [Key].

4 Experimentelles Vorgehen

In diesem Abschnitt wird das experimentelle Vorgehen bei der Versuchsdurchführung beschrieben. Außerdem werden die dafür verwendeten Materialien vorgestellt. Das beinhaltet sowohl die untersuchten Vliese als auch die verwendeten Flüssigkeiten zur Erzeugung des Tröpfchen-Aerosols. Dabei wird auch erläutert, warum diese Materialauswahl getroffen wurde und welche Vorversuchsergebnisse und Materialeigenschaften als Auswahlkriterien herangezogen wurden. Dabei wird in Abschnitt 4.1 ausführlich auf die Materialauswahl eingegangen, zuerst auf die untersuchten Filtermaterialien und anschließend auf die Flüssigkeiten und deren Eigenschaften. In Abschnitt 4.2 wird die Untersuchung der Vliese auf mikroskopischer Ebene beschrieben. Damit ist im Wesentlichen die Untersuchung mit dem Mikro CT gemeint. Außerdem wird die Methodik vorgestellt, mit der aus den Rohdaten des CT-Scans die Porositätsverteilung beziehungsweise die Faservolumenanteilverteilung des gesamten Vlieses, wie auch von mikroskopischen Teilstücken daraus, ermittelt wird. In Abschnitt 4.3 werden die verschiedenen Versuche vorgestellt, die das Sättigungsverhalten der Filtermedien genauer untersuchen sollen. Dieser Abschnitt ist in mehrere Unterabschnitte gegliedert, in denen die einzelnen Versuche und deren Zielsetzung genauer erklärt werden. Zuletzt wird in Abschnitt 4.4 die Versuchsdurchführung genauer erläutert, die darauf ausgelegt ist, tiefergehende Information über den Einfluss der Dicke und der Oberflächenbeschaffenheit auf die Kanalbildung und den Flüssigkeitstransport durch das Vlies zu gewinnen.

4.1 Materialauswahl

Die Materialauswahl ist in drei Unterabschnitte gegliedert. Es gibt im ersten Unterabschnitt 4.1.1 einen Überblick über die Filtermaterialien, welche in den unterschiedlichen Experimenten verwendet und untersucht wurden. Anschließend werden in Abschnitt 4.1.2 alle für die Aerosolerzeugung verwendeten Flüssigkeiten vorgestellt und es werden deren Vor- und Nachteile diskutiert. Außerdem werden die wichtigsten Materialeigenschaften der Flüssigkeiten und der Vliese vorgestellt. Dabei stehen die Eigenschaften im Fokus, die für die Auswahl der Materialien von Bedeutung waren. Zuletzt wird in Abschnitt 4.1.3 über die Verdampfungseigenschaft der zerstäubten Flüssigkeiten diskutiert, und es wird auf die daraus resultierenden Konsequenzen eingegangen.

4.1.1 Auswahl der Filtermedien

Für die verschiedenen Versuche, die innerhalb dieser Arbeit durchgeführt wurden, sind mehrere unterschiedliche Filtermedien zum Einsatz gekommen. Eine Übersicht aller in dieser Arbeit verwendeten Filtermedien ist in Tabelle 4.1 gegeben.

Tabelle 4.1: Verwendete Filtermaterialien mit Herstellerangaben

Bezeichnung	Firma	Material	Flächengew. (g/m ²)	Dicke (mm)	BP/MFP (μm)	Luft Perm. (l/m ² s)
917	H&V	Glas	163	0,71	35/14	k.A.
848	H&V	Glas	156	0,66	19/8	k.A.
MM1044	BinNova	Glas	166	1,1	25/8	84,0
Unbekannt	BinNova	Glas	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Pluratexx 5112	Freudenberg	Polyester	120	0,65	35/18	370
Fibermet 3A0	Pall	CrNi Stahl	966	0,38	7/k.A.	17,8
Fibermet 30M1	Pall	CrNi Stahl	1431	1,07	65/28	815

- Flächengewicht bestimmt nach: [DIN20] und [DIN92]
- Dicke bestimmt nach: [DIN12] und [DIN97]
- BP / MFP bestimmt nach: [AST19]
- Luft Permeabilität bestimmt nach: [DIN95] bei 200 Pa
- Alle Medien besitzen nach DIN EN ISO 14419:2010 [DIN10] eine Nichtbenetzbarkeit von 0 und sind damit gut benetzbar

Die Tabelle beinhaltet, neben den verwendeten Filtermedien, einige weitere Angaben der Hersteller, die entsprechend den angeführten Normen bestimmt wurden. Neben den gelisteten Materialeigenschaften gibt es, wie bereits beschrieben, viele weitere Materialeigenschaften. Diese sind, sofern ermittelbar und von Relevanz, in den jeweiligen Versuchsbeschreibungen aufgeführt.

Für die Analyse auf mikroskopischer Ebene (Abschnitt 4.2) wurden Versuche an zwei Metallfaservliesen, drei Glasfaservliesen und einem Polyestervlies durchgeführt. Die Metallfaservliese waren das *Fibermet 30M1* und das *Fibermet 3A0* von der Firma Pall Corporation. Die drei Glasfaservliese waren das 917 und das

848 von Hollingsworth & Vose sowie das *MM1044* von der BinNova GmbH. Von der Firma Freudenberg & Co. KG wurde das Polyestervlies mit der Bezeichnung *Pluratexx 5112* untersucht.

Bei den Untersuchungen zum Sättigungsverhalten und der Flüssigkeitsverteilung in Vliesen (Abschnitt 4.3) wurden mit Ausnahme des *Fibermet 30M1* und des *Unbekannten* Vlieses der Firma BinNova alle in Tabelle 4.1 aufgeführten Materialien untersucht. Das *Fibermet 30M1* ist ein mehrlagiges Filtermedium, das üblicherweise für Hydraulikanwendungen und Anwendungen im größeren Partikelgrößenbereich entwickelt wurde. Die Anwendung in der Tröpfchen-Aerosol-Filtration ist auf Grund der schlechten Abscheidung nicht sinnvoll. Die CT-Untersuchungen wurden jedoch durchgeführt, um ein breites Spektrum an Materialparametern wie Faserdurchmesser und Porengrößenverteilung untersuchen zu können.

Für die Untersuchungen zum Einfluss der Dicke und der Topografie auf die Kanalbildung (Abschnitt 4.4) kamen alle in Tabelle 4.1 gelisteten Glasfasermedien zum Einsatz, wobei das nicht benannte Vlies von dem Hersteller BinNova im Fokus der Untersuchungen stand. Dieses wurde vom Hersteller als Ausschussmaterial deklariert und auf Nachfrage als Probenmaterial zur Verfügung gestellt. Es besaß eine ausgeprägte Inhomogenität in der Oberflächenbeschaffenheit, weshalb es sich hervorragend für die Untersuchungen eignete.

4.1.2 Auswahl der Tröpfchen-Aerosol-Flüssigkeit

Vor den eigentlichen Untersuchungen der Filtermaterialien wurden Vorversuche zur Aerosolerzeugung mit verschiedenen Flüssigkeiten durchgeführt. Diese sollten den Einfluss der stofflichen Eigenschaften auf die Tröpfchengrößenverteilung des Aerosols untersuchen. Die primäre Zielsetzung dieser Vorversuche war es jedoch, eine passende Flüssigkeit für die weiterführenden Untersuchungen der Filtermedien zu finden. Dabei waren die wichtigsten Kriterien die Ähnlichkeit der stofflichen Eigenschaften einschließlich der Partikelgrößenverteilung zu den industriell üblicherweise vorkommenden Eigenschaften des Tröpfchen-Aerosols, die Stabilität der Flüssigkeit gegenüber Verdampfung und die gesundheitliche Unbedenklichkeit der Flüssigkeit sowohl in der flüssigen als auch in der gasförmigen Phase. Alle verwendeten Flüssigkeiten mit zugehörigen Stoffeigenschaften sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Tabelle 4.2: Verwendete Flüssigkeiten mit zugehörigen Stoffeigenschaften

Flüssigkeit	Dichte (g/cm ³)	Kinematische Viskosität (mm ² /s)	Oberflächen- spannung. (mN/m)	Brechungs- index (–)	Dampf- druck (Pa)
Sonnenblumenöl	0,92	62	30 – 33	1,464	< 100
Rapsöl	0,91	72	30 – 33	1,47	< 100
Olivenöl	0,9	80	30 – 33	1,47	< 100
Paraffinöl nidrigviskos	0,85	26	23 – 25	1,467	< 10
Silikonöl	0,945 – 0,968	10-350	20 – 21,1	1,4	k. a.
Wasser	1	1	72,75	1,330	2300
DEHS	0,91	25	32	1,450	< 1

Alle aufgeführten Werte beziehen sich auf 20°C und 1,01325 bar. Die gemessenen Werte wurden mit Literaturwerten abgeglichen. Zur Dichtebestimmung wurde ein handelsübliches Aräometer (Dichtespindel) nach DIN 12791 – 2019 [DIN19b] verwendet. Die Viskosität, bestimmt mit einem Zylindersystem an dem Modular Compact Rheometer 501 (MCR 501) des Herstellers Anton Paar, ist beim Öffnen der Charge des Öls und anschließend in regelmäßigen zeitlichen Abständen wiederholt worden. Der Grund für die regelmäßige Kontrolle ist die Alterung des Öls und die damit verbundene Viskositätsänderung, die insbesondere bei den verwendeten Pflanzenölen auftritt. Bei einer Messwertabweichung von mehr als ±0,25% wurde bei den späteren Versuchen eine ungeöffnete Flasche angebrochen und vermessen. Die Oberflächenspannung, mit Ausnahme der des Wassers und der der Silikonöle, wurde mit dem Tropfenvolumetensiometer DVT50 der Firma Krüss GmbH bestimmt beziehungsweise überprüft. Der Brechungsindex wurde für alle Flüssigkeiten mit dem Refraktometer DR6000 der Krüss GmbH ermittelt. Die Dampfdruckwerte sind Literatur- und Herstellerangaben. Der Brechungsindex spielte bei der Auswahl der passenden Flüssigkeit insofern eine Rolle, als dass er für das Weißlichtspektrometer bekannt sein musste. Nur dann kann von dem mit Latexpartikeln kalibrierten Brechungsindex von 1,59 [Pfe22] auf das verwendete Partikelmaterial umgerechnet werden. Findet keine Umrechnung statt oder wird ein falscher Brechungsindex verwendet, werden die Partikelgrößen aus dem Lichtsignal in der Größe über- oder unterbewertet. In dieser Arbeit wurde der im Spektrometer hinterlegte Brechungsindex von 1,47 verwendet.

Nach einigen Vorversuchen wurde Wasser als Flüssigkeit für die eigentlichen Experimente in dieser Studie ausgeschlossen. Ursächlich dafür war der hohe

Dampfdruck und die dadurch begünstigte Verdampfung des Fluids nach der Zerstäubung. Ein weiterer Grund für den Ausschluss war die niedrige Viskosität im Vergleich zu den Ölen. Diese Stoffeigenschaft hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Tröpfchengrößenverteilung des Aerosols und auf den Flüssigkeitstransport im Filtermedium. Sinkt die Viskosität der Flüssigkeit, findet eine Verschiebung der Verteilung in den kleineren Tröpfchengrößenbereich statt. Gleichermaßen gilt für die Oberflächenspannung und das Massenstromverhältnis von Flüssigkeit zu Gas [Wal90]. Die bei abnehmender Viskosität in vielen Studien überwiegend postulierte Verschiebung der Tröpfchengrößenverteilung in den feineren Bereich konnte in dieser Studie bestätigt werden. Hierzu wurden Untersuchungen mit gleichbleibenden Betriebsparametern des Zerstäubers und Silikonöl mit verschiedenen Viskositätsstufen durchgeführt. Das Diagramm in Abbildung 4.1 zeigt den Sauterdurchmesser D_s in Abhängigkeit der kinematischen Viskosität des Silikonöls.

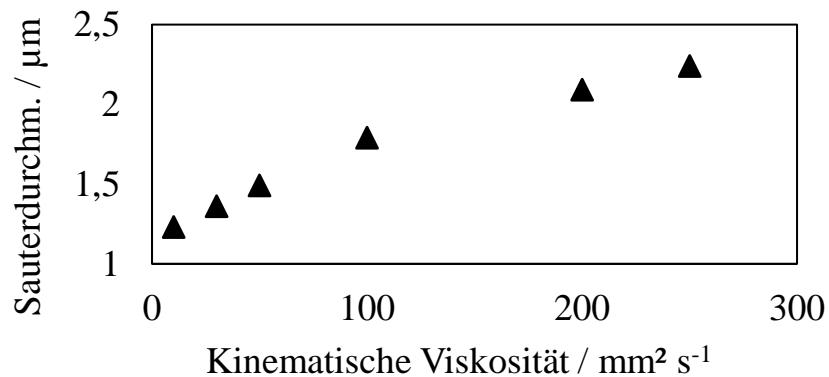


Abbildung 4.1: Sauterdurchmesser verschiedener Silikonöle mit unterschiedlichen Viskositätsstufen und gleichbleibenden Betriebsparametern des Zerstäubers

Im Diagramm ist zu erkennen, dass der Sauterdurchmesser mit zunehmender Viskosität größer wird. Bei gleichbleibenden Betriebsbedingungen und gleichbleibender Zerstäubergeometrie hat das Verhalten jedoch Grenzen. So lässt sich die Viskosität bei gleichbleibendem Gasvolumenstrom und den damit verbundenen Scherkräften nicht grenzenlos weiter steigern. Es findet bei zu hochviskosem Material keine oder nur eine unzureichende Zerstäubung statt. Gleichermaßen gilt, wenn die Viskosität zu weit abnimmt. Neben den Silikonölen wurde niedrigviskoses Paraffinöl getestet. Dieses stellte sich mit seinen Stoffdaten als gut zu zerstäubende Flüssigkeit heraus. Es wurde jedoch, trotz des geschlossenen Versuchsaufbaus, auf Grund der Gesundheitsschädlichkeit des Nebels von der Verwendung in den weiteren Versuchen abgesehen. Das untersuchte DEHS wies ebenfalls gute Zerstäubungseigenschaften auf und erzielte die gewünschte Tropfengrößenverteilung, ohne gesundheitlich bedenkliche Eigenschaften aufzuweisen. Abschließend wurden mehrere gesundheitlich unbedenkliche und verhältnismäßig günstige Pflanzenöle vermessen. Eine mit Sonnenblumenöl typischerweise erzeugte Partikelgrößenverteilung ist in Abbildung 3.5 bereits vorgestellt worden. Die drei

untersuchten Pflanzenöle haben einen etwas höheren Dampfdruck, der die Verdampfung begünstigt (vgl. Abschnitt 4.1.3), zeigen jedoch gute Zerstäubungseigenschaften und die gewünschte Partikelgrößenverteilung. In den Experimenten innerhalb dieser Studie wurde das Sonnenblumenöl verwendet. Die Kombination aus der gesundheitlichen Unbedenklichkeit, der Verfügbarkeit sowie den Beschaffungskosten bei gleichzeitig guten Ergebnissen in den Zerstäubungseigenschaften, waren die ausschlaggebenden Punkte für die Auswahl.

4.1.3 Verdampfung des Tröpfchen-Aerosols

Nach dem Erzeugen des Aerosols strömt dieses weiter durch den Versuchsaufbau bis zur Probenahmestelle und weiter bis zum Testfilter. Die aus dem Strömungskanal gewonnene Probe muss bis zur Messzelle des Sensors weitertransportiert werden, wo sie letztendlich analysiert wird. Die Tröpfchen befinden sich also, in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit, eine gewisse Zeit im Trägergas, bevor sie analysiert oder im Vlies abgeschieden werden. Daher wurde abgeschätzt, inwieweit die Verdampfung der verwendeten Flüssigkeit einen Einfluss auf die Größe der Partikeln hat. Hierzu wurden Messungen der Partikelgrößenverteilung der ersten Probenahmestelle mit Messungen der Partikelgrößenverteilung der zweiten Probenahmestelle, ohne dass sich ein Testfilter im Strömungskanal befand, verglichen. Bei dem Vergleich zeigte sich keine messbare Verschiebung der Verteilung in den kleineren Tropfengrößenbereich. Dieses Ergebnis entspricht, aufgrund der geringen Flüchtigkeitseigenschaft des verwendeten Öls, der Erwartungshaltung.

Nach der Abscheidung der Öltröpfchen im Faservlies können jedoch lokal sehr hohe Relativgeschwindigkeiten zwischen der Gasphase und dem Öl vorliegen, die für die Verdampfung begünstigend wirken. Die Verdampfung wird hier jedoch ebenfalls als nicht relevante Einflussgröße betrachtet [Nag07]. Es sei jedoch angemerkt, dass es Veröffentlichungen gibt, die eine Verdampfung messen [Lei96a; Ane95]. Bei genauerer Betrachtung scheint die Ursache der Ölverluste jedoch der Wiedereintrag bereits abgeschiedener Tropfen (Re-Entrainment) zu sein [Kam14a].

4.2 Analyse der Filtervliese auf mikroskopischer Ebene

Zur Betrachtung der Wirrfaserstrukturen auf mikroskopischer Ebene wurden in dieser Arbeit Versuche mit einem Micro-CT (vgl. Abschnitt 3.2.1) durchgeführt. Die Zielsetzung dabei war es, herauszufinden, wie fein die Faserstrukturen werden dürfen, um mit einem CT-Scan ausreichend scharfe Aufnahmen zu erzeugen, aus denen wiederum eine sinnvolle Interpretation ermöglicht werden kann. Außerdem sollte herausgefunden werden, wie fein und homogen die industriell verwendeten Filtervliese tatsächlich sind. Es sollte also der Faserdurchmesser, die

Faseroberfläche und die Porosität auf mikroskopischer Ebene sowie deren Verteilung im Vlies präzise bestimmt werden. Darauf aufbauend sollte aus den Ergebnissen die Information gewonnen werden, inwieweit die Faserstruktur in der Relation zur Größe des betrachteten Faservolumenausschnitts homogen ist, also wie klein ein Volumenelement werden muss, um signifikante Unterschiede in der Porosität im Vergleich zu anderen gleichgroßen Volumenelementen innerhalb des selben Vlieses aufzuweisen. Ein weiterer Aspekt, der während der eigentlichen Untersuchungen betrachtet werden sollte, war der Einfluss des Fasermaterials auf die Qualität der Versuchsergebnisse, also welches Fasermaterial sich am besten für diese Untersuchungsmethode eignet. Für die Untersuchungen wurden Proben von den in Tabelle 4.3 gelisteten Filtermedien genommen und untersucht.

Tabelle 4.3: Verwendete Filtermaterialien für die Micro-CT-Untersuchung

<i>Bezeichnung</i>	<i>Firma</i>	<i>Material</i>	<i>BP/MFP (µm)</i>	<i>Probenanzahl</i>	<i>Einstellung Röntgensp. (kV)</i>
917	<i>H&V</i>	<i>Glas</i>	35/14	1	70
848	<i>H&V</i>	<i>Glas</i>	19/8	1	70
MM1044	<i>BinNova</i>	<i>Glas</i>	25/8	5	60
<i>Pluratexx 5112</i>	<i>Freudenberg</i>	<i>Polyester</i>	35/18	1	70
<i>Fibermet 3A0</i>	<i>Pall</i>	<i>CrNi Stahl</i>	7/k.A.	1	100
<i>Fibermet 30M1</i>	<i>Pall</i>	<i>CrNi Stahl</i>	65/28	3	100

Neben der Filtermaterialbezeichnung, dem Fasermaterial und dem Hersteller ist die Anzahl der vermessene Proben je Material und die eingestellte Röntgenspannung aufgelistet. Zusätzlich sind der BP Wert und der MFP Wert als Anhaltpunkt für die Materialfeinheit mit aufgeführt. Die Proben sind aus dem Vollmaterial ausgeschnitten worden. Die Glasfasermedien und das Polyestermedium waren Rollenware, die Medien aus Edelstahl Plattenware. Die daraus genommenen Proben hatten dabei eine Größe von wenigen Quadratmillimetern.

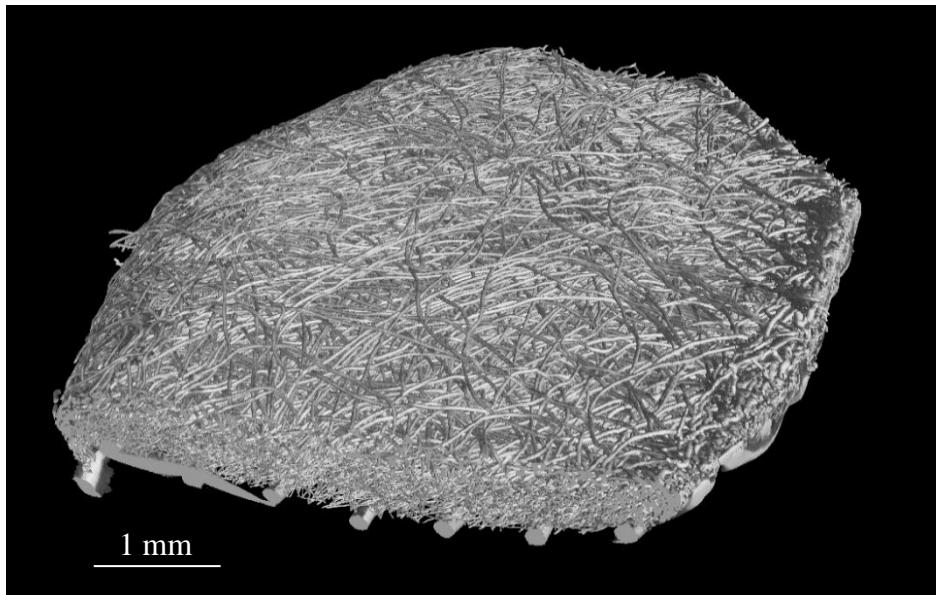


Abbildung 4.2: Dreidimensionale Darstellung einer CT-Aufnahme des Fibermet 30M1

Von jeder Probe wurde ein möglichst hochauflösender CT-Scan erstellt, der als Grundlage für die Vorauswahl zur weiteren Untersuchung diente. Abbildung 4.2 zeigt exemplarisch eine 3D-Darstellung einer CT-Aufnahme des *Fibermet 30M1*, welches insgesamt die besten Aufnahmen lieferte. Das Glasfaservlies mit der Bezeichnung *MM1044* lieferte auf Grund der Faserstärke und der verwendeten Betriebsparameter die besten Ergebnisse unter den Glasfaservliesen und wurde daher gemeinsam mit dem *Fibermet 30M1* intensiver untersucht. Für die eigentliche Untersuchung der ausgeschnittenen Proben beziehungsweise der Interpretation der Aufnahmen wurden nur die Daten aus dem inneren Bereich herangezogen, um die Verfälschung der Dicke und der Porosität durch die Deformation infolge des Ausschneidens der Probe so gering wie möglich zu halten.

Zur Gewinnung der Porositätsinformationen und den damit einhergehenden Informationen zum Faservolumenanteil aus den CT-Rohdaten wurden Bildstapel in Strömungsrichtung durch das Vlies erzeugt. Diese Stapel bestehen aus Bildern, die aufeinander folgend jeweils einen Schnitt durch das Material abbilden und in einem Mikrometer Abstand voneinander erzeugt wurden. Anschließend wurden die so erzeugten Bildstapel der Probe in schwarz-weiß Bilder umgewandelt. Für die Erzeugung der schwarz-weiß Bilder wurde das Java basierte Open Source Bildverarbeitungsprogramm ImageJ verwendet. Es wurde im ersten Schritt ein Bild ausgewählt, welches händisch in ein Graustufenbild (8 Bit; 256 Farben) umgewandelt wurde. Im nächsten Schritt wurde ein Schwellwert definiert, der aus dem Graustufenbild ein schwarz-weiß Bild erzeugt. Dabei wurde der Schwellwert so abgeschätzt, dass er den Faserflächenanteil so realistisch wie möglich widerspiegelt. Nach dem Setzen des Schwellwertes erscheint die Faser weiß und der

Hohlraumbereich schwarz. In Abbildung 4.3 ist ein solches CT-Schichtbild des *Fibermet 30M1* vor der Bearbeitung (links) und nach der Umwandlung in ein schwarz-weiß Bild (rechts) zu sehen.

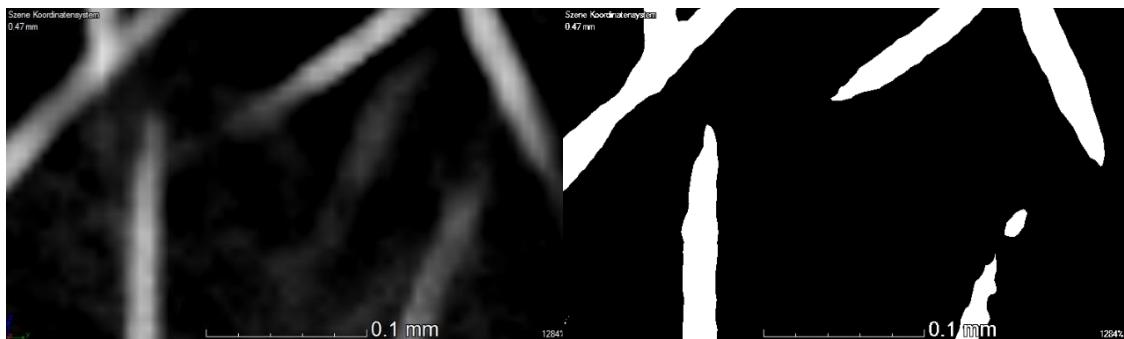


Abbildung 4.3: CT-Schichtbild eines Bildstapels (links) und ein bearbeitetes schwarz-weiß Bild mit einem gesetzten Schwellwert (rechts)

Der Schwellwert wird in ein Java Skript eingetragen, welches so geschrieben ist, dass die Bilder des Bildstapels einzeln und sukzessiv aufeinander folgend geöffnet werden. Bei jedem Bild wird dabei, wie händisch beschrieben und in Abbildung 4.3 gezeigt, erst ein Graustufenbild und weiter ein schwarz-weiß Bild unter Verwendung des gewählten Schwellwerts erzeugt. Von diesem Bild wird der Flächeninhalt des Faseranteils und des Hohlraumanteils gemessen. Das Ergebnis ist also eine Liste mit den Faserflächenanteilen und den Holraumflächenanteilen aus den Schnittbildern durch das Vlies. Das arithmetische Mittel der Flächenverhältnisse von Faser zu Hohlraum aller Bilder des Stapels ist die Porosität, beziehungsweise der Faservolumenanteil des vermessenen Volumens des Filtervlieses unter der Voraussetzung, dass der Schwellwert zur schwarz-weiß Bild Erzeugung sinnvoll gelegt wurde. Zur Validierung des gewählten Schwellwerts wird im nächsten Schritt die resultierende Porosität mit der gravimetrisch bestimmten Porosität verglichen. Diese wurde wiederum mit Herstellerangaben abgeglichen. Auf Basis dieses Vergleichs wird der Schwellwert im Quelltext des Java Plugins angepasst und die beschriebene Porositätsberechnung wird erneut durchgeführt. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis der gesetzte Schwellwert den tatsächlichen Porositätswert wiedergibt. Das beschriebene Vorgehen ist in Abbildung 4.4 schematisch dargestellt und dient dem Zweck, den Schwellwert für die eigentliche Auswertung an die reale Porosität und den Faservolumenanteil anzupassen.

Nachdem der Schwellwert an die gemessene Porosität angepasst ist, kann die eigentliche Porositätsbestimmung von Volumenelementen mit variabler Größe aus dem Vlies durchgeführt werden. Dafür wird ein ähnlicher Algorithmus wie bei der Schwellwertanpassung verwendet. Es wird der zuvor ermittelte Schwellwert verwendet, um aus einem entsprechend vergrößerten Graustufenbild ein schwarz-weiß Bild zu erzeugen. Dieser Vorgang wird für jedes Bild im Bildstapel

durchgeführt und weiter für die Anzahl an Bildstapel wiederholt, bis die zu analysierende Fläche der Probe ausgeschöpft ist. Die Größe der Bilder, beziehungsweise die Vergrößerung der Aufnahmen, hängt dabei von der Größe der Volumenelemente ab, für die die Porosität ermittelt werden soll. Die Bestimmung der Faserfläche und der Hohlraumvolumenfläche aus den schwarz-weiß Bildern erfolgt ebenso wie bei dem zuvor beschriebenen Schema, mit dem Unterschied, dass in der Länge und der Breite des Bildes nur eine bestimmte Pixelanzahl interpretiert wird. Mit der Vergrößerung ist die Pixelabmessung bekannt und es kann in Abhängigkeit der Pixelanzahl ein Quadrat mit bekannter Größe an einer bekannten Position vermessen werden. Die Information der Position und der Dimension des zu vermessenden Quadrates aus dem Bild wird für jede betrachtete Volumenelementgröße händisch in den Java Quelltext des Plugins geschrieben. Daraus folgt, dass für jede Volumenelementgröße ein separater Quelltext erzeugt wurde und Volumenelemente jeder beliebigen Größe, lediglich durch die Pixelabmessung beschränkt, vermessen werden können.

Um nun die Porosität und den Faservolumenanteil eines Volumenelements zu bestimmen, werden wie zuvor beschrieben Quadrate mit der Kantenlänge der betrachteten Volumenelemente der einzelnen Bilder des Bildstapels vermessen. Aus der Liste der Flächenverhältnisse kann wieder das arithmetische Mittel aus der Anzahl der aufeinander folgenden Bilder ermittelt werden, die zum Beschreiben der gesuchten Zellgröße erforderlich sind (je Bild ein Mikrometer). Versuche, den Bildabstand der Aufnahmen durch das Vlies zu verringern, also die Anzahl der Bilder im Stapel weiter zu erhöhen und damit die Auflösung in der Tiefe des Filtervlieses zu verbessern, waren auf Grund der begrenzten Auflösung des Micro-CTs nicht zielführend.

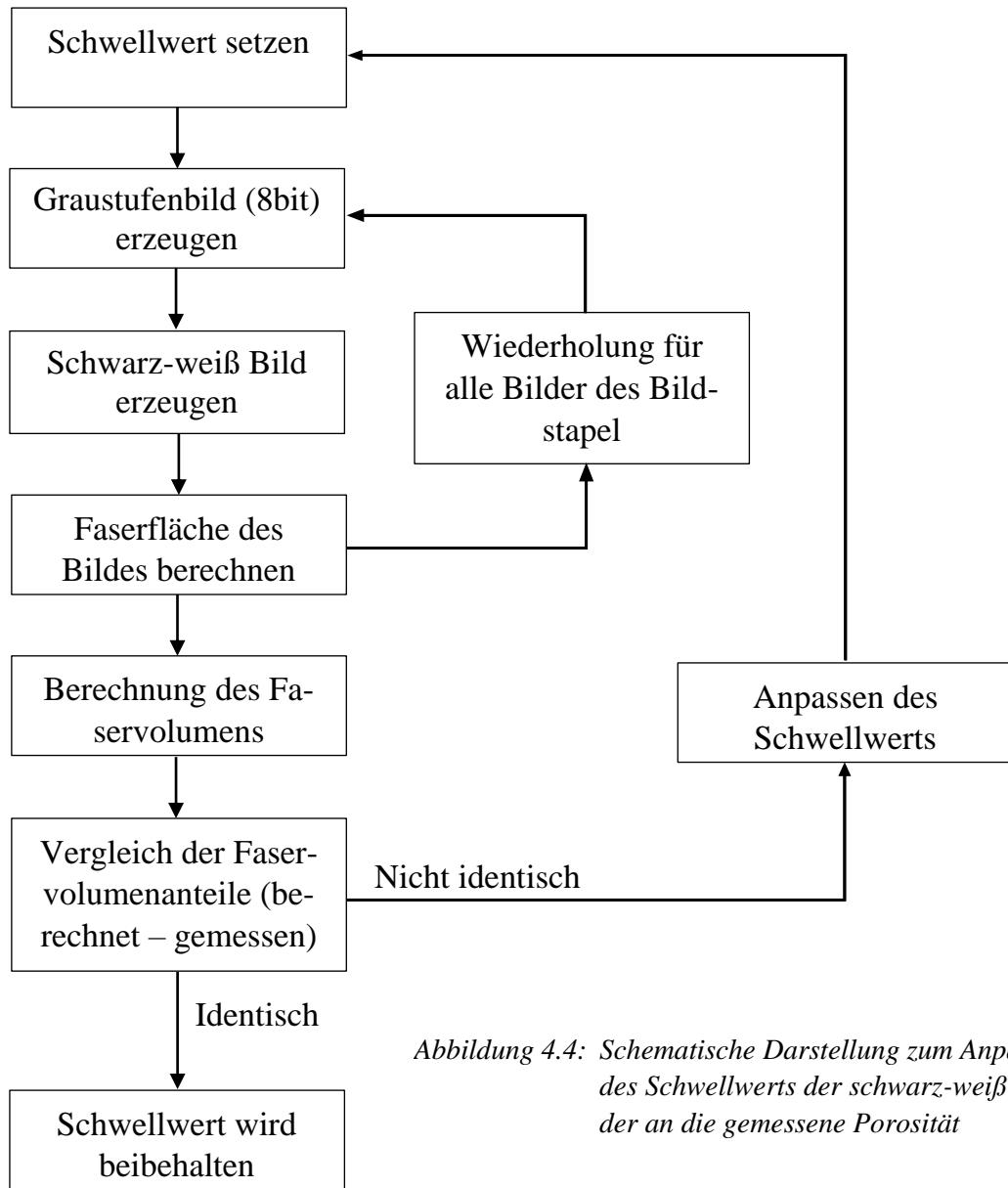


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung zum Anpassen des Schwellwerts der schwarz-weiß Bilder an die gemessene Porosität

4.3 Untersuchungen zur Sättigung, zur Flüssigkeitsverteilung und zur Tröpfchenabscheidung

Zum besseren Verständnis des Sättigungsverhaltens von Filtervliesen auf der makroskopischen Ebene sind verschiedene Experimente durchgeführt worden. Ziel dieser Experimente war es, Informationen über die Flüssigkeitsverteilung im Vlies in Abhängigkeit der Betriebs- und der Materialparameter des Vlieses zu gewinnen. Als übergeordnete Zielsetzung sollten auf Basis der Ergebnisse wiederum Aussagen über die Möglichkeit der Vorhersagbarkeit der Flüssigkeitsverteilung bei bekannten Materialparametern getroffen werden. Das Vorgehen dieser Versuche ist in Abschnitt 4.3.1 detailliert beschrieben. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Sättigung auf die Tröpfchenabscheidung untersucht. Diese Untersuchung spielt auf Grund des guten Verständnisses der Phänomenologie in dieser Studie nur eine untergeordnete Rolle. Die Versuchsbeschreibung dazu wird in Abschnitt 4.3.2 vorgestellt.

4.3.1 Untersuchung zur Sättigung und zur Flüssigkeitsverteilung

Die Untersuchungen zur Flüssigkeitsverteilung auf makroskopischer Ebene im Vlies können innerhalb dieser Studie wiederum in drei verschiedene Versuchspräzedenzen eingeteilt werden. Zuerst wurden mehrere Vliese mit unterschiedlichen Materialparametern untersucht (Versuch 1). Dabei wurde die Sättigung im quasistationären Zustand bestimmt, der wiederum durch einen stationären Differenzdruckverlauf ausgemacht wurde. Beim zweiten Vorgehen wurde die Sättigung in dem zeitlichen Verlauf von Filtrationsbeginn bis zum Erreichen des quasistationären Zustands untersucht (Versuch 2). Zuletzt wurden noch Versuche zur vertikalen Flüssigkeitsverteilung durchgeführt (Versuch 3). Diese Versuche betrachten ebenso den quasistationären Bereich wie auch den zeitlichen Verlauf bis zum Erreichen dieses Zustands. Die Tabelle 4.4 gibt einen Überblick, welche Filtermedien für welchen der drei Versuch verwendet wurden.

Tabelle 4.4: Übersicht der verwendeten Filtervliese bei den verschiedenen Sättigungsversuchen

Bezeich.	Firma	Material	Versuch 1 (stat. Sätt.)	Versuch 2 (zeitl. Verl.)	Versuch 3 (verti. Verl.)
917	H&V	Glas	√	√	√
848	H&V	Glas	√	√	√
MM1044	BinNova	Glas	√	√	√
Pluratexx 5112	Freuden- berg	Polyester	√	×	×
Fibermet 3A0	Pall	CrNi Stahl	√	√	×

Vor der eigentlichen Versuchsreihe zur Sättigung und zur Flüssigkeitsverteilung in Vliesen wurden Vorversuche durchgeführt. Diese hatten das Ziel, den Einfluss von Polymerkaschierungen zur Stabilisierung von Glasfaservliesen auf die Versuchsergebnisse zu beurteilen. Das ist notwendig, da Glasfaservliese schon bei geringer strömungsbedingter Druckdifferenz reißen und daher wie zuvor beschrieben durch Stützstrukturen stabilisiert werden müssen. Untersuchungen von [Pen20] weisen darauf hin, dass bei größeren Stützstrukturen, insbesondere bei benetzenden Medien, Einflüsse auf die Sättigung und die Drainagefilmbildung auftreten. Für diese Vorversuche wurden das 917 und das 848 von Hollingsworth & Vose mit jeweils einseitiger Kaschierung und ohne Kaschierung vermessen. In dieser Untersuchung wurde jede Glasfaserronde vor dem Verkleben gewogen und es wurde ein individuelles Flächengewicht bestimmt. Die Dicke des Vlieses wurde über mehrere Proben gemittelt. Der Grund dafür ist die beschriebene Problematik bei der Bestimmung der Dicke. An dieser Stelle sei angemerkt, dass weder ein signifikanter Unterschied in der Dicke noch in dem Gewicht zwischen dem Vlies mit Kaschierung und dem Vlies ohne Kaschierung desselben Typs messbar waren. Der Grund dafür sind die geringe Dicke der Kaschierung von $10 \mu\text{m}$ bis $30 \mu\text{m}$, verbunden mit den relativ großen Poren. Man kann bei der Kaschierung also eher von einem grobmaschigen Netz sprechen, das mit seinem Gewicht und seiner Dicke in der statistischen Schwankung des Vliesgewichts und der Vliesdicke untergeht. Zum besseren Verständnis zeigt Abbildung 4.5 zwei vergrößerte Ausschnitte einer Kaschierung, die von einem Glasfaservlies entfernt wurde. Links mit 100 facher und rechts mit 300 facher Vergrößerung. An den dicken Polyesterfasern hängen vereinzelt Glasfaservliesbüschel und Fasern, die beim Abtrennen der Kaschierung aus dem Vlies gerissen wurden. Der Unterschied in der Faserstärke lässt sich gut erkennen (rechts) beziehungsweise erahnen (links). Die Polymerfasern der Kaschierung haben dabei einen gemittelten Durchmesser von etwa $d_f = 20 \mu\text{m}$ und die Glasfasern einen nicht zu bestimmenden Durchmesser. Weiter ist gut zu erkennen, dass die Polymerfasern an den Berührungs punkten miteinander

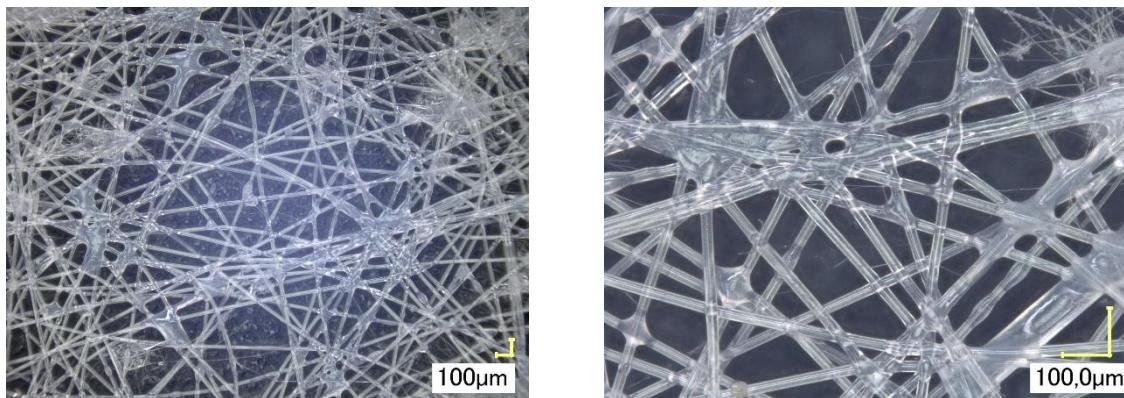


Abbildung 4.5: Vergrößerte Abbildungen (links 100x; rechts 300x) einer Kaschierung, abgelöst von einem Glasfaservlies mit Anhaftungen von Glasfasern

verschmolzen sind und dass die Dicke der Kaschierung nur wenige Faserstärken umfasst.

Nach der Flächengewichtsbestimmung wurden die Vliesronden, wie in Abschnitt 3.1.4 beschrieben, in die beiden Filterscheibenhälften geklebt. Dabei befand sich bei den kaschierten Proben die Kaschierung auf der Strömungsabgewandten Seite. Hinter allen Proben, also auf der strömungsabgewandten Seite, befand sich ein Quadratmaschengewebe mit einer Maschenweite von $w = 0,4 \text{ mm}$ und einer Drahtstärke von $d_d = 0,16 \text{ mm}$. Das Quadratmaschengewebe ist bei den Glasfaservliesen ohne Kaschierung als Stützstruktur notwendig, damit das Vlies nicht reißt und wurde bei den einseitig kaschierten Vliesten ebenfalls mit in die Testscheiben hälften montiert, um die Testbedingungen gleich zu halten. Anschließend wurden die Proben in dem Filterversuchsstand mit Tröpfchen-Aerosol beladen, bis der Differenzdruck seinen stationären Wert annimmt und damit das Erreichen des quasistationären Betriebszustand angezeigt (vgl. Abbildung 2.3). Nach Erreichen dieses Betriebszustands wurde der Aerosolvolumenstrom angehalten und der Versuch beendet. Zur gravimetrischen Bestimmung der Sättigung wurde das Vlies im ersten Schritt mit einem Skalpell aus dem Filterscheibenring geschnitten. Anschließend wurde mit einem Stanzwerkzeug eine Ronde mit einem Durchmesser von $d = 70 \text{ mm}$ aus dem Testmaterial gestanzt. Im letzten Schritt wurde die ausgestanzte Ronde gewogen und aus der Differenz zum Flächengewicht der Probe und mit der mittleren Dicke des Vliestes die Sättigung bestimmt. Dieses Vorgehen wurde trotz der möglichen Verfälschung durch auftretende Flüssigkeitsumverteilung an den Schnittkannten des Vliestes gewählt, da eine Verfälschung der Messung durch Flüssigkeitsanhäufungen am Quadratmaschengewebe als wesentlich größer zu beurteilen war. Es wurden jeweils fünf Versuche für jedes Vlies durchgeführt und der Mittelwert der Sättigung gebildet. Die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen sind in Tabelle 4.5 dargestellt.

Tabelle 4.5: Einfluss der Kaschierung auf das Sättigungsverhalten von Glasfaservliesen

Probenmaterial	Sättigung bei 0,1 m/s Anströmgeschwindigkeit (%)	Sättigung bei 0,2 m/s Anströmgeschwindigkeit (%)
848	51,35	46,7
848 kaschiert	51,69	46,05
917	71,46	61,37
917 kaschiert	71,60	61,52

Die Wiederholgenauigkeit der Einzelmessungen schwankte dabei um weniger als $\pm 2,5 \%$ um den Mittelwert. An den Ergebnissen ist gut zu erkennen, dass die

einseitige Kaschierung keinen beziehungsweise nur einen so geringen Einfluss auf die Sättigung hat, dass er messtechnisch nicht zu erfassen ist. Die prozentual größte Abweichung der gemittelten Werte zwischen einem kaschierten Vlies und einem Vlies ohne Kaschierung liegt bei 0,65 % (848 bei 0,2 m/s) und ist damit geringer als die Wiederholgenauigkeit der Einzelmessungen. Darüber hinaus gibt es keine klare Tendenz, ob die Sättigung mit Kaschierung zu- oder abnimmt. Der Einfluss der Kaschierung auf die Sättigung wurde in dieser Studie als vernachlässigbar betrachtet. Die Versuchsreihe 1 (Sättigungsverhalten verschiedener Filtervliese) wurde ohne Kaschierung durchgeführt. Die Versuchsreihe 2 (Sättigungsverhalten bei zunehmender Beladung) und Versuchsreihe 3 (Vertikale Flüssigkeitsverteilung im Vlies) wurden mit Kaschierung durchgeführt.

Darüber hinaus wurden Vorversuche durchgeführt, die zeigen sollten, ob und inwieweit die Tröpfchenkonzentration einen Einfluss auf die Sättigung im quasi-stationären Betrieb hat. Dafür wurden unterschiedliche Flüssigkeitsvolumenströme eingestellt, die dem Zerstäuber zum Dispergieren der Flüssigkeit zur Verfügung gestellt wurden. Dabei ist zu beachten, dass die Menge der zugeführten Flüssigkeit nicht die Menge der Flüssigkeit ist, die sich vor dem Testfilter im Gasstrom befindet. Beide Flüssigkeitsmengen verhalten sich jedoch in einem bestimmten Bereich weitgehend proportional zueinander. Der Grund für den Unterschied der Flüssigkeitsmenge ist der Verlust durch Impaktion der großen Tropfen im Versuchsaufbau. Zwischen den zugeführten Flüssigkeitsvolumenströmen $\dot{V}_{Sp} = 50 \mu\text{l}/\text{min}$ und $\dot{V}_{Sp} = 400 \mu\text{l}/\text{min}$ konnte jedoch ein weitgehend proportionales Verhalten zur Konzentration vor dem Filter bestimmt werden. Die Messungen zeigen, dass in diesem Bereich etwa 12,5 % des dem Zerstäuber zugeführten Flüssigkeitsvolumens als Tröpfchen im Gas vorliegt. Wird also $\dot{V}_{Sp} = 100 \mu\text{l}/\text{min}$ Flüssigkeitsvolumen zerstäubt, werden davon $\dot{V}_{Sp} = 87,5 \mu\text{l}/\text{min}$ in der Mischkammer abgeschieden und $\dot{V}_{Sp} = 12,5 \mu\text{l}/\text{min}$ dem Filtermedium zugeführt. Dieses Ergebnis wurde über das verwendete Weißlichtspektrometer gemessen, mit der Beladungszeit des Vlieses verglichen und mit der Massenbilanz der Flüssigkeitsströme im Versuchsstand überprüft. Die anschließend bestimmte Sättigung bei einer Filteranströmgeschwindigkeit von $v = 0,2 \text{ m/s}$ schwankt dabei um weniger als $\pm 3 \%$ um den Mittelwert und zeigt keine Tendenz der Zu- oder Abnahme der Sättigung bei Erhöhung der Tröpfchenkonzentration.

Sättigungsverhalten verschiedener Filtervliese (Versuch 1)

Bei der Untersuchung zu dem Sättigungsverhalten verschiedener Filtervliese wurde, wie zuvor beschrieben, die Sättigung nach dem Erreichen des quasistationären Zustands der Filtermedien bestimmt. Dafür wurden Testfilterscheiben, wie in Abschnitt 3.1.4 beschrieben, mit den in Tabelle 4.4 gelisteten Filtermedien gefertigt. Die Glasfaservliese wurden ohne Kaschierung aber mit einer Stützlage aus Quadratmaschengewebe ($w = 0,4 \text{ mm}$; $d_d = 0,16 \text{ mm}$) hinter dem Vlies verklebt. Das verwendete Polymervlies und das Edelstahlvlies wurden ohne

Stützstruktur in die Ringhälften geklebt. Der eigentliche Sättigungsvorgang erfolgte bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten zwischen $v = 0,028 \text{ m/s}$ und $v = 0,5 \text{ m/s}$, ebenso wie bei den Vorversuchen bereits beschrieben, im Filterversuchsstand. Die Aerosolkonzentration lag dabei in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit zwischen $c = 65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $c = 1125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und wurde so eingestellt, dass die zugeführte Flüssigkeitsmasse pro Zeit konstant war. Diese betrug etwa $\dot{m}_{Fl} = 11,25 \mu\text{g}/\text{min}$ und meint die Flüssigkeit, die an der Filterscheibe in Form von Tröpfchen ankommt. Dabei wurden für jede Anströmgeschwindigkeit mindestens drei Versuche durchgeführt. Der Versuch wurde beendet, nachdem der quasistationäre Zustand eindeutig erreicht war. Als sicherer Indikator für das Erreichen wurde der Differenzdruck herangezogen, der einen konstanten Verlauf annimmt. Die gravimetrische Bestimmung der Sättigung erfolgte bei den Glasfaservliesen, ebenso wie bereits bei den Vorversuchen beschrieben, über das Ausstanzen der Vliesronden, um den verfälschenden Einfluss des Stützgewebes zu vermeiden. Bei den Polymervliesen und dem Edelstahlvlies ohne Stützstruktur wurden die verklebten Testfilterscheiben vor und nach dem Versuch gewogen. Damit kann die Verfälschung durch das Ausstanzen und die damit verbundene Materiakomprimierung und die Flüssigkeitsumverteilung vermieden werden. Nach dem Versuch wurde der metallene Filterring mit einem Tuch von möglichen Flüssigkeitsanlagerungen befreit. Aus der Differenz konnte das im Vlies eingelagerte Flüssigkeitsvolumen bestimmt und daraus die Sättigung für die durchströmte Fläche ermittelt werden. Für die zweite beschriebene Methode zur Sättigungsbestimmung wurden im Vorfeld zwei mögliche Fehlerquellen ausgemacht und untersucht.

- Eine mögliche Überbewertung der Sättigung durch Ölanlagerungen an den Klebestellen und dem Metallring der montierten Testfilterscheibe.
- Eine Verfälschung der Ergebnisse durch die Fertigungstoleranz der Klebestellennaht.

Eine geringfügige Veränderung des Durchmessers von 2 mm erzeugt bereits eine Veränderung der Filterfläche von über 4% . Diese Fehlerursache wurde durch eine Fertigungstoleranz von $\pm 0,4 \text{ mm}$ an den Klebestellen auf unter 2% reduziert. Eine Überbewertung der Sättigung durch die erstgenannte Fehlerquelle wurde durch das Entfernen von Flüssigkeitsanlagerungen reduziert. Darüber hinaus wurden mehrere Proben über beide beschriebenen Methoden zur Bestimmung der Sättigung untersucht. Es konnte kein systematischer Fehler ausgemacht werden.

Sättigungsverhalten bei zunehmender Beladung (Versuch 2)

Bei der Versuchsreihe zum Sättigungsverhalten bei zunehmender Beladung wurde die Sättigung nicht erst nach Erreichen des quasistationären Bereichs ermittelt, sondern mehrere Male bis zum Erreichen dieses Betriebszustands. Es sollte also beurteilt werden, wie sich die zunehmende Flüssigkeitsbeladung der Vliese in

Relation zur Differenzdruckkurve verhält. Dafür wurde der Versuch, entweder nach definierten Zeitintervallen oder an bestimmten Bereichen mit Auffälligkeiten im Druckverlauf, angehalten. Anschließend wurde die Testfilterscheibe ausgebaut. Die Sättigungsbestimmung erfolgte über das Wiegen der Filterscheibe in montiertem und verklebtem Zustand ohne Zerstörung oder Schädigung des Vlieses. Für die Glasfaservliese wurde kaschiertes Material verwendet, um eine Verfälschung durch Flüssigkeitsanlagerungen an dem Stützgewebe zu vermeiden. Nach der Gewichtsbestimmung der Testfilterscheibe wurde diese wieder in den Versuchsstand gesetzt und das Experiment wurde fortgeführt. Das bedeutet also, dass der Volumenstrom und die Aerosolkonzentration wieder auf die ursprünglichen Werte eingestellt wurden. Dieser Vorgang wurde bis zum Erreichen des quasistationären Betriebszustands mehrmals wiederholt. Der Versuch wurde mit verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten zwischen $v = 0,028 \text{ m/s}$ und $v = 0,5 \text{ m/s}$ und an den in Tabelle 4.4 gelisteten Materialien wiederholt. Die Konzentration lag je nach Strömungsgeschwindigkeit zwischen $c = 65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $c = 1125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und wurde wieder so gewählt, dass die zugeführte Flüssigkeitsmasse pro Zeit konstant war.

Vertikale Flüssigkeitsverteilung im Vlies (Versuch 3)

Eine weitere noch unvollständig geklärte Frage, die sich zum Sättigungsverhalten stellt, ist die nach der Entwicklung der vertikale Flüssigkeitsverteilung im Vlies. Ob sich also auf makroskopischer Ebene in senkrechter Richtung eine homogene Flüssigkeitsverteilung im Vlies einstellt oder ob es einen gravitationsbedingten Gradienten in der Flüssigkeitsverteilung gibt. Zum Klären dieser Frage wurden die in Tabelle 4.4 aufgeführten Materialien untersucht. Dabei waren die Glasfaservliese nicht kaschiert und wurden mit Quadratmaschengewebe als Stützstruktur verbaut. Zur Versuchsdurchführung wurden die Vliese, wie bereits beschrieben, mit den Testringhälften montiert. Die Testringscheiben wurden, ebenso wie bei dem zuvor beschriebenen Versuch, mit verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten zwischen $v = 0,028 \text{ m/s}$ und $v = 0,5 \text{ m/s}$ und unterschiedlicher Tröpfchenkonzentration von $c = 65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $c = 1125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Filterversuchsstand mit Flüssigkeit beladen. Nach Beendigung des jeweiligen Versuchs wurden die Filterscheiben ausgebaut und die Vliesronden unter Zuhilfenahme eines Skalpells aus dem Metallring gelöst. Weiter wurde aus der Ronde so ein Rechteck geschnitten, bei denen die kürzeren Kanten waagerecht und die längeren Kanten senkrecht zur Einbauposition orientiert waren. Das resultierende Rechteck wurde wiederum in fünf kleinere Rechtecke mit gleichem Flächeninhalt geschnitten, so dass jedes Rechteck mit seiner Breite ein Stück der Höhe des Filtervlieses aus der ursprünglichen Versuchseinbauposition repräsentiert. Für alle Schnitte wurde eine vorgefertigte Schablone verwendet. In Vorversuchen wurde mit gravimetrischen und mikroskopischen Messmethoden die Abweichung der geschnittenen Flächengröße vom berechneten Sollwert untersucht. Dabei wurde bei der

kleinsten Flächengröße eine maximale Messabweichung von $\Delta x \leq \pm 1,5\%$ gemessen. Zur Sättigungsbestimmung wurde zuerst die gesamte Filterronde gewogen und anschließend alle Schnittgeometrien gemeinsam und jeweils einzeln. Aus dem so ermittelten Gewicht konnte weiterführend ein Profil der vertikalen Flüssigkeitsverteilung im Vlies bestimmt werden. Infolge der runden Geometrie des Versuchsaufbaus und der daraus folgenden runden Form der Testscheiben war es jedoch schwierig, den untersten und obersten Bereich des Vlieses mit der rechteckigen Geometrie der Proben zu erfassen. Um diesen Bereich so klein wie möglich zu halten, wurde die kürzere Kante des Rechtecks in einigen Versuchen auf 20 mm reduziert. Daraus ergibt sich ein nicht betrachteter Bereich am oberen und unteren Radius der Scheibe von jeweils unter 1,5 mm. Bei dieser Versuchsreihe wurde die gravimetrische Bestimmung der Sättigung sowohl nach Erreichen des quasistationären Bereichs als auch an bestimmten Punkten von besonderem Interesse vor Erreichen dieses Betriebszustands durchgeführt. Für jeden durchgeföhrten Versuch wurde, auf Grund des zerstörenden Charakters der Untersuchung, eine neue Testfilterscheibe verwendet.

4.3.2 Untersuchung zur Tröpfchenabscheidung bei zunehmender Sättigung

Es gibt zahlreiche Studien, die sich ausgiebig mit der Tröpfchenabscheidung in Filtervliesen in Abhängigkeit der Materialparameter und des Beladungszustands beschäftigen. Einige dieser Studien wurden zuvor schon vorgestellt. Darin zeigt sich, dass der grundlegende Verlauf des Trenngrads bei allen untersuchten Vliesten gleich ist. Dieses gilt für den gesamten Beladungszeitraum bis hin zum quasistationären Bereich. Dabei ist jedoch die Effizienz stark abhängig von den Materialparametern des Vlieses. In Anbetracht der Vielzahl an Studien wird innerhalb dieser Untersuchung nur am Rande auf die Effizienz der jeweiligen Vliese eingegangen. Es wurde jedes der in Tabelle 4.4 aufgeführten Materialien über den Beladungszeitraum hinweg untersucht. Jedoch lag der Schwerpunkt der Untersuchungen zur Tröpfchenabscheidung auf dem Einfluss der Polyesterkaschierung und des Stützgewebes. Ziel war es also herauszufinden, inwieweit die Strukturen zum Stabilisieren von Glasfaservliesten einen Einfluss auf die Tröpfchenabscheidung haben. Dafür wurden unterschiedliche Versuche mit einseitig und beidseitig kaschiertem Glasfaservlies, sowie unkaschiertem Vlies mit Quadratmaschengewebe als Stützgeometrie, durchgeführt. Für die Trenngradbestimmung wurden, wie in Abschnitt 3.1.5 beschrieben, vor und hinter dem Testfilter Probenvolumenströme genommen und zum Partikelzähler geleitet. Die Probenahme erfolgte dabei nicht zeitgleich, sondern abwechselnd nacheinander. Die Sondenköpfe zur Probenahme waren dabei entsprechend der VDI-Richtlinie 2066 [VDI19] zur isokinetischen Messung von Partikeln aus strömenden Gasen gefertigt. Der Probenvolumenstrom des Weißlichtspektrometers betrug dabei $\dot{V} = 5 \text{ l/min}$. Um zu vermeiden, dass bei langsamer Filteranströmgeschwindigkeit und damit kleiner werdendem

Volumenstrom im Strömungskanal die Sondenköpfe zur Probenahme nicht immer größer werden um eine isokinetische Probenahme zu gewährleisten, wurde der benötigte Probenahmevervolumenstrom reduziert. Da eine direkte Verringerung durch das Messgerät nicht möglich war, wurde mit einem MFC partikelfreie Druckluft in die Leitung zwischen Probenahmestelle und Messgerät gegeben. Die gemessenen Partikeln wurden im Anschluss auf die reale Konzentration hochgerechnet. Das Vorgehen wurde an bekannten Konzentrationen beziehungsweise mit dem gleichen Messgerät ohne Verdünnungsstufe validiert. Mit dieser Methodik konnten relativ langsame Filteranströmgeschwindigkeiten $v = 0,028 \text{ m/s}$ vermessen werden, ohne durch zu große Sondenköpfe die Strömung zu stören. Die Anzahl der Messintervalle und die Messzeit pro Intervall vor und hinter der Testscheibe waren variabel und wurden je nach Versuch und begleitenden Versuchsbedingungen so gewählt, dass eine statistisch sinnvolle Partikelanzahl gemessen werden konnte. Die Messintervallanzahl, also die Häufigkeit der Messwiederholungen vor und hinter dem Filter, lag zwischen $n = 3$ und $n = 7$ und die Messzeit zwischen $t_m = 30\text{s}$ und $t_m = 300\text{s}$. Die beschriebenen Versuche zur Tröpfchenabscheidung wurden überwiegend parallel zu denen des Sättigungsverhaltens durchgeführt.

4.4 Untersuchung zum Einfluss der Dicke und der Oberflächenstruktur auf die Kanalbildung

Zum Bestimmen des Einflusses der Dicke von Filtervliesen und der Topografie der Vliesoberfläche auf das Sättigungsverhalten und die Kanalbildung während der Filtration wurden drei verschiedene Materialien untersucht. Alle untersuchten Materialien sind Glasfasermedien, die sich auf Grund ihrer optischen Eigenschaften gut für Durchlichtuntersuchungen eignen. Außerdem weisen diese Vliese infolge ihres Herstellprozesses eine ausgeprägte Inhomogenität in der Oberfläche auf und nehmen den größten Anteil der Medien ein, die in Koaleszenzfiltern verbaut werden. Die für die Untersuchungen verwendeten Filtermaterialien sind in Tabelle 4.6 aufgelistet.

Tabelle 4.6: Übersicht der verwendeten Filtervliese bei den Untersuchungen zum Einfluss der Dicke und Topografie

Bezeichnung	Firma	Material	Flächengew. (g/m^2)	Dicke (mm)	BP/MFP (μm)	Luft Perm. ($\text{l}/(\text{m}^2 \text{s})$)
917	H&V	Glas	163	0,71	35/14	k. A.
848	H&V	Glas	156	0,66	19/6	k. A.
Ausschuss	BinNova	Glas	226	0,98	k. A.	k. A.

Das Filtermedium mit der Bezeichnung Ausschuss, welches für diese Versuche überwiegend verwendet wurde, war ein sehr inhomogenes Ausschussmaterial, das von der Firma BinNova GmbH zur Verfügung gestellt wurde. Aufgrund der fehlenden Herstellerangaben sind die Dicke und das Flächengewicht experimentell ermittelt worden. Es eignete sich durch seine ausgeprägte Inhomogenität in der Oberflächenbeschaffenheit sehr gut für diesen Versuch, der das Ziel hatte, den Einfluss genau dieser Oberflächenbeschaffenheit auf die Kanalbildung zu untersuchen. Insgesamt kann der Versuch in zwei Schritte gegliedert werden. Der erste Schritt besteht darin, ein dreidimensionales makroskopisches Bild der Filtermedien beziehungsweise der Oberfläche zu bekommen, ohne dabei jede Faser einzeln aufzulösen. Also die Erhöhungen und die Senken auf der Vliesoberfläche, welche aus Büscheln von Fasern bestehen, als Volumen zu erfassen und aufzulösen, nicht als geometrische Struktur von einzelnen Fasern. Das Vorgehen zum Erfassen dieser Strukturinformationen wird in Abschnitt 4.4.1 genau beschrieben. Der zweite Schritt ist das Bestimmen der Positionen der Flüssigkeitskanäle durch das Vlies nach Erreichen des quasistationären Zustands. Dieser Schritt und das abschließende Vorgehen zur Auswertung werden in Abschnitt 4.4.2 beschrieben. Zur Durchführung dieser Versuche wurden die Vliese ohne Kaschierlage verwendet, um die Oberfläche ohne störende Kaschierlage vermessen zu können.

4.4.1 Erzeugen des Oberflächen- und des Dickenprofils

Es wurde also die Topografie eines Teilbereichs der Oberfläche der Filtermedien sowohl von der Anströmseite wie auch von der Abströmseite mit dem in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Lichtschnittverfahren bestimmt. Bei der Vermessung der Oberflächen wurden die Ronden der Filtervliese nach dem Ausstanzen aus dem Rollenmaterial, also vor dem Verkleben mit den Filterscheibenhälften, vermessen. Dafür wurde die makroskopische 12-fache Vergrößerungsstufe des Messgeräts gewählt. Diese erzeugt eine gute Vergrößerung, ohne dabei die größeren Fasern der Faserdurchmesserverteilung als Einzelfasern aufzulösen. Die Ronden wurden auf dem Probenträger des Profilometers am Umfang mit Gewichten beschwert. Dieses Vorgehen ist auf Grund der Biegung des Materials infolge des Herstellprozesses und der Lagerung des Vlieses notwendig. Das Filtervlies wird als Rollenware produziert und dementsprechend aufgerollt gelagert. Dabei entsteht eine irreversible Verformung des Vlieses, die nach dem Stanzen der Ronden für die Versuche weiterhin besteht. Diese Verformung spiegelt sich in einer Krümmung der Ronde wider, die dem Radius der Lage auf der Rolle des gelagerten Rollenwarenmaterials entspricht. Durch die Beschwerung mit den Gewichten konnte ein planes Aufliegen der Ronden auf dem Probenträger des Messgerätes erreicht werden. Die Größe des gescannten Bereichs war quadratisch und betrug $55\text{ mm} \times 55\text{ mm}$. Um im späteren Verlauf der Untersuchung ein Dickenprofil aus der Topologie der Oberflächen von An- und Abströmseite derselben Probe zu generieren, ist es

notwendig, die Ergebnisse beider Messungen exakt übereinander legen zu können. Dafür wurden, je nach Versuch, zwei bis vier Löcher mit einem Durchmesser von $d \leq 0,5 \text{ mm}$ an verschiedenen Stellen, senkrecht zur Oberfläche, in das Vlies eingebracht. Diese Positionsmarkierungen befinden sich also beidseitig exakt an derselben Stelle.

Die exakte Bestimmung der Dicke beziehungsweise der mittleren Dicke der jeweiligen Probe ist nicht ganz einfach. Das liegt zum einen daran, dass die Höhe der Probe zur eigentlichen Bezugsebene des Messgerätes nicht exakt bestimmt werden kann. Eine durchgängige Messung des Randbereiches der Probe, um die Referenzebene des Tisches und in derselben Messung die Probenhöhe zu bestimmen ist nicht zielführend. Die Gründe dafür sind die Verfälschung der Höhe im Randbereich der Vliesronde durch die Beschwerung mit Gewichten, wodurch das hochporöse Material im Einflussbereich komprimiert wird. Außerdem wurde die Probe im Randbereich durch das Ausstanzen der Ronde aus dem Rollenmaterial plastisch deformiert. Zum anderen weisen beide Seiten des Vlieses eine zufällige makroskopische Oberflächenstruktur auf, die auf Grund der hohen Porosität des Mediums ein elastisches Deformationsverhalten aufweist. Daher werden die Erhöhungen in der Oberflächenstruktur der Probe beim Positionieren auf den Probenträger durch das Eigengewicht der Probe selbst verformt. Hierbei ist das Eigengewicht jedoch nicht ausreichend, um die Probe flächig auf den Probenträger zu drücken. Die Ronde liegt also auf den zufällig angeordneten höchsten Punkten der Topologie der Oberfläche. Daher wurde die Dicke bestimmt, indem eine bereits mit den Filterscheibenhälften verklebte Testronde vermessen wurde. Beim Positionieren auf dem Messtisch liegen die Flächen der Probe nicht auf, sondern der Metallring der verklebten Filterscheibe. Eine Messung der beiden Oberflächen der Scheibe und das Bestimmen der Referenzfläche des Messtisches sind möglich. Mit diesem Vorgehen können die beiden zuvor beschriebenen Einflüsse vermieden werden. Auch hier wurden die Ergebnisse mit den Herstellerangaben abgeglichen.

Die Ergebnisse des Oberflächenscans werden als ein Raster mit quadratischen Zellen ausgegeben, wobei jede Zelle jeweils eine gemittelte Höhenangabe besitzt. Die Kantenlänge der Zellen ist dabei abhängig von der verwendeten Vergrößerungsstufe. Das Ergebnis der Oberflächenanalyse kann also als eine Matrix dargestellt werden. Diese Ergebnismatrizen wurden als Excel-Datei exportiert und anfangs auch mit Excel weiterverarbeitet. Im späteren Verlauf der Untersuchungen wurde bei der Datenverarbeitung der Einfachheit halber auf das Berechnungsprogramm Matlab zurückgegriffen. Die Weiterverarbeitung der Daten beinhaltet, dass beide gescannten Oberflächenausschnitte des Vlieses, die als Matrizen vorliegen, übereinandergelegt werden müssen. Dabei muss eine von beiden gespiegelt werden. Da jedoch nicht die exakt gleichen Ausschnitte der beiden Seiten betrachtet wurden, mussten die Matrizen an den Positionsmarkierungen ausgerichtet werden. Zusätzlich muss die zuvor bestimmte mittlere Dicke aufaddiert werden. Das

Ausrichten der Matrizen erfolgte händisch, die restlichen Schritte der Datenverarbeitung über Matrizenrechnung.

Das Resultat der Berechnung ist ein Raster, in dem jede Zelle für eine bestimmte quadratische Fläche die über die Zellfläche gemittelte Dicke als Zahlenwert wiedergibt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass mit der Aufsummierung der mittleren Dicke auf die jeweilige Zellenwerte des Rasters nicht die exakte Vliesdicke an der betrachteten Position wiedergegeben wird. Jedoch gibt die Matrix nach Aufsummierung der mittleren Dicke die Relation der verschiedenen Dicken der einzelnen Zellen des Rasters zueinander korrekt wieder. Zur Bestimmung des Einflusses dieser durch die Oberflächenstruktur verursachten Vliesdickenschwankung auf die Kanalbildung ist die korrekte Relation der Dicke der Zellen zueinander entscheidend, nicht der exakte Wert der Dicke an der jeweiligen Position. Eine Darstellung der Ergebnisse kann beispielsweise über ein Farbschema als Dickenbild erfolgen.

4.4.2 Positionsbestimmung der Flüssigkeitskanäle

Nachdem die Oberflächen und das daraus resultierende Dickenprofil der Filterronden ermittelt wurden, sind anschließend mit den vermessenen Ronden die Testfilterscheiben zur Sättigung hergestellt worden. Dabei wurden die Vliesronden mit Quadratmaschengewebe als Stützstruktur verklebt. Als nächstes wurden die Proben dann im Filterversuchsstand mit Flüssigkeit beladen. Die Filteranströmgeschwindigkeit in den meisten Versuchen betrug dabei $v = 0,2 \text{ m/s}$. Vorversuche zeigten, dass bei Geschwindigkeiten ab $v \geq 0,15 \text{ m/s}$ optisch scharfe und gut zu identifizierende Flüssigkeitskanäle entstehen. Außerdem liegt die Versuchsgeschwindigkeit noch in den industrieüblichen Strömungsgeschwindigkeiten ($v \leq 0,25 \text{ m/s}$). Es wurden jedoch auch einige Beladungsversuche bei anderen Anströmgeschwindigkeiten durchgeführt. Das Kriterium zum Beenden des Beladungsvorgangs war in den meisten Fällen das Erreichen des quasistationären Zustands. Es wurde jedoch auch die Sättigungskinetik bis zum Erreichen des quasistationären Betriebs untersucht, wofür der Beladungszustand an bestimmten Punkten der Differenzdruckkurve angehalten wurde. Nach Erreichen des versuchsspezifischen Abbruchkriteriums wurde die Flüssigkeitsbeladung angehalten und die Testscheiben aus dem Versuchsstand genommen. Anschließend wurde das benetzte Vlies, wie bei den zuvor beschriebenen Sättigungsversuchen mit Glasfaservlies ohne Kaschierung, mit einem Skalpell aus dem Ring der Testscheibe getrennt. Von den so aus den Ringen getrennten und mit Flüssigkeit beladenen Ronden wurden anschließend Transmissionlichtbilder mit dem in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Aufbau erzeugt. Abbildung 4.6 zeigt exemplarisch zwei Durchlichtfotos von beladenen Ronden aus den Vorversuchen bei unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeit.



Abbildung 4.6: Durchlichtfotos von zwei flüssigkeitsbeladenen Filterronden (MM1044 einseitig kaschiert) für die Anströmgeschwindigkeiten von 0,05 m/s (links) und 0,425 m/s (rechts)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kanalform bei höherer Geschwindigkeit wesentlich schärfer ist, wobei die hellen Stellen die flüssigkeitsbeladenen Bereiche, also die Flüssigkeitskanäle sind.

Im weiteren Verlauf des Versuches wurden die Bilddateien wie schon bei den CT-Untersuchungen über das Bildverarbeitungsprogramm ImageJ weiterverarbeitet. Das Bild wurde auch bei diesem Versuch wieder in ein Graustufenbild umgewandelt und weiter, über einen frei definierten Schwellwert, in ein schwarz-weiß Bild. Abbildung 4.7 zeigt die beiden in Abbildung 4.6 schon dargestellten Ronden nach der Umwandlung in schwarz-weiß Bilder. Darin sind die Flüssigkeitskanäle als weiße Punkte beziehungsweise Flächenbereiche dargestellt. Der Schwellwert kann dabei frei gewählt werden, so dass nur das Zentrum der Kanäle oder auch die Randbereiche als weiße Fläche markiert werden. Die linienförmigen Flüssigkeitsansammlungen im Filtermedium entstehen, wenn das Vlies vor dem Versuch geknickt wird. Das geschieht meistens bei der Montage mit den Filterscheibenhälften. Dieser Effekt ist bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten dominanter als bei höheren und wird durch die punktuelle Stauchung des Vlieses und die einhergehende Porositätsänderung, die wiederum direkten Einfluss auf die Kapillarkraft hat, hervorgerufen.

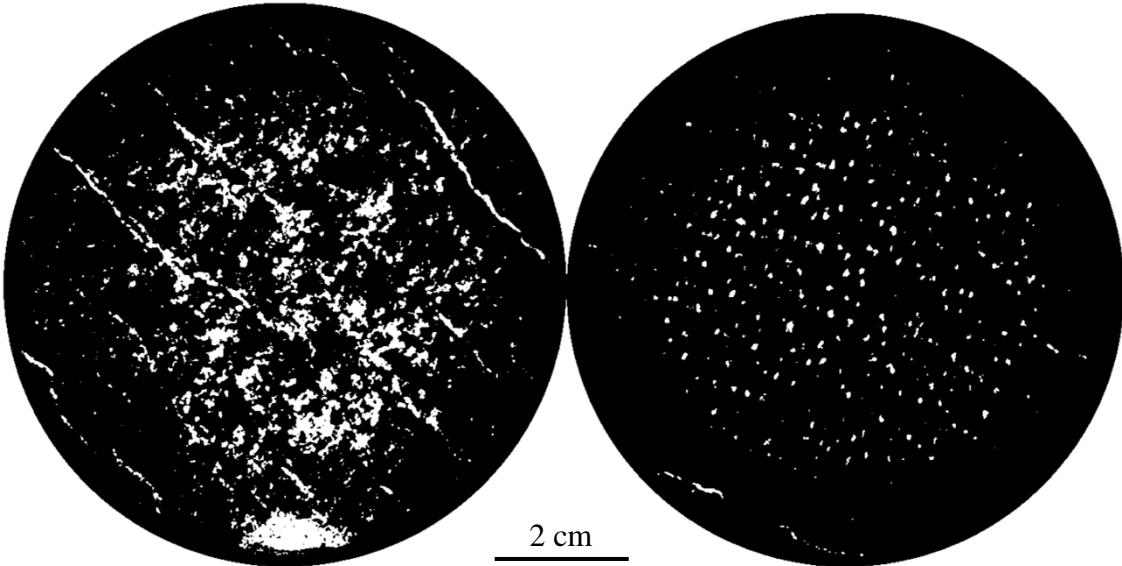


Abbildung 4.7: Resultierende schwarz-weiß Bilder, gewonnen aus den Durchlichtfotos (MM1044 einseitig kaschiert) für die Anströmgeschwindigkeiten von 0,05 m/s (links) und 0,425 m/s (rechts)

Zur Validierung der Bildpositionierung wurden die Koordinaten einiger Kanäle über die bekannte Pixelgröße horizontal und vertikal bestimmt. Anschließend konnte die Position mit der in Abschnitt 4.4.1 ermittelten Dicke des Vlieses an derselben Position abgeglichen werden. Für eine weitere automatisierte Auswertung der Daten wurde eine Kombination aus Excel und ImageJ verwendet. Diese Kombination ermöglichte es, eine große Anzahl an Flüssigkeitskanälen mit den zuvor bestimmten regionalen Dicken des Vlieses abzugleichen. Außerdem wurden bei der weiterführenden Darstellung die Farbschema-Karten des Dickenprofils und die bearbeiteten Durchlichtbilder des Sättigungsprofils übereinander gelegt, um so eine visuelle Auswertung zu ermöglichen.

5 Resultate und Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen vorgestellt. Die Ergebnisse werden in derselben Reihenfolge präsentiert wie zuvor schon bei der Beschreibung zur Durchführung der Versuche (Abschnitt 4). Zunächst werden in Abschnitt 5.1 die Untersuchungsergebnisse präsentiert, die aus den CT-Untersuchungen gewonnen wurden. Anschließend werden in Abschnitt 5.2 die Resultate der Sättigungsversuche und der Tropfenabscheidung bei zunehmender Beladung vorgestellt. Und zuletzt, in Abschnitt 5.3, die Ergebnisse zum Einfluss der Vliesdicke auf den Flüssigkeitstransport durch das Vlies.

Es werden in den einzelnen Abschnitten zumeist repräsentative Ergebnisse vorgestellt, um das Verhalten der verschiedenen Vliese möglichst übersichtlich darzustellen. Wenn sich in den Versuchsreihen ein widersprüchlicher Verlauf gezeigt hat, ist das explizit erwähnt. Bei der Verwendung von Diagrammen zur Darstellung von Ergebnissen werden, sofern vorhanden und der Übersichtlichkeit nicht abträglich, Fehlerbalken dargestellt. Als Fehler ist die einfache Standardabweichung des Messwertes herangezogen worden. Darüber hinaus werden die jeweiligen Ergebnisse in den einzelnen Abschnitten diskutiert und es werden mögliche Schlussfolgerungen daraus gezogen. Teile der hier vorgestellten Ergebnisse wurden gemeinsam in den studentischen Arbeiten von Arens [Are21], Kramer, [Kra18], Seuthe [Seu20], Xu [Xu20] und Yu [Yu20] erarbeitet.

5.1 Inhomogenität des Vlieses auf mikroskopischer Ebene

Es wurden insgesamt sechs unterschiedliche Vliese mit der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Methode untersucht. Davon bestanden drei Vliessorten aus Glasfasern, zwei Sorten aus Metallfasern und ein Vlies aus Polyesterfasen. Der Fokus der Untersuchungen lag auf dem Metallfaservlies *Fibermet 30M1* und auf dem Glasfaservlies *MM1044*. Der Grund für diese Auswahl war die Qualität der Aufnahmen. Es hat sich sehr schnell gezeigt, dass die Qualität der Bildauflösung bei kleiner werdenden Strukturen stark abnimmt. Dieses Verhalten war bei einer nominellen Volumenelementauflösung des Computertomografen von etwa 500 nm (Herstellerangabe) zu erwarten. Das *Fibermet 30M1* hatte von allen untersuchten Materialien die größte Struktur und ließ sich mit dem CT am besten untersuchen. Abbildung 5.1 zeigt zwei Darstellungen des *30M1*. Auf der linken Seite ein Bild der gesamten Probe und auf der rechten Seite eines von der Oberfläche. Dabei ist das *30M1* das einzige mehrlagige Filtervlies, welches in dieser Arbeit untersucht wurde.

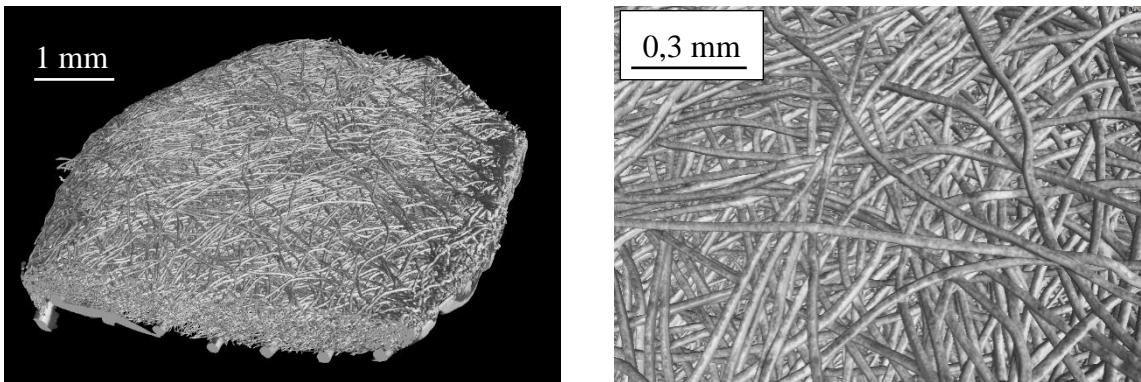


Abbildung 5.1: Dreidimensionale Darstellungen der CT-Aufnahmen des Fibermets 30M1, der ganzen Probe (links) und eines vergrößerten Probenausschnitts (rechts)

In der Abbildung 5.1 sind die Fasern gut zu erkennen und deren Darstellung ist einwandfrei. Das Material ist ein zweilagiges Vlies mit Stützstruktur und hat damit zwei unterschiedlich strukturierte Bereiche. Betrachtet man die Stützstruktur als eigenständigen Bereich, hat das Material demnach drei unterschiedlich strukturierte Bereiche. Abbildung 5.2 verdeutlicht das beschriebene Prinzip des mehrlagigen Vlieses noch einmal mit einem Schnittbild der CT Aufnahmen des *Fibermet 30M1*.

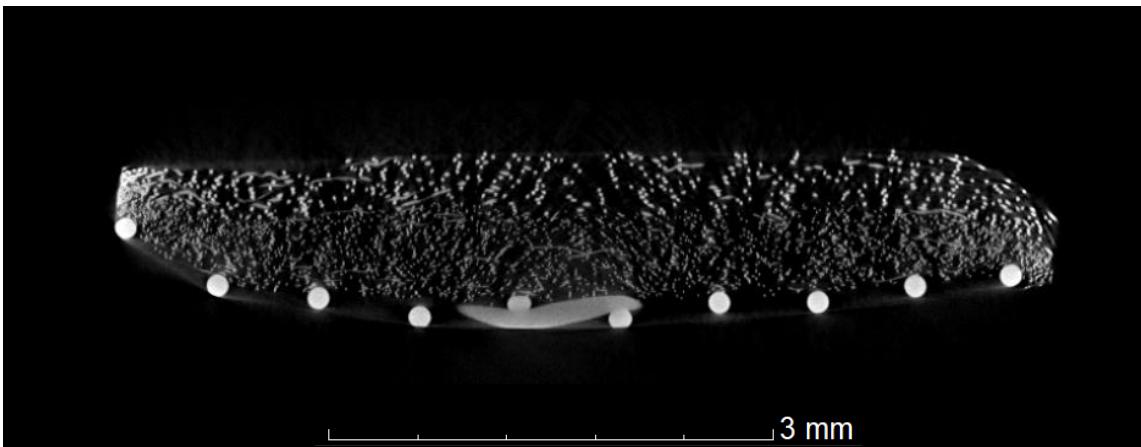


Abbildung 5.2: Schnittbild der CT-Aufnahmen des Fibermets 30M1

In der Darstellung ist der vom Hersteller gewählte Aufbau des Materials gut zu erkennen. Oben ist das größer strukturierte Fasermaterial, was auch in Abbildung 5.1 zu sehen ist. Diese Vliesschicht hat einen mittleren Faserdurchmesser von etwa $d_f \approx 25 \mu\text{m}$. Das mittlere feiner strukturierte Material hat einen Faserdurchmesser von circa $d_f \approx 15 \mu\text{m}$ und ist in der Aufnahme ebenso sauber dargestellt wie die obere Lage. Das Quadratmaschengewebe auf der Unterseite des Materials dient als Stützstruktur während der Filtration und ist mit dem Vlies versintert. Im Gegensatz zu diesen recht guten Aufnahmen steht zum Beispiel das Glasfaservlies 848.

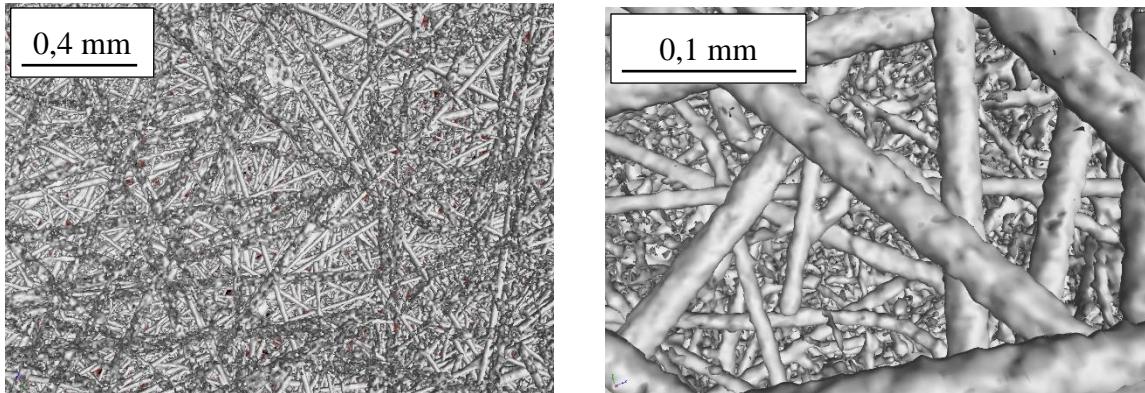


Abbildung 5.3: Dreidimensionale Darstellungen der CT-Aufnahme des Glasfaservlieses 848, ein vergrößerter Ausschnitt (links) und ein stark vergrößerter Ausschnitt (rechts)

Abbildung 5.3 zeigt zwei CT Aufnahmen als 3D Darstellung des Glasfaservlieses 848 mit zwei unterschiedlichen Vergrößerungen. Es ist auf beiden Bildern zu sehen, dass die Kaschierung mit einer Faserstärke von etwa $d_f \approx 15 \mu\text{m}$ noch recht gut dargestellt ist. Der Blick in die Tiefe des Vlieses jedoch zeigt, dass die Glasfasergeometrie nicht vollständig aufgelöst werden kann. Um dieses noch zu verdeutlichen, ist in Abbildung 5.4 eine Darstellung der Aufnahme aus dem Inneren des Glasfaservlieses gezeigt.

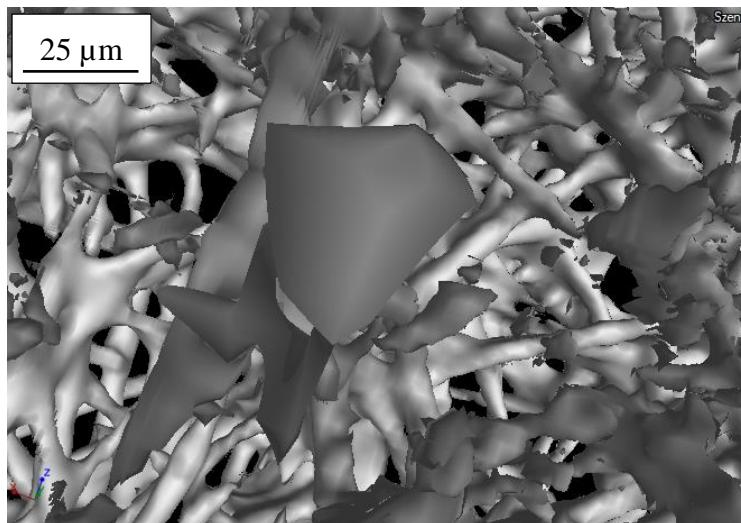


Abbildung 5.4: Dreidimensionale Darstellungen der CT-Aufnahme des Glasfaservlieses 848 aus dem Inneren des Materials

Darin sind deutlich eine Vielzahl an Anomalien und Fehlern in der Vliesstruktur erkennbar. Betrachtet man weiterführend die aus den Aufnahmen erzeugten Bilder der Bildstapel, anhand derer anschließend die Analyse durchgeführt werden soll, ist auch darin das Problem der Auflösung im unteren Mikrometerbereich und darunter ersichtlich.

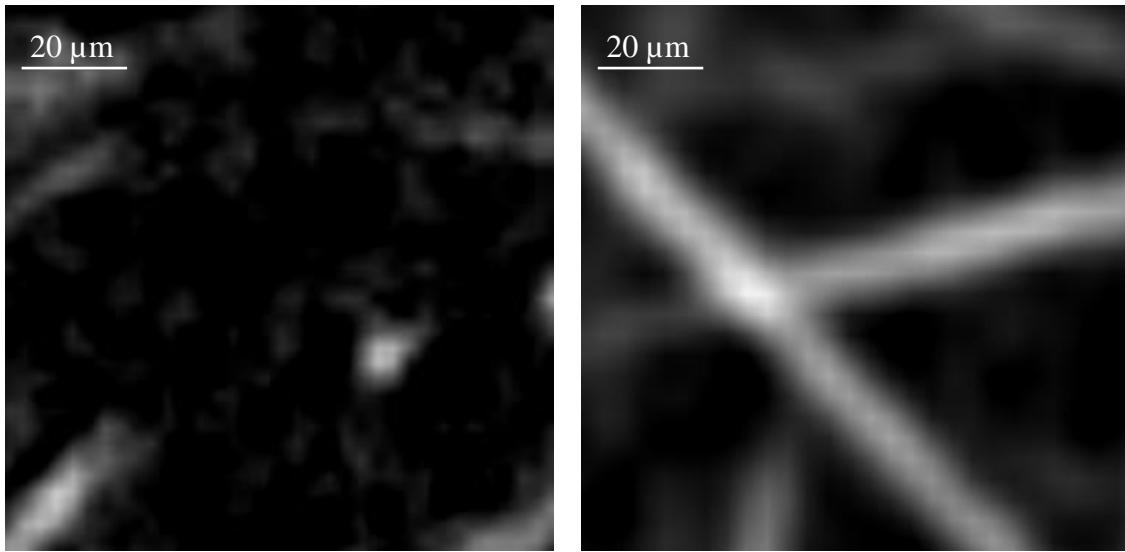


Abbildung 5.5: Zwei zufällig gewählte Bilder aus den Bildstapeln, die aus den CT- Aufnahmen gewonnen wurden, das Glasfaservlies 848 (links) und das Metallfaservlies 30M1 (rechts)

Abbildung 5.5 zeigt auf der linken Seite ein zufällig gewähltes Schnittbild aus der Mitte des Glasfaservlieses 848 und auf der rechten Seite aus dem Metallfaservlies 30M1. Die Bilder sind jeweils aus einem Bildstapel entnommen, wie er erzeugt wird, um die Zellporosität der Vliese zu bestimmen. In Abschnitt 4.2 wurde das Vorgehen genau erläutert. Die Bilder zeigen eine vergrößerte Aufnahme, wobei die Größe der betrachteten Bereiche $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ beträgt. Auch in dieser Darstellung ist zu sehen, dass die feinen Strukturen des Glasfasermediums nicht sinnvoll aufgelöst sind. Es lassen sich hellere Flecken und Bereiche ausmachen, die nicht als Fasergeometrie dargestellt werden. Das Bild auf der rechten Seite mit der Aufnahme des Metallfaservlies 30M1 weist hingegen Strukturen auf, die eindeutig gut aufgelöste Fasergeometrien widerspiegeln.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Micro-Computertomografie als Messtechnik für Strukturen im unteren Mikrometerbereich nur schwierig einzusetzen ist. Bei Strukturen im Submikronbereich stößt das Verfahren an seine Grenzen. Hinzu kommt, dass Glasfaservliese üblicherweise eine polydisperse Faserdurchmesserverteilung besitzen. Daher kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob Fasern im nanoskaligen Bereich vorhanden sind und falsch oder gar nicht gemessen werden, auch wenn die CT-Aufnahme des Vlieses augenscheinlich gut aussieht. Bei Metallfasern und Polyesterfasern sieht das anders aus. Vliese aus diesen Materialien besitzen üblicherweise eine engen Verteilung. Hinzu kommt, dass Metallfasern gegenwärtig im industriellen Umfang nicht im Submikronbereich hergestellt werden können. Für die Untersuchungen mit den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Methoden wurden also das *MM1044* und das *Fibermet 30M1* herangezogen. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf dem Glasfaservlies, da Medien mit vergleichbaren

Merkmale üblicherweise in industriellen Koaleszenzfiltern zum Einsatz kommen. Eine weitere Schwierigkeit stellt die mehrlagige Struktur des Vlieses aus Metallfasern dar. Diese Eigenschaft macht die Bestimmung der Zellpermeabilität für verschiedene Zellgrößen sehr schwierig. Für alle Filtermedien aus Vlies gilt, dass bei kleiner werdender betrachteter Probengröße die Schwankungsbreite der Porosität zunimmt. Das bedeutet, dass bei der Zerlegung des Vlieses in sehr kleine Volumenelemente derselben Abmessung die Porosität jedes Elements stark unterschiedlich sein kann. Im Gegensatz dazu stehen sehr große Volumenelemente, bei denen die Porosität im Vergleich sehr nah beieinander liegt. Das Diagramm in Abbildung 5.6 zeigt die Summenverteilung des Faservolumenanteils der analysierten Zellen bei verschiedenen Zellgrößen des Glasfaservlieses. Also die kumulierte Häufigkeit der Zellen einer Faservolumenanteilklassse in Prozent. Als Formel ausgedrückt die Menge aller Zellen mit einem Faservolumenanteil $\leq \alpha_i$ geteilt durch die Menge aller analysierten Zellen. Die Anzahl der analysierten Zellen hängt dabei von deren jeweiliger Größe ab. So wurden bei Zellvolumen von $V = (10 \mu\text{m})^3$ etwa $n = 1.000.000$ Zellen analysiert, bei einem Zellvolumen von $V = (100 \mu\text{m})^3$ nur noch knappe $n = 100$ Zellen. Beides entspricht einem Gesamtvolumen von etwa $V = 1 \text{ mm}^3$. Der limitierende Faktor für die mögliche Zellanzahl ist das Vliesvolumen, welches aus den CT-Daten gewonnen werden kann. Der Mittelwert des Faservolumenanteils aller Zellen derselben Größe in allen Größenbereichen lag bei jeweils $\alpha = 8 \%$ und entsprach dem zuvor bestimmten Faservolumenanteil des Vlieses.

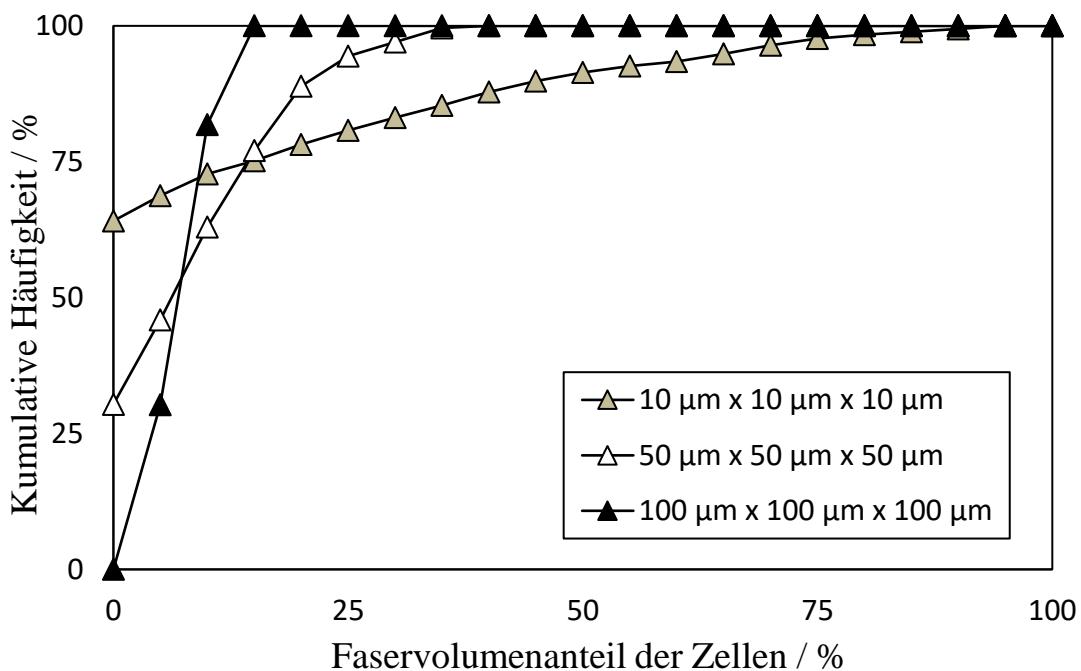


Abbildung 5.6: Summenverteilungen des Faservolumenanteils der analysierten Zellen bei verschiedenen Zellgrößen des Glasfaservlieses (MM1044)

In den Verläufen der Summenverteilungen des Faservolumenanteils ist das zuvor beschriebene Verhalten klar zu erkennen. Mit steigender Zellgröße steigt auch die Homogenität der Verteilung. Dieses Verhalten lässt sich an den unterschiedlichen Steigungen der Graphen erkennen. Je steiler der Anstieg, um so homogener die Faservolumenanteilverteilung beziehungsweise die Porosität. Bei der größten betrachteten Zelle mit einer Kantenlänge von $100 \mu\text{m}$ ist aus dem Diagramm abzulesen, dass etwas mehr als 25 % der Zellen einen Faservolumenanteil unter 5 % haben. Ungefähr 50 % haben einen Faservolumenanteil zwischen 5 % bis 10 % und die restlichen circa 20 % der Zellen liegen bei einem Faservolumenanteil zwischen 10 % bis 15 %. Betrachtet man die kleinsten Zellen mit einer Kantenlänge von $10 \mu\text{m}$, zeigt sich ein wesentlich flacherer Verlauf des Graphen, der jedoch bei 60 % auf der Ordinatenachse beginnt. Die hohe Anzahl an Zellen ohne Faservolumenanteil war bei einer Kantenlänge in der Größenordnung, die nicht weit über dem Faserdurchmesser der größten Fasern des Vlieses liegt, zu erwarten.

Das untersuchte Metallfaservlies verhält sich in den Verläufen der Summenverteilungen ebenso wie das Glasfaservlies, das oben exemplarisch dargestellt ist. Das Vlies besteht jedoch, wie anhand von Abbildung 5.2 erläutert, aus zwei Lagen. Dieser Aufbau macht eine Darstellung wie im zuvor gezeigten Diagramm nicht sinnvoll. Darüber hinaus ist eine Anpassung des Schwellwerts auf die Porosität des Vlieses bei der Umwandlung in schwarz-weiß Bilder nur schwierig möglich (vgl. Abschnitt 4.2).

Insgesamt ist es mit dieser Methode der Strukturanalyse also möglich, die Porositätsverteilung eines Filtervlieses auf mikroskopischer Ebene zu erfassen und in ein Rechenmodell zu implementieren. Maßgebend ist dabei die Auflösung des Messverfahrens. Neben der Auflösung ist es eine weitere Schwierigkeit, ausreichend Messdaten von einem Material zu generieren, um eine statistische Sicherheit in der Verteilung zu gewährleisten. Da die Position der Zellen in dem Vlies ebenso wie deren Porosität bekannt ist, kann mit dieser Methode, wie in dem in (Abschnitt 1.2) beschriebenen und an der Arbeit von [Sch93] angelehntem Modell, eine dreidimensionale Karte der Porositätsverteilung eines Filtervlieses mit beliebiger Auflösung generiert werden, ohne dabei das Vlies fasergenau aufzulösen. Um zukünftig die Porosität im Submikronbereich erfassen zu können, sollte die Möglichkeit untersucht werden, die Porositätsverteilung direkt aus den Messergebnissen des Computertomografen zu gewinnen. Damit könnte der Umweg über die direkte Auflösung der Strukturen vermieden und eine größere Vliesfläche untersucht werden.

5.2 Sättigung, Flüssigkeitsverteilung und Tröpfchenabscheidung

In diesem Abschnitt werden die Resultate der verschiedenen zuvor beschriebenen Versuche zur Sättigung und zur Flüssigkeitsverteilung ebenso wie zur Tröpfchenabscheidung präsentiert. Auch wenn die Ergebnisse teilweise in denselben Versuchen generiert wurden, ist dieser Abschnitt in zwei Unterabschnitte gegliedert. In Abschnitt 5.2.1 sind die Ergebnisse zur Sättigung und zur Flüssigkeitsverteilung im Vlies vom Zeitpunkt des Filtrationsbeginns bis zum Erreichen des quasistationären Betrieb vorgestellt. In Abschnitt 5.2.2 sind anschließend die Ergebnisse zur Tröpfchenabscheidung innerhalb des genannten Betriebszeitraums präsentiert.

5.2.1 Sättigung und Flüssigkeitsverteilung im Vlies

In Abschnitt 4.3.1 wurde bereits beschrieben, dass für die verschiedenen Sättigungsversuche bis zu fünf Materialien untersucht wurden. Weiter wurde erläutert, dass es drei verschiedene Schwerpunkte in der Zielsetzung der Versuche gab, wobei sich die Versuchsdurchführungen jedoch überschnitten. Der Übersichtlichkeit halber ist die Präsentation dieser Ergebnisse ebenfalls in die drei schon bekannten Abschnitte gegliedert.

Sättigungsverhalten verschiedener Filtervliese (Versuch 1)

Bei den Untersuchungen zum Sättigungsverhalten im quasistationären Bereich wurden alle Filtervliese bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten zwischen $v = 0,028 \text{ m/s}$ und $v = 0,5 \text{ m/s}$ untersucht. Der quasistationäre Bereich wurde, wie schon in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, durch den stationären Verlauf des Differenzdrucks ausgemacht. In dieser Arbeit wurde in allen Versuchen, die wiederum alle mit einlagigen Filtermedien durchgeführt wurden, ausnahmslos ein stationärer Verlauf des Differenzdrucks nach Erreichen des quasistationären Bereichs ausgemacht. Auch bei sehr langen Versuchszeiten und hoher Ölbeladung war keine Änderung des stationären Druckverlaufs messbar. Dieses Verhalten steht im Gegensatz zu vergleichbaren Messungen von [Pen21a]. Die Konzentration lag je nach Strömungsgeschwindigkeit zwischen $c = 65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $c = 1125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und wurde so eingestellt, dass die zugeführte Flüssigkeitsmasse pro Zeit konstant war. Abbildung 5.7 zeigt die Ergebnisse aller untersuchten Materialien. Darin ist die Sättigung als Prozentsatz über der Filteranströmgeschwindigkeit aufgetragen.

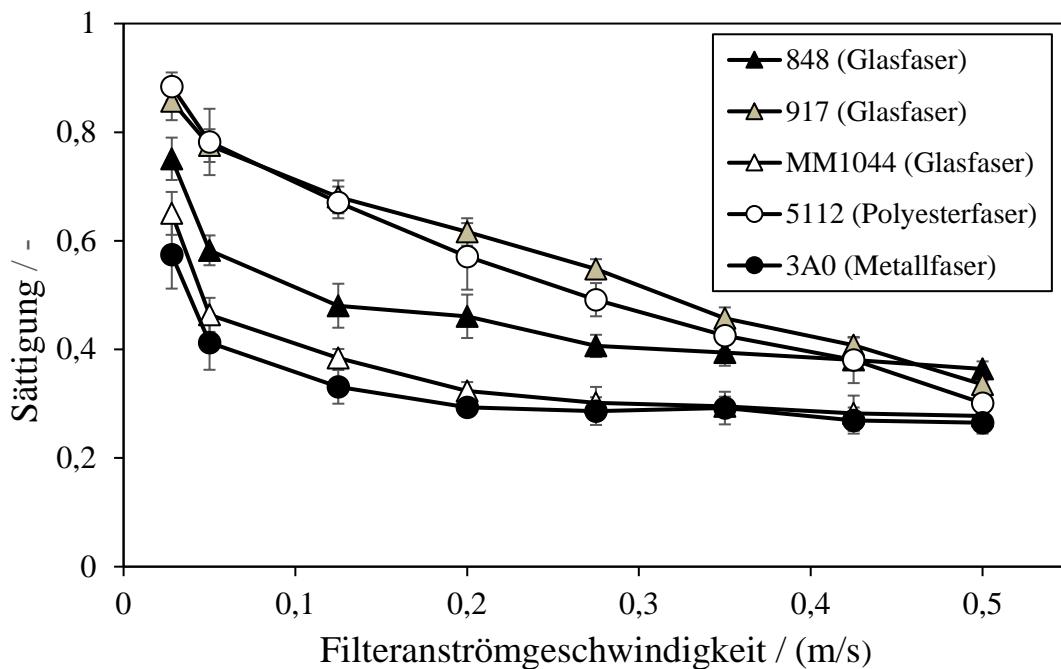


Abbildung 5.7: Sättigungsverhalten der Filtervliese bei unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeit (Glasfaservlies ohne Kaschierung mit Stützgewebe: $w = 0,4 \text{ mm}$; $d = 0,16 \text{ mm}$)

Es ist bei allen untersuchten Vliesen ein ähnlicher Verlauf in den Kurven zu erkennen, der zeigt, dass die Sättigung mit zunehmender Filteranströmgeschwindigkeit abnimmt. Bei niedriger Anströmgeschwindigkeit unterhalb von $v = 0,1 \text{ m/s}$ ist die Abnahme der Sättigung bei zunehmender Strömungsgeschwindigkeit insgesamt stärker ausgeprägt als in den höheren Anströmgeschwindigkeitsbereichen. Bei einer nicht vorhandenen Anströmgeschwindigkeit ($v = 0 \text{ m/s}$), aber einer theoretisch weiterlaufenden Zufuhr von Flüssigkeit, würde die Sättigung bei den verwendeten Testfilterscheiben auf 100% steigen. Bei sehr hohen und grobporen Filtern wären die Höhe des Vlieses und die Porengemometrie die begrenzenden Faktoren. Diese kapillare Steighöhe h_k lässt sich mit der Kapillarität der Vliesgeometrie begründen und mit dem mittleren Porenradius r_k , der Oberflächenspannung σ der Flüssigkeit, der Dichte ρ der Flüssigkeit und der Erdbeschleunigung g der Vliese wie folgt berechnen:

$$h_k = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot g \cdot r_k} \quad (5.1)$$

Für die hier verwendeten Vliese wurden Versuche durchgeführt, bei denen die Ronden mit dem äußeren Radius senkrecht in Flüssigkeit getaucht wurden. Diese Versuche zeigen, ebenso wie die Berechnungen, dass eine 100% Sättigung erreicht wird. Die berechnete kapillare Steighöhe beträgt bei den untersuchten Vliesen mehrere Meter. Steigt die Strömungsgeschwindigkeit über $v = 0,1 \text{ m/s}$, wird die Abnahme der Sättigung geringer und die Kurven weisen im oberen

gemessenen Strömungsbereich nur noch ein geringes Gefälle auf. Dabei ist zu sehen, dass dieses Verhalten bei den untersuchten Vliesen sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. So zeigen das 917 Glasfaservlies und das 5112 Polymehrfaservlies nur einen geringfügig flacher werdenden Verlauf in den höheren gemessenen Anströmgeschwindigkeiten. Die materialspezifischen Eigenschaften der Fasern können als Ursache für den Unterschied der gemessenen Sättigung ausgeschlossen werden, da hier keinerlei Tendenz in Abhängigkeit des Fasermaterials auszumachen ist. Das Ausschlussprinzips lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Ursache für den Unterschied im Sättigungsverhalten die jeweiligen geometrischen Eigenschaften der Vliese sein müssen. Infolge der Komplexität der Wirrfaserstrukturen sowie der begrenzten Möglichkeiten, diese zu erfassen und zu beschreiben, ist eine direkte Zuordnung der Abhängigkeiten von einzelnen Geometrieeigenschaft zur Sättigung schwierig. Wie in Abschnitt 5.1 schon dargestellt, ist das Messen von Faserdurchmesser, Faserlänge, Faserausrichtung und der Porosität beziehungsweise des Faservolumenanteils mit computertomografischen Methoden im kleinen Mikrometerbereich stark fehlerbehaftet und im Submikronbereich kaum noch möglich. Bei Metallfaservliesen und Polyestervliesen ist das Erfassen des Faserdurchmessers mit mikroskopischen Methoden aufgrund der Faserstärken im Mikrometerbereich möglich.

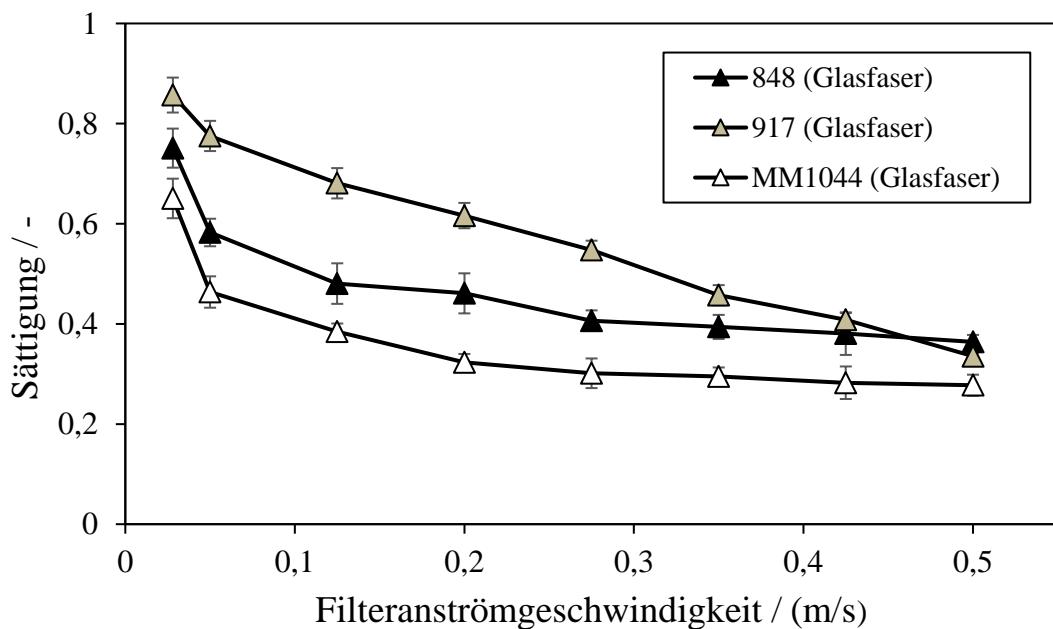


Abbildung 5.8: Sättigungsverhalten der Glasfaservliese bei unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeit (ohne Kaschierung mit Stützgewebe: $w = 0,4 \text{ mm}$; $d = 0,16 \text{ mm}$)

Bei Glasfaservliesen besteht in aller Regel eine polydisperse Faserdurchmesserverteilung, die von den vliestreibenden Unternehmen als streng gehütetes Geheimnis angesehen wird. Betrachtet man nur die Sättigung der drei verschiedenen Glasfaservliese, deren jeweiliger Modalwert der Faserstärkenverteilung im

Submikronbereich beziehungsweise bei dem MM1044 im unteren Mikrometerbereich liegt, jedoch nicht exakt bekannt ist, (Abbildung 5.8) ist zu erkennen, dass auch bei diesen Medien ein starker Unterschied im gemessenen Kurvenverlauf vorliegt.

Beim Betrachten der vorgestellten Kennzahlen aus der kapillarkraftäquivalenten Porengrößenverteilung, dem BP-Durchmesser und dem MFP-Durchmesser zeigt sich, dass das Vlies mit den größten Poren, das 917 ($BP = 35 \mu\text{m}$; $MFP: 14 \mu\text{m}$), bis zu einem Filteranströmgeschwindigkeitsbereich von über $v = 0,4 \text{ m/s}$ die höchste Sättigung aufweist. Zusätzlich ähnelt der Verlauf der Kurve am ehesten der einer abfallenden Linearen und weist über den untersuchten Anströmgeschwindigkeitsbereich den größten Unterschied in der Sättigung auf. Das 848 ($BP = 19 \mu\text{m}$; $MFP: 8 \mu\text{m}$) und das MM1044 ($BP = 25 \mu\text{m}$; $MFP: 8 \mu\text{m}$) weisen im Vergleich zu dem 917 eine wesentlich feinere und zueinander ähnliche Porengrößenverteilung auf. Die Entwicklung der beiden Kurven verläuft ähnlich und zeigt einen regressiven Verlauf, der bei höherer Filteranströmgeschwindigkeit in einen immer flacher werdenden Verlauf übergeht. Die Sättigungskurve des 848 Vlieses liegt mit dem niedrigsten Bubble Point und dem gleichen Wert für den mittleren Poredurchmesser im gesamten Strömungsgeschwindigkeitsbereich über dem MM1044 und bis zur Geschwindigkeit von etwa $v = 0,45 \text{ m/s}$ unter dem Verlauf des 917 Vlieses. Eine direkte Aussage zur Korrelation zwischen den Kennwerten der Porometrie und dem Sättigungsverlauf ist mit den gewonnenen Informationen nicht möglich.

Bezieht man in die Überlegung jedoch die beiden Vliese mit ein, die nicht aus Glasfasern bestehen, zeigt sich eine ähnliche Tendenz im Verhalten. Das 5112 ($BP = 35 \mu\text{m}$; $MFP: 18 \mu\text{m}$) hat mit seinen Kennzahlen aus der Porengrößenverteilung, die dem 917 sehr ähnlich sind, auch einen ebenso ähnlichen Kurvenverlauf. Dabei ist der Modalwert der Faserdurchmesserverteilung des Polyesterfaservlieses jedoch im unteren Mikrometerbereich und damit erheblich größer als der des Glasfaservlieses. Abbildung 5.9 zeigt den direkten Vergleich der beiden Filtermedien.

Betrachtet man die Kennwerte zur Porengrößenverteilung des Metallfaservlieses 3A0 ($BP = 7 \mu\text{m}$; $MFP: < 7 \mu\text{m}$) mit seinem Faserdurchmesser im unteren Mikrometerbereich, zeigt sich, dass es das Vlies mit der feinsten Porengrößenverteilung ist. Abbildung 5.10 zeigt den Sättigungsverlauf im Vergleich mit den beiden untersuchten Glasfaservliesen, die den niedrigsten MFP-Wert aufweisen, dem 848 ($BP = 19 \mu\text{m}$; $MFP: 8 \mu\text{m}$) und dem MM1044 ($BP = 25 \mu\text{m}$; $MFP: 8 \mu\text{m}$).

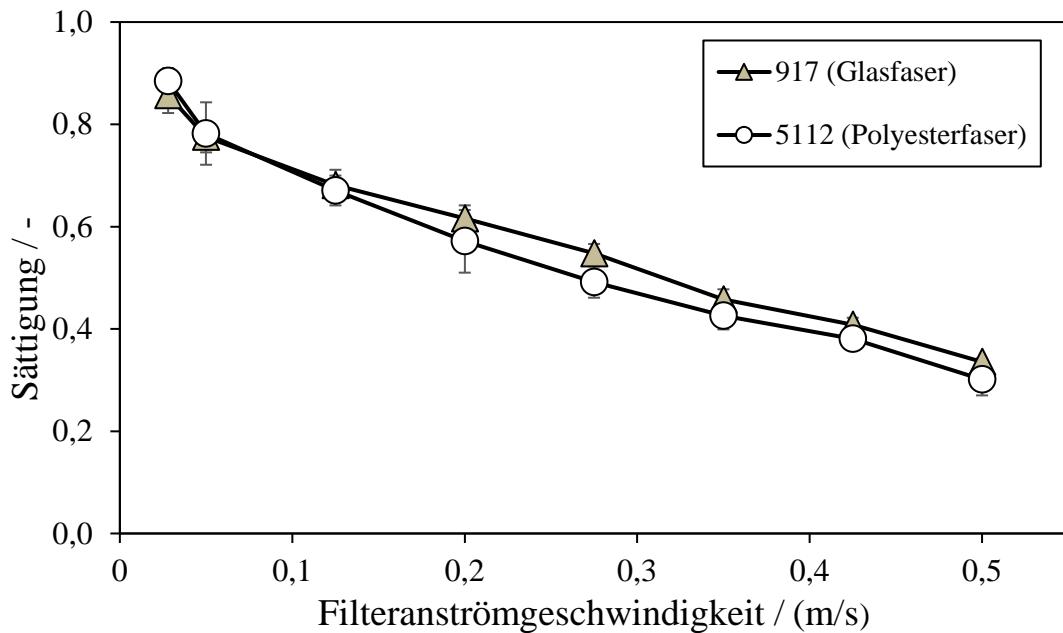


Abbildung 5.9: Sättigungsverhalten des Glasfaservlieses 917 und des Polymehrfaservlieses 5112 bei unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeit (Glasfaservlies ohne Käschierung mit Stützgewebe: $w = 0,4 \text{ mm}$; $d = 0,16 \text{ mm}$)

Es ist zu sehen, dass das Metallfasermaterial über den gesamten Geschwindigkeitsbereich die geringste Sättigung aufweist und einen ähnlichen Kurvenverlauf zeigt wie die beiden Glasfaservliese mit dem vergleichsweise niedrigen MFP-Wert von $8 \mu\text{m}$. Die Ergebnisse der fünf untersuchten Vliese lassen die Mutmaßung zu, dass der Faserdurchmesser ebenso eine Rolle für das Sättigungsverhalten der Vliese spielt wie die Porengrößenverteilung der Vliese. Insbesondere gilt die Tendenz, je feiner die mittlere Porengröße, um so niedriger die Sättigung und umgekehrt. Unter der Annahme, dass die mittlere Porengröße das Resultat der Porosität und des Faserdurchmessers ist und mit sinkendem Faserdurchmesser und sinkender Porosität die mittlere Porengröße ebenfalls kleiner wird, bestätigen die Ergebnisse die gängigen Erkenntnisse einiger weiterer Autoren [Lie85; Ray00]. Beide zeigen in Ihren empirischen Gleichungen den Einfluss des Faserdurchmessers und des Faservolumenanteils, also der Porosität des Vlieses auf den Einfluss der Sättigung im quasi stationären Bereich. Dabei gilt zusammengefasst, dass die Sättigung steigt, wenn die Porosität sinkt. Ebenfalls steigt die Sättigung, wenn der Faserdurchmesser sinkt.

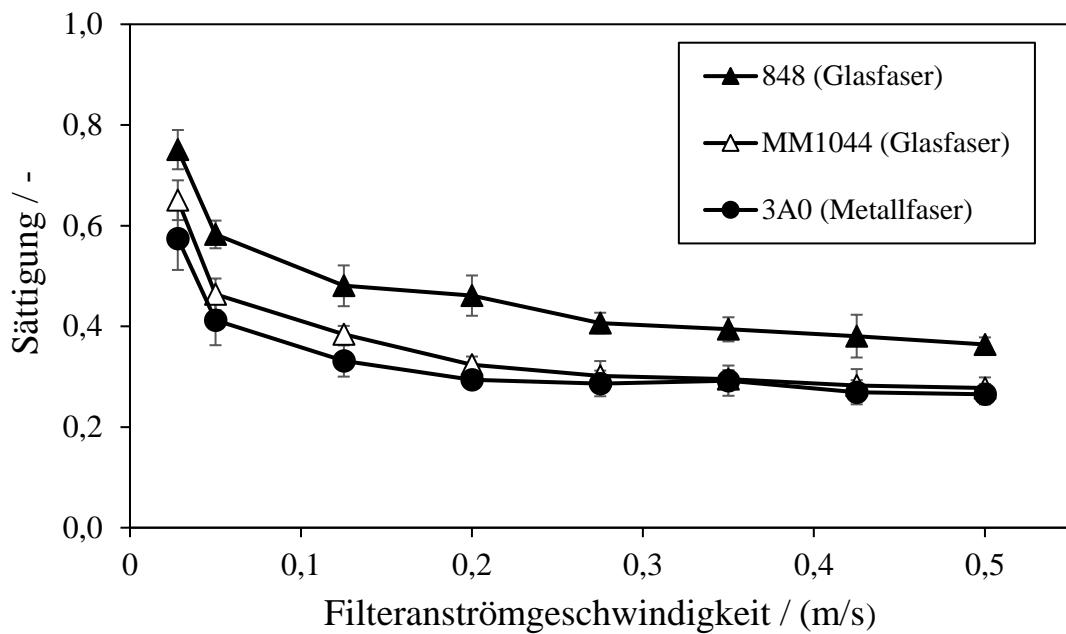


Abbildung 5.10: Sättigungsverhalten des Glasfaservlieses 848 und MM1044 sowie des Metallfaservlieses 3A0 bei unterschiedlicher Anströmgeschwindigkeit (Glasfaservlies ohne Kaschierung mit Stützgewebe: $w = 0,4 \text{ mm}$; $d = 0,16 \text{ mm}$)

Das beobachtete und postulierte Verhalten lässt sich durch das Strömungsprofil im Vlies herleiten. So stehen bei einem Vlies mit vergleichsweise grober Porengrößenverteilung viele Bereiche zur Verfügung, durch die das Gas ohne großen Widerstand strömen kann. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass viele Bereiche im Vlies vorhanden sind, in denen sich Flüssigkeit ansammeln kann, ohne den Scherkräften der Gasströmung direkt ausgesetzt zu sein. Andersherum gilt das Prinzip für Vliese mit feiner Porengröße. Hier stehen weniger große Bereiche für die Durchströmung zur Verfügung und der Volumenstrom muss sich auf viele kleinere Poren aufteilen. Es stehen also weniger Bereiche zur Verfügung, in denen sich die Flüssigkeit sammeln kann, ohne der Scherkraft der Strömung direkt ausgesetzt zu sein. Um an dieser Stelle weitere Interpretationen zu wagen, sollte jedoch die Datenlage erweitert werden. Das beinhaltet sowohl die Informationen über die Porengrößenverteilung der untersuchten Vliese als auch die Untersuchung weiterer Vliese.

Sättigungsverhalten bei zunehmender Beladung (Versuch 2)

Im weiteren Verlauf dieser Studie wurden mit einigen der Filtermedien Sättigungsversuche durchgeführt, welche das Ziel verfolgten, die Flüssigkeitsbeladung im Zeitraum von Betriebsbeginn bis zum Erreichen des quasistationären Zustands zu bestimmen. Das Vorgehen bei diesem Versuch ist in Abschnitt 4.3.1 beschrieben. Die Anströmgeschwindigkeit lag dabei wie schon in den vorherigen Versuchen zwischen $v = 0,028 \text{ m/s}$ und $v = 0,5 \text{ m/s}$. Die Konzentration lag je nach

Strömungsgeschwindigkeit zwischen $c = 65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und $c = 1125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und wurde wieder so gewählt, dass die zugeführte Flüssigkeitsmasse pro Zeit konstant war.

Insgesamt kann gesagt werden, dass sich die Beladungskinetik bei den untersuchten Medien weitgehend gleich verhält. In Abbildung 5.11 ist exemplarisch der Druck- und der Sättigungsverlauf des 917-Glasfasermediums während des Beladungszeitraums aufgetragen. Während des Versuchs lag eine Anströmgeschwindigkeit von $v = 0,2 \text{ m/s}$ und eine Konzentration von $c = 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vor.

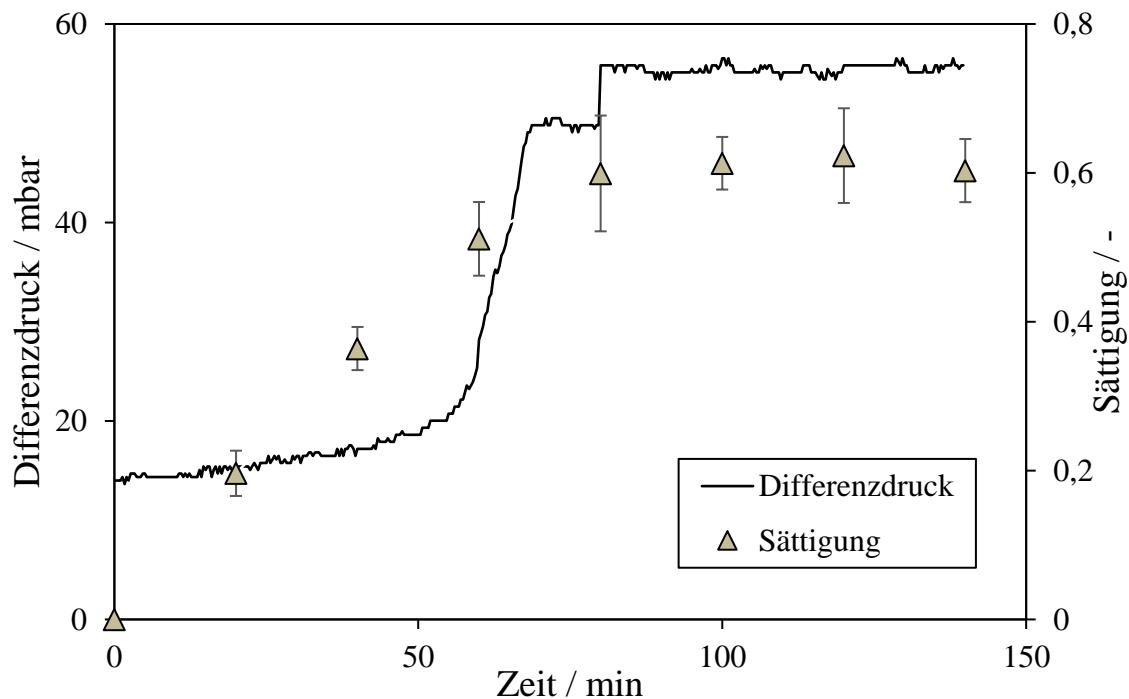


Abbildung 5.11: Druck- und Sättigungsverlauf bei zunehmender Beladung des 917-Glasfaservlieses bei einer Anströmgeschwindigkeit von $0,2 \text{ m/s}$ (Glasfaservlies mit Kaschierung)

Bei dem Experiment wurde das Vlies im Versuchsstand, wie unter Abschnitt 4.3.1 beschrieben, untersucht. Dabei wurde der Versuch in 20 min Intervallen angehalten und das Testfilter gewogen. Das Diagramm zeigt den klassischen Druckverlauf eines benetzbaren Vlieses bis zum fünften Messpunkt nach 80 Minuten. Hier ist zu sehen, dass die Kurve des Differenzdrucks einen Sprung macht und anschließend waagerecht weiter verläuft. Dieser markante Punkt im Diagramm fällt exakt auf den fünften Messpunkt, an dem der Versuch angehalten wurde und das Wiegen des Testfilters stattfand. Bis zum Stoppen des Versuches befand sich der Differenzdruck auf dem niedrigeren Niveau, und direkt nach dem Fortführen des Tests startete der Differenzdruck auf dem höheren Niveau und blieb weiterhin auf dem Level. Auch weitere Unterbrechungen hatten keine Auswirkung mehr auf das neu erreichte Druckniveau. Diese Anomalie trat an dem Messpunkt

beziehungsweise an dem Punkt, an dem die Strömung das erste Mal gestoppt wurde, auf, nachdem der quasistationäre Betriebszustand erreicht wurde. In dieser Studie zeigten alle untersuchten Materialien dieses Verhalten, das sich durch eine Umverteilung der Flüssigkeit in der Wirrfaserstruktur des Vlieses erklären lässt und mit den Ergebnissen von [Kol19a] übereinstimmt. Ein Anstieg der Sättigung und des Druckverlusts im quasistationären Betriebszustand konnten in dieser Studie mit einlagigem Filteraufbau und einer maximalen Beobachtungszeit von fünf Stunden nicht bestätigt werden. Der erste und ausgeprägtere Drucksprung der Kurve ist, wie aus den Grundlagen bereits bekannt, das Resultat der Kraft, die aufgebracht werden muss, um die Flüssigkeit auf der strömungsabgewandten Seite des Vlieses herauszudrücken. Dieses gilt jedoch nur bei benetzenden Medien. Bei phobischen Vliesten verhält es sich umgekehrt und es gibt einen steilen Anstieg in der Druckkurve zu Beginn der Filtration, in der Zeit, in der auf phänomenologischer Ebene die Flüssigkeit entgegen der wirkenden Grenzflächenkräfte in das Vlies gedrückt wird. Bei den untersuchten benetzbaren Materialien hat sich also nach dem Drucksprung eine Flüssigkeitsschicht auf der Rückseite des Mediums gebildet. Wurde die Filteranströmung gestoppt, fielen die Strömungsscherkräfte weg und die Grenzflächenkräfte dominierten. Diese saugten die Flüssigkeitsschicht auf der Rückseite in das Material und sorgten für eine irreversible Umverteilung der Flüssigkeit im Vlies. Diese neu gebildete Flüssigkeitsanordnung ist ursächlich für die Erhöhung des Strömungswiderstands. Weiter zeigten alle Versuche, dass die Neuanordnung der Flüssigkeit nicht dazu führt, dass beim weiteren Betrieb des Filters eine weitere Flüssigkeitseinlagerung stattfindet. Das Sättigungsniveau bleibt also auch bei späteren Messungen auf dem Level vor dem Drucksprung.

Betrachtet man die Messpunkte der Sättigung im Diagramm, ist zu sehen, dass sich der Anstieg der Flüssigkeitseinlagerung bis zu dem Punkt näherungsweise linear verhält, an dem auch der waagerechte Druckverlauf beginnt. Ab dem Erreichen des quasistationären Bereichs bleibt die Sättigung über die Zeit konstant. Es wird also, wie zu erwarten, ebenso viel Flüssigkeit über die Drainage abgeschieden wie durch das Aerosol eingebracht. Abbildung 5.12 veranschaulicht dieses Verhalten noch einmal. Darin sind zwei lineare Trendlinien über die jeweiligen Messpunkte im Bereich des Sättigungsanstiegs und im Bereich des quasistationären Bereichs gelegt. Das bedeutet, dass die Sättigung sich bis zum quasistationären Betriebszustand proportional zur eingetragenen Flüssigkeit und damit zur Versuchszeit verhält. Voraussetzung dafür ist eine gleichbleibende Konzentration bei konstanten Strömungsverhältnissen.

Abbildung 5.13 zeigt den Sättigungsverlauf der vier untersuchten Vliese über die Zeit. Die Anströmgeschwindigkeit und die Konzentration lagen wie zuvor bei $v = 0,2 \text{ m/s}$ und bei $c = 500 \mu\text{g/m}^3$. Die einzelnen Messpunkte des jeweiligen Vliesten sind zur besseren Übersicht mit Linien verbunden.

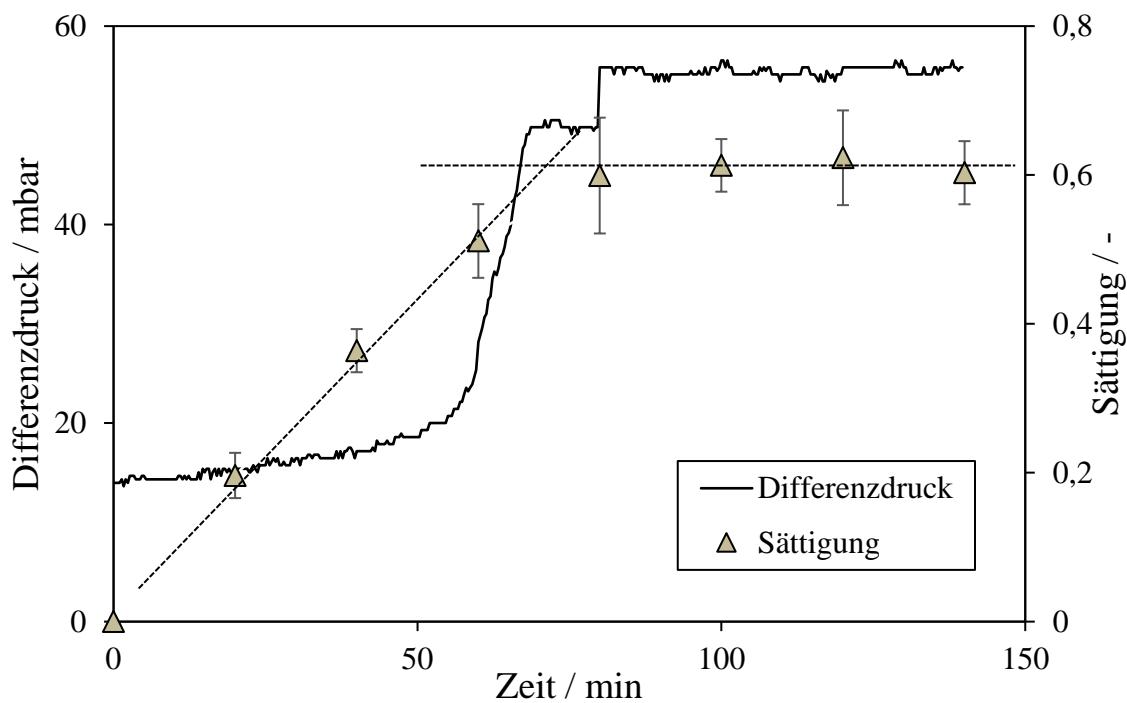


Abbildung 5.12: Druck- und Sättigungsverlauf bei zunehmender Beladung des 917-Glasfaserlieses bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s mit Trendlinien für den Sättigungsverlauf (Glasfaservlies mit Kaschierung)

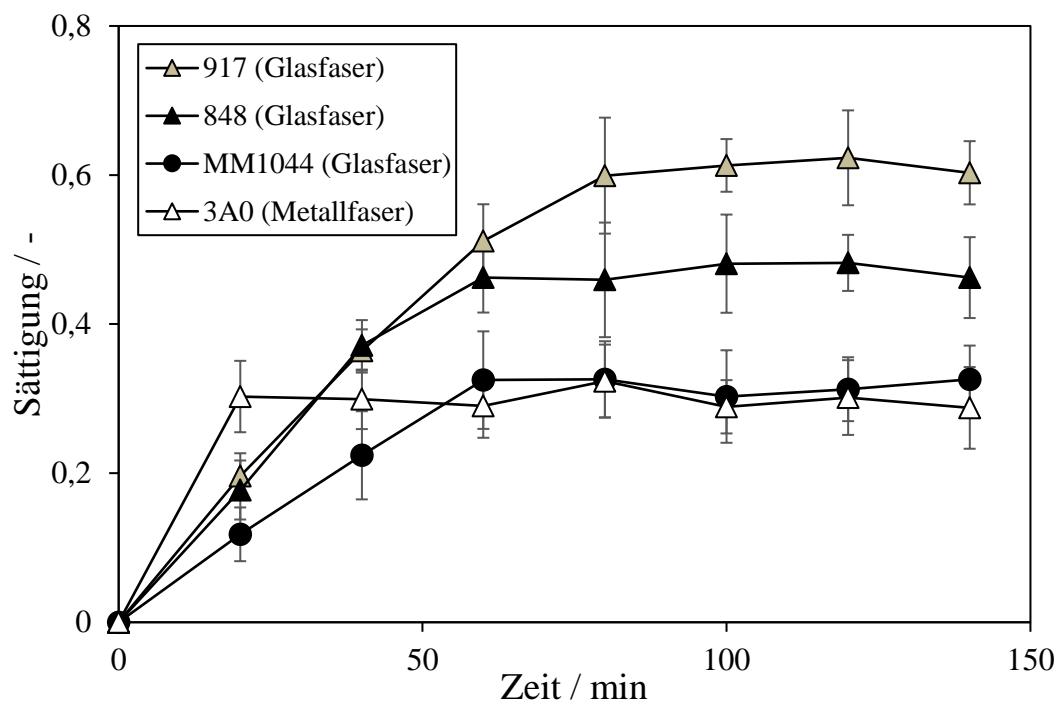


Abbildung 5.13: Sättigungsverläufe bei zunehmender Beladung der untersuchten Vliese bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s (Glasfaservlies mit Kaschierung)

Es ist zu erkennen, dass die getesteten Vliese unterschiedlich schnell ihren Sättigungszustand erreichen. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass die Zeit bis zum Erreichen des quasistationären Bereichs, unabhängig von dem Sättigungsniveau des jeweiligen Vlieses, von Vlies zu Vlies unterschiedlich hoch ist. Dabei lässt sich die Geschwindigkeit an der Steigung der jeweiligen Sättigungsgrade bis zum quasistationären Betriebszustand ablesen. Das Metallfaservlies 3A0 erreicht demnach am schnellsten den quasistationären Zustand und besitzt den steilsten Anstieg. Bei dem MM1044 Glasfaservlies steigt die Sättigung am langsamsten. Der quasistationäre Bereich ist jedoch früher erreicht als bei dem Gasfaservlies 917, da der quasistationäre Sättigungszustand in einem wesentlich niedrigeren Bereich um die 30% liegt. Das 848 Glasfaservlies erreicht den quasistationären Zustand wesentlich eher als das 917 Glasfaservlies, obwohl die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsbeladung nahezu identisch, jedoch das Sättigungsniveau im quasistationären Zustand verschieden ist. Betrachtet man die geometrischen Parameter der Vliese genauer, zeigen sich Korrelationen mit dem Verhalten der Sättigungsgeschwindigkeit. Genau genommen liegt es auf der Hand, dass das Hohlraumvolumen $V_{Hohlr.}$ der ausschlaggebende Parameter für die Sättigungsgeschwindigkeit ist. Je größer der absolute Wert des Hohlraumvolumen ist, umso flacher verläuft die Sättigungskurve. Das Hohlraumvolumen wiederum ist direkt abhängig von dem Faservolumenanteil und dem Volumen des Vlieses. Damit ist es möglich, die Zeit bis zum Erreichen des quasistationären Betriebszustands zu berechnen, sofern das Sättigungsniveau des Zustands vorab bekannt ist. Darüber hinaus müssen die Tröpfchenkonzentration und der Gasvolumenstrom bekannt sein. Tabelle 5.1 zeigt die gemessene Dicke der jeweiligen Vliesronden und die berechneten Werte der Porosität, des Holraumvolumens, der Sättigung und der erwarteten Zeit bis zum Erreichen des quasistationären Zustands. Dabei wurde mit einer Testscheibenfläche von $A = 62,2 \text{ cm}^2$ und einer Dichte von $\rho = 2,23 \text{ g/cm}^3$ für Glasfaser sowie von $\rho = 7,90 \text{ g/cm}^3$ für Edelstahl gerechnet. Die Anströmgeschwindigkeit und die Konzentration wurden wie im hier dargestellten Versuch mit $v = 0,2 \text{ m/s}$ und $c = 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gewählt.

Tabelle 5.1: Berechnete und experimentelle Zeit bis zum Erreichen des quasistationären Zustands ($v = 0,2 \text{ m/s}$; $c = 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Hersteller Bezeichnung	Dicke (mm)	Porosität (%)	Hohlraumvol. (cm^3)	Sättigung (%)	Zeit Ber. (min)	Zeit Exp. (min)
917	0,71	89	3,96	61,6	68	72
848	0,66	89	3,67	46,1	48	47
MM1044	1,1	93	6,36	32,3	58	60
3A0	0,38	68	1,61	29,4	15	17

Vergleicht man die berechneten Werte der Zeit bis zum Erreichen des quasistationären Betriebszustands mit den gemessenen Werten, zeigt sich eine insgesamt gute Vorhersagbarkeit.

Während der Versuche mit den Glasfaservliesen wurden Durchlichtbilder der Ronden erstellt, die in Abbildung 5.14 exemplarisch für das Glasfaservlies MM1044 dargestellt sind. Das erste und das zweite Bild sind während der Beladungsphase entstanden, also in dem Zeitabschnitt, in dem der Differenzdruck linear ansteigt. Das dritte Bild ist in dem Zeitabschnitt entstanden, in dem der Differenzdruck einen steilen Anstieg aufweist, und das vierte Bild in dem Zeitraum nach Erreichen des quasistationären Bereichs. Die zugehörige Sättigung und die Betriebszeit der Versuchsanlage bis zur Bilderstellung sind in Tabelle 5.2 aufgelistet.

Tabelle 5.2: Sättigung zu den Durchlichtfotos vom Glasfaservlies MM1044 an bestimmten Stellen des Druckkurvenverlaufs

Proben Nr.	Zeit (min)	Sättigung (%)
1	30	9,26
2	50	15,56
3	120	38,86
4	150	37,93

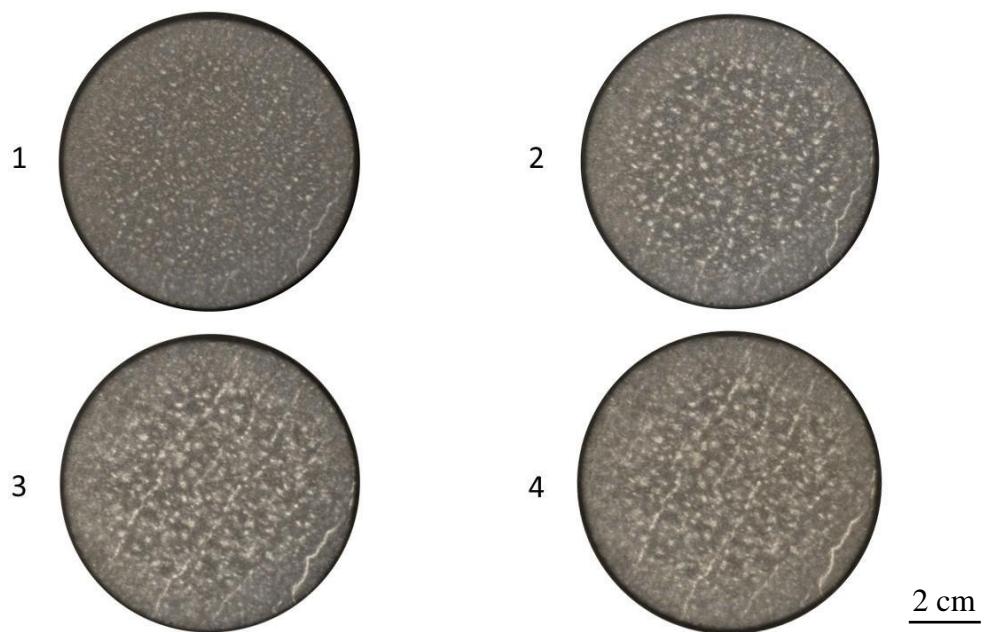


Abbildung 5.14: Durchlichtfotos vom Glasfaservlies MM1044 zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Wie in den Aufnahmen und den zugehörigen Sättigungswerten dargestellt, ergibt sich ein weitgehend proportionaler Sättigungsverlauf über die Beladungszeit bis zum Erreichen des Zeitraums, der durch den steiler werdenden Differenzdruckanstieg gekennzeichnet ist. Zwischen den letzten beiden Aufnahmen (Bild 2 und Bild 3) findet keine weitere Sättigung mehr statt, obwohl die dritte Aufnahme noch in dem Zeitraum des steilen Druckanstiegs und damit vor dem quasistationären Betriebsverhalten entstanden ist. Das wiederum bedeutet, dass ein Sättigungsgleichgewicht bei diesem Versuchsaufbau schon vor dem Erreichen des höchsten Druckniveaus vorliegen muss. Alle untersuchten Glasfasermedien wiesen dieses Verhalten auf. Bei dieser Versuchsdurchführung muss berücksichtigt werden, dass die Strömung für jede Bilderstellung unterbrochen werden muss. Infolge der Unterbrechung findet mutmaßlich eine Umverteilung der Flüssigkeit im Vlies statt, die wiederum durch die Kapillarkräfte angetrieben wird. Dieses gilt vermutlich auch für die Unterbrechungen, bei denen sich das Verhalten nicht direkt aus der Differenzdruckkurve ableiten lässt.

Ein weiteres Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass sich der überwiegende Teil der Positionen, an denen sich die Kanäle ausbilden schon nach kurzer Beladungszeit zeigt. Bei weiterer Beladung verändert sich die Ausdehnung der einzelnen Kanäle. Es ist auf den Durchlichtbildern (1. Bild und 2. Bild) eine deutliche Veränderung in der Ausprägung der einzelnen Kanäle zu erkennen. Es findet jedoch zusätzlich eine weitere Kanalbildung in den Zwischenbereichen der bereits bestehenden Kanäle statt. Alle weiteren Ergebnisse zur Kanalbildung sind in Abschnitt 5.3 präsentiert.

Vertikale Flüssigkeitsverteilung im Vlies (Versuch 3)

In der dritten großen Versuchsreihe zum Sättigungsverhalten wurde die Flüssigkeitsverteilung in vertikaler Richtung untersucht. Das Vorgehen ist in Abschnitt 4.3.1 beschrieben. Auch hier wurde mit Anströmgeschwindigkeiten zwischen $v = 0,028 \text{ m/s}$ und $v = 0,5 \text{ m/s}$ sowie Konzentrationen von $c = 65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $c = 1125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gearbeitet. Abbildung 5.15 zeigt den vertikalen Sättigungsverlauf der drei untersuchten Glasfasermedien. Bei den dargestellten Versuchen lag die Anströmgeschwindigkeit bei $v = 0,2 \text{ m/s}$ und die Konzentration bei $c = 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Messungen wurden nach einer Versuchsdauer von 40 min durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt hatte keines der Medien den quasistationären Zustand erreicht. Die Messungen lagen also bei allen drei Vliesen in dem Zeitraum des linearen Druckanstiegs. Es ist zu erkennen, dass die Flüssigkeitseinlagerung in vertikaler Richtung für alle drei Vliese gleichmäßig verteilt ist. Dieses Verhalten deckt sich mit der Erwartungshaltung und zeigt, dass es keine Verschiebung der Flüssigkeitseinlagerung in Schwerkraftrichtung gibt. Darüber hinaus bestätigt diese Flüssigkeitsverteilung die Untersuchungen von [Kam14a] und [Ray00], die ebenfalls keine Abhängigkeit der Flüssigkeitsverteilung in Schwerkraftrichtung feststellen konnten.

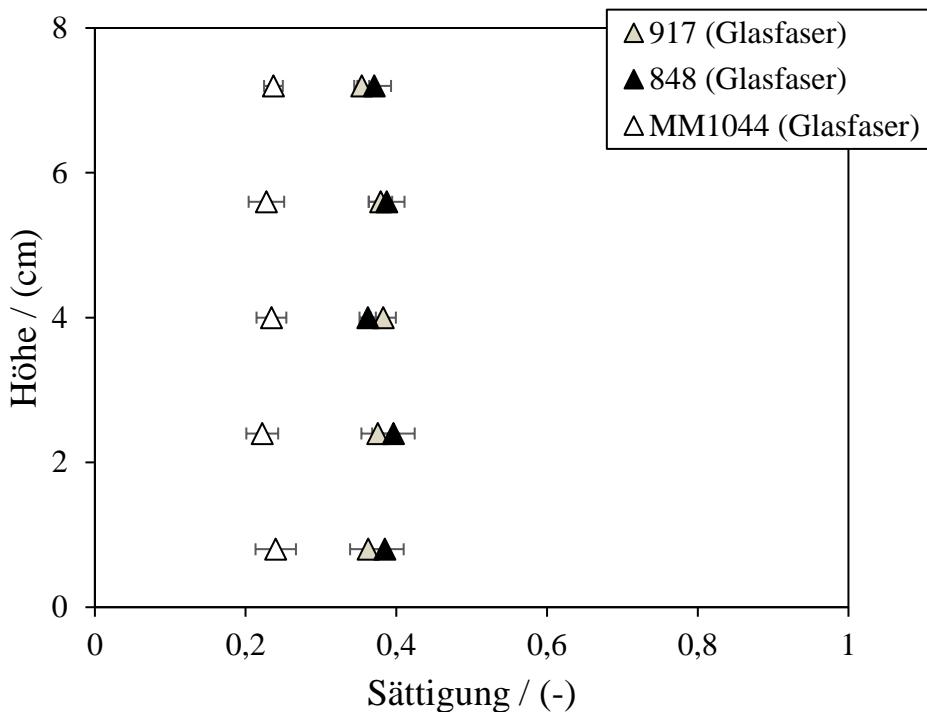


Abbildung 5.15: Vertikaler Sättigungsverlauf der Glasfaservliese (mit Kaschiert) vor dem Erreichen des quasistationären Zustands bei einer Anströmgeschwindigkeit von 0,2 m/s und einer Versuchszeit von 40 min

Die Kapillarität ist in diesem Porengrößenbereich also die vorherrschende Kraft. Dabei fanden die Messung zu einem Zeitpunkt statt, an dem sich die Flüssigkeitskanäle gerade ausgebildet haben und es noch keine Drainageschicht auf der Rückseite des Vlieses gab. Wird die gleiche Messung mit den Vliesten nach dem Erreichen des quasistationären Zustands durchgeführt, sehen die Messergebnisse wie im Diagramm in Abbildung 5.16 aus. Dieses zeigt die Messergebnisse desselben Versuchs nach einer Laufzeit von 140 min, wobei die Proben auf Grund der zerstörenden Messung nicht dieselben sind. Nach dieser Versuchszeit befinden sich alle drei Medien seit mehr als 50 min im quasistationären Betriebszustand. Es ist daher sicher, dass sich der Flüssigkeitsfilm auf der strömungsabgewandten Seite vollständig ausgebildet hat.

Dabei besitzt der Flüssigkeitsfilm während der Filtration in vertikaler Richtung keine gleichbleibende Dicke. Diese nimmt in Gravitationsrichtung stetig zu. Grund dafür ist das gleichmäßige und stetige Hinzukommen von Flüssigkeit durch die Kanäle über die gesamte Filterfläche bei gleichzeitigem Abfließen des Flüssigkeitsfilms auf der Rückseite. Dieses Phänomen zeigt sich besonders deutlich an den unteren beiden Messpunkten. Das Verhalten wird zusätzlich durch die runde Bauform des Versuchstands beziehungsweise der Testscheiben begünstigt. Dadurch fließt der Flüssigkeitsfilm in der unteren Hälfte der Scheibe nicht überall in Richtung der Gravitation ab. Flüssigkeit drängt von dem äußeren Rand der Scheibe in mittlere Regionen der Probe. Daher ist eine Überbewertung der

Sättigung an den unteren beiden Messpunkten möglich. Durch die rechteckige Geometrie der gewogenen Probenstücke und der betrachteten Fläche im mittleren Bereich der Scheibe kann dieser Fehler jedoch verringert werden. Abbildung 5.17 zeigt eine Aufnahme von der Rückseite einer Filterscheibe während eines laufenden Versuchs. Darin ist, rot umrahmt, der ablaufende Flüssigkeitsfilm zu erkennen

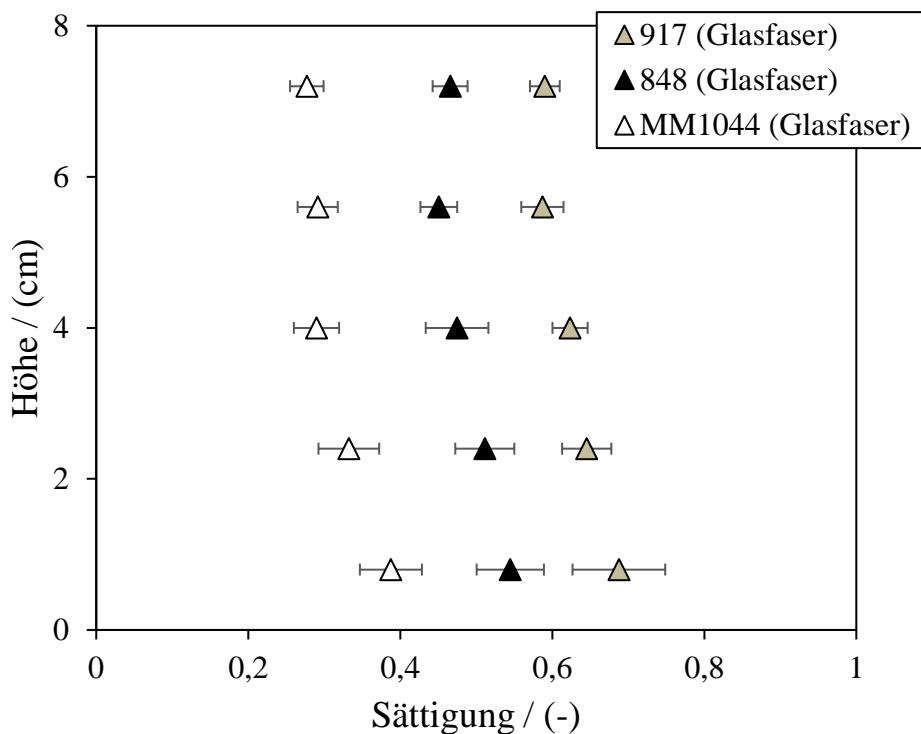


Abbildung 5.16: Vertikaler Sättigungsverlauf der Glasfaservliese (mit Kaschierung) nach dem Erreichen des quasistationären Zustands bei einer Anströmgeschwindigkeit von $0,2 \text{ m/s}$ und einer Versuchszeit von 140 min

In dieser Studie zeigte sich das beschriebene Sättigungsverhalten bei allen untersuchten Aerosolkonzentrationen. Dabei gab es für die Konzentration bei gleichbleibender Geschwindigkeit jedoch jeweils nur zwei Messpunkte, die hier als zugeführte Massenkonzentration pro Minute und damit unabhängig von der Geschwindigkeit mit $35 \mu\text{g}/\text{min}$ und $25 \mu\text{g}/\text{min}$ gewählt wurden. Bei einer theoretischen Betrachtung sollte mit steigender Tröpfchenkonzentration das Flüssigkeitsvolumen pro Zeit ansteigen, welches durch das Vlies transportiert wird. Das Resultat wäre ein gleichmäßiges Anwachsen der Dicke des Flüssigkeitsfilms oder eine höhere Geschwindigkeit des abfließenden Films und das in beiden Fällen bei gleichbleibendem Gradienten in vertikaler Richtung. Beide Verhalten stimmen mit den Messergebnissen überein, die eine Konzentrationsunabhängigkeit des senkrecht zunehmenden Sättigungszustands zeigen. Bei einer größeren Schichtdicke des Flüssigkeitsfilms würde die gemessene Sättigung im quasistationären Bereich bei steigender Konzentration im Rohgas zunehmen. Dieses Verhalten wurde in den

vorherigen Versuchen messtechnisch nicht bestätigt, weshalb bei den hier eingesetzten Konzentrationen von einem schnelleren Abfließen der Flüssigkeitsschicht ausgegangen wird.



Abbildung 5.17: Aufnahme der Rückseite einer Filterscheibe während eines Sättigungsversuchs im quasistationären Betriebszustand

Auch bei den untersuchten Filteranströmgeschwindigkeiten war der beschriebene Effekt bei allen Messungen gegeben. Hier zeigte sich ebenfalls keine Tendenz in der Ausprägung des Phänomens. Jedoch war bei Zunahme der Anströmgeschwindigkeit eine deutliche und optisch wahrnehmbare Veränderung des Flüssigkeitsfilms auf der Rückseite des Filters zu sehen. Es zeigt sich ab einer Geschwindigkeit von $v \approx 0,2 \text{ m/s}$ eine Blasenbildung im unteren Drittel auf der rückseitigen Oberfläche des Vlieses. Bei weiterer Geschwindigkeitserhöhung nahm die Intensität und die Häufigkeit der Blasenbildung stark zu. Dieses Verhalten bestätigt die Annahme des senkrecht sukzessiv anwachsenden Flüssigkeitsfilms und erklärt die industriell übliche Auslegung dieser Filtertypen mit einer maximal zulässigen Anströmgeschwindigkeit von $v \leq 0,25 \text{ m/s}$. Ab diesem Punkt nimmt der Wiedereintrag bereits abgeschiedener Flüssigkeit stark zu.

Verschiedene Untersuchungen bestätigen dieses Drainageverhalten [Kam14a; Wur17]. Insbesondere Studien in denen mehrlagige Aufbauten von Filtermedien untersucht wurden, zeigen den Effekt des Wiedereintritts der Flüssigkeit in das Filtervlies. Auch verschiedene Studien, bei denen der Einfluss von Drainagelagen auf die Filtration untersucht wurde, untermauern diese Ergebnisse [Cha16; Cha17; Cha18]. Insbesondere die Untersuchungen von [Kol19b] zeigen anschaulich die

Flüssigkeitsverteilung der Drainageschicht auf der Strömungsabgewandten Seite des Vlieses.

5.2.2 Tröpfchenabscheidung bei zunehmender Sättigung

Wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, lag der Schwerpunkt der Untersuchungen zur Partikelabscheidung nicht auf der Charakterisierung der untersuchten Filtermedien und dem Einfluss der Betriebsbedingungen, sondern darauf herauszufinden, ob übliche für Glasfasermedien verwendete Stützstrukturen einen signifikant messbaren Einfluss auf die Partikelabscheidung haben. Also ob die hervorgerufene Veränderung des Strömungsfeldes im Filtermedium oder die geometrischen Strukturen die als zusätzliche Kollektoren dienen, einen messbaren Einfluss auf den Trenngrad haben. Ein ausführlicher Überblick über den Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Tropfenabscheidung über den Beladungszeitraum ist in [Pen19a] gegeben. Dabei wurden, wie bei den Voruntersuchungen zur Sättigung, Quadratmaschengewebe mit verschiedenen Drahtstärken und Maschenweiten, sowie einseitig und beidseitig kaschiertes Glasfaservlies, untersucht.

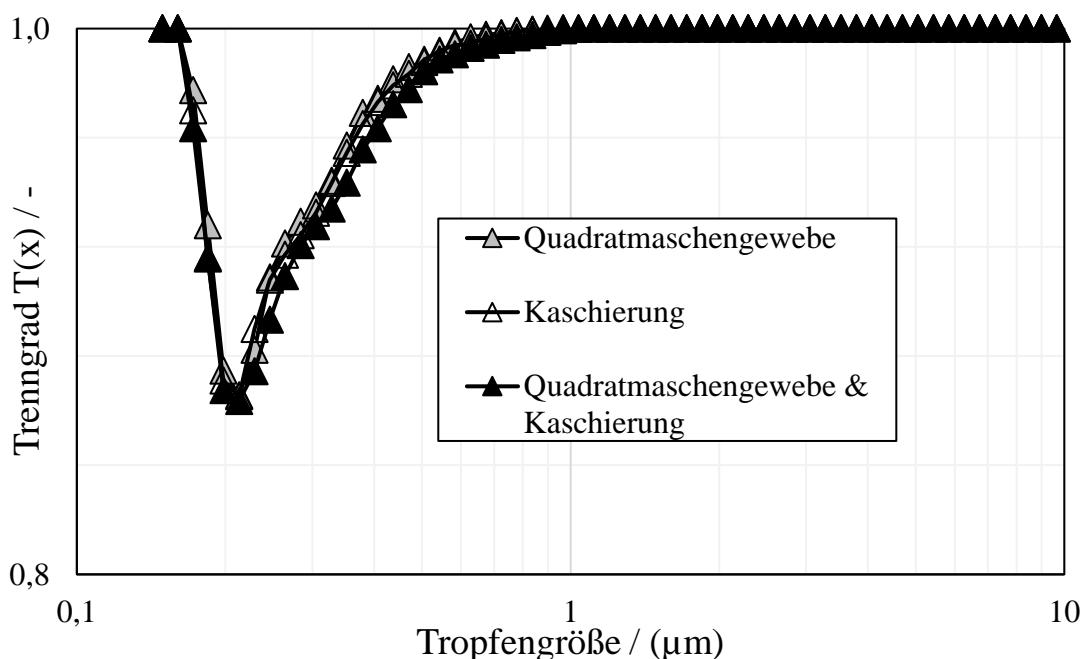


Abbildung 5.18: Trenngrad des Glasfasermediums MM1044 mit verschiedenen Stützstrukturen (Quadratmaschengewebe / Polyesterkaschierung / Kombiniert) bei $v = 0,2 \text{ m/s}$; $c = 500 \mu\text{g/m}^3$

Als Kaschierlagen wurde grobporiges Polyestermaterial verwendet. Auch bei dieser Untersuchung wurde mit Anströmgeschwindigkeiten zwischen $v =$

$0,028 \text{ m/s}$ und $v = 0,5 \text{ m/s}$ sowie Konzentrationen von $c = 65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $c = 1125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gearbeitet.

Abbildung 5.18 zeigt die Ergebnisse einer Trenngradmessung bei einer Anströmgeschwindigkeit von $v = 0,2 \text{ m/s}$ und einer Konzentration von $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Darin sind die typischen Verläufe der Messungen am Glasfaservlies MM1044 aufgetragen. Das Quadratmaschengewebe ($w = 0,4 \text{ mm}$; $d_d = 0,16 \text{ mm}$) besitzt eine resultierende Abschirm-Flächenverhältnis von ($A = 48,98 \%$). Das Polyestermaterial ist ein übliches, von den Vliesherstellern verwendetes Material. Es besitzt, im Vergleich zu dem verwendeten Quadratmaschengewebe, ein deutlich geringeres Abschirm-Flächenverhältnis und die Faserstärke liegt etwa eine Größenordnung unter der, der Drahtstärke des Quadratmaschengewebes. Die genauen geometrischen Parameter sind nicht bekannt. Bei den gezeigten Messungen wurde einseitig kaschiertes, beziehungsweise in der Versuchsreihe „Quadratmaschengewebe“ nicht kaschiertes Material verwendet. Die gezeigten Messungen entstanden zu Beginn des Filtrationsprozesses, also während der Beladungsphase, in der sich noch kein Flüssigkeitsfilm auf der Strömungsabgewandten Seite des Vlieses ausgebildet hatte.

Insgesamt zeigen die Messergebnisse keinen signifikanten Einfluss auf die Partikelabscheidung und bestätigen damit die Untersuchungen von [Pen20]. Damit entspricht dieses Ergebnis der Erwartungshaltung, da es sich sowohl bei der Kaschierung als auch bei dem Quadratmaschengewebe um Material handelt, das in Strömungsrichtung aus wenigen hintereinander liegenden zylindrischen Kollektoren (Faser oder Draht) besteht. Die Abscheideeffizienz kann bei beiden Strukturen mit dem Einzelfaserabscheidegrad bestimmt werden, ist jedoch aufgrund der wenigen hintereinander liegenden Kollektoren rechnerisch wie auch messtechnisch sehr gering. Auch eine signifikante Veränderung der Abscheideeffizienz durch ein geändertes Strömungsprofil im Vlies kann infolge der durchgeföhrten Messungen ausgeschlossen werden. Auch die erwartete Abscheidecharakteristik der Vliese, unabhängig von der verwendeten Stützstruktur, konnte bestätigt werden. Alle untersuchten Materialien verhalten sich über den gesamten Beladungszeitraum ähnlich wie Tiefenfilter bei der Staubfiltration. Es besteht also über den gesamten Partikelgrößenbereich eine an die 100 % reichende Abscheidung mit einem Abfall der Effizienz in einem Tropfengrößenbereich um die $0,25 \mu\text{m}$.

Um die Veränderung der Abscheideeffizienz durch den Wiedereintrag bereits abgeschiedener Tropfen (Reentrainment) während des zeitlichen Verlaufs des Filtrationsprozesses zu zeigen, ist in Abbildung 5.19 die Trenngradkurve des MM1044 einmal in der Beladungsphase und einmal im quasistationären Bereich gezeigt.

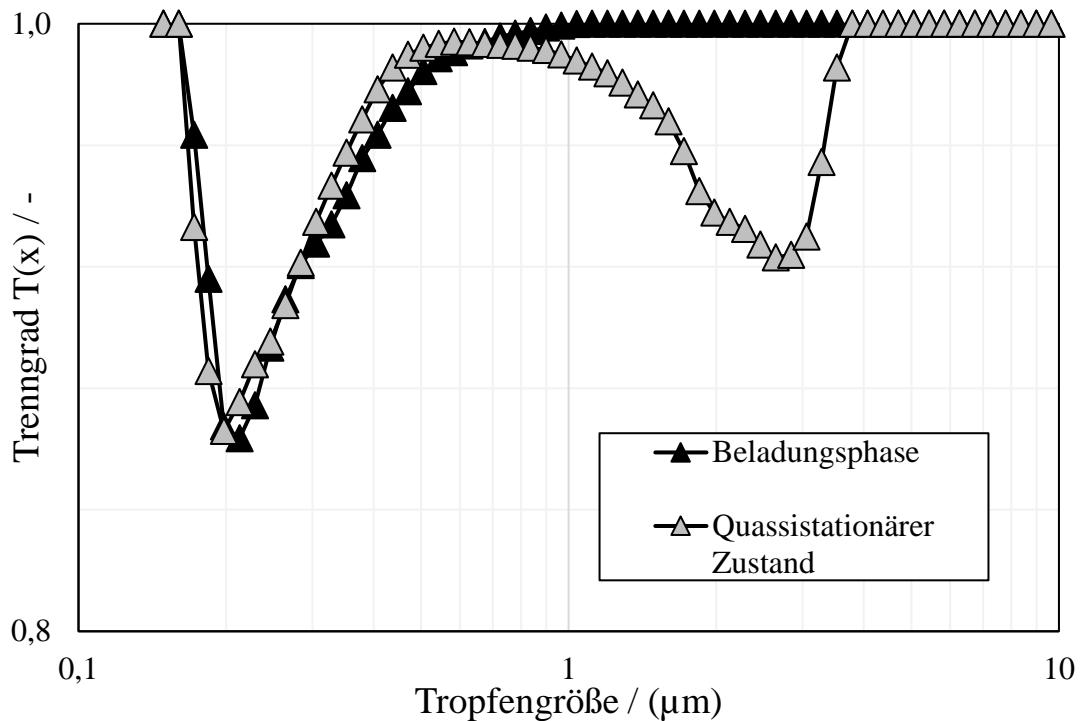


Abbildung 5.19: Trenngrad des Glasfasermediums MM1044 mit Quadratmaschengewebe und einseitiger Polyesterkaschierung als Stützstruktur bei $v = 0,2 \text{ m/s}$; $c = 500 \mu\text{g/m}^3$

Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Beladung die Abscheidung insgesamt schlechter wird und ein weiterer markanter Punkt im Kurvenverlauf entsteht. Dieser Punkt liegt in den Versuchen mit den beschriebenen und gezeigten Parametern zwischen $1 \mu\text{m} \leq d_t \leq 1,2 \mu\text{m}$. Dieses Verhalten tritt unmittelbar nach dem Erreichen der vollständigen Sättigung, also dem Ausbilden des Flüssigkeitsfilms auf der strömungsabgewandten Seite auf. Da der Stand des Wissens jedoch zeigt, dass die Abscheideeffizienz im Trägebereich zunimmt, jedoch bei stark benetzenden Medien ein deutliches Wiedereinragen von Tropfen aus der Drainageschicht auszumachen ist [Pen19a], muss angenommen werden, dass die im Reingas gemessenen Partikeln aus dem Flüssigkeitsfilm stammende, wiedereingetragene Tropfen sind.

In weiteren Versuchen zeigte sich, dass die verwendeten Stützstrukturen (Quadratmaschengewebe / Polyesterkaschierung / Kombination) in dem untersuchten Parameterbereich ebenfalls keinen Einfluss auf die Partikelabscheidung im quasistationären Bereich hatten. Dabei kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass größere Tropfen infolge der Messanordnung, beziehungsweise der Messtechnik selbst, nicht erfasst werden konnten. Es kann also angenommen werden, dass größere Tropfen die sich bevorzugt im unteren Bereich der Filterscheibe bilden, durch die Gravitationskräfte vor Erreichen der Probenahmestelle abgeschieden werden, beziehungsweise sich unterhalb der Probenahmestelle befinden.

Besonders auffällig beim Betrachten der Abscheideeffizienz der verschiedenen Vliestypen, jedoch der Erwartungshaltung entsprechend, ist der starke Unterschied in der Filtereffizienz in Abhängigkeit des Fasermaterials. Wobei das Fasermaterial selbst nicht die ausschlaggebende Eigenschaft ist, sondern der Faserdurchmesser. Dieser ist entscheidend für die Abscheideeffizienz und abhängig von der Fertigungsmethode des Vlieses, welche wiederum abhängig von dem Fasermaterial ist. Insgesamt zeigten die Glasfasermedien mit ihrem mittleren Faserdurchmesser im unteren Mikrometerbereich beziehungsweise im Submikronbereich bei allen Strömungsgeschwindigkeiten die beste Effizienz über den gesamten Beladungszeitraum.

5.3 Einfluss der Dicke und der Oberflächenbeschaffenheit auf die Kanalbildung

Bei der Formgebung von nassgelegten Glasfaservliesen entsteht, wie zuvor beschrieben, eine deutlich wahrnehmbare Oberflächenstruktur. Der Einfluss auf die Sättigung und die Flüssigkeitsverteilung wurde in dieser Studie mit dem in Abschnitt 4.4 beschriebenen Vorgehen an drei verschiedenen Glasfaservliesen untersucht. Die Ergebnisse der Versuche werden in diesem Abschnitt präsentiert. Zuerst wird in Abschnitt 5.3.1 auf die Oberflächenstruktur beider Seiten des Vlieses eingegangen und weiter wird das daraus resultierende Dickenprofil vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 5.3.2 die Positionen der Flüssigkeitskanäle durch das Vlies gezeigt und diskutiert. In beiden Abschnitten wird konsequent von der oberseitigen Fläche und der unterseitigen Fläche des Vlieses gesprochen, womit die Position des Vlieses während des Herstellprozesses gemeint ist. Die Unterseite ist also die auf dem Förderband liegende Seite und die Oberseite die Seite, welche bei dem Herstellprozess mit der Luft in Kontakt ist.

5.3.1 Oberflächenstruktur und Dickenprofil

Vergleicht man die Oberfläche der Oberseite mit der, der Unterseite bei einem der untersuchten Glasfaservliese, zeigt sich ein deutlicher Unterschied in der Beschaffenheit. Auf der oberseitigen Fläche zeigt sich eine hügelige Struktur und auf der unterseitigen ein symmetrisches und optisch flacher wirkendes Profil. Auf den beiden Aufnahmen in Abbildung 5.20 sind von dem Ausschussmaterial der Firma BinNova GmbH, die Ober- und die Unterseite präsentiert. Die Bilder zeigen beide einen Vliesausschnitt von etwa $3 \times 4 \text{ cm}$. Dabei lässt sich auch auf der rechts abgebildeten unterseitigen Fläche, überlagert von der regelmäßig profilierten Struktur, eine hügelige Oberflächenbeschaffenheit erkennen. Diese scheint aber von geringerer Ausprägung zu sein als die Struktur auf der links abgebildeten oberseitigen Fläche.

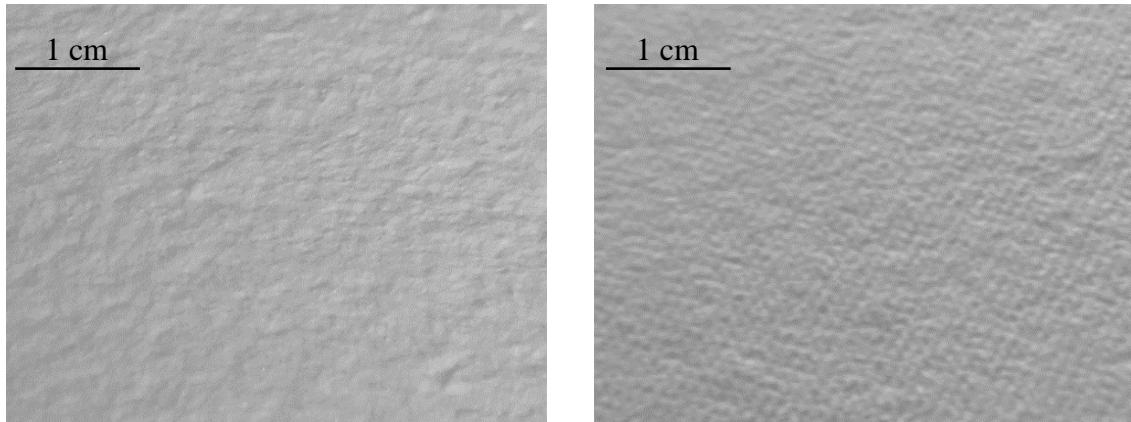
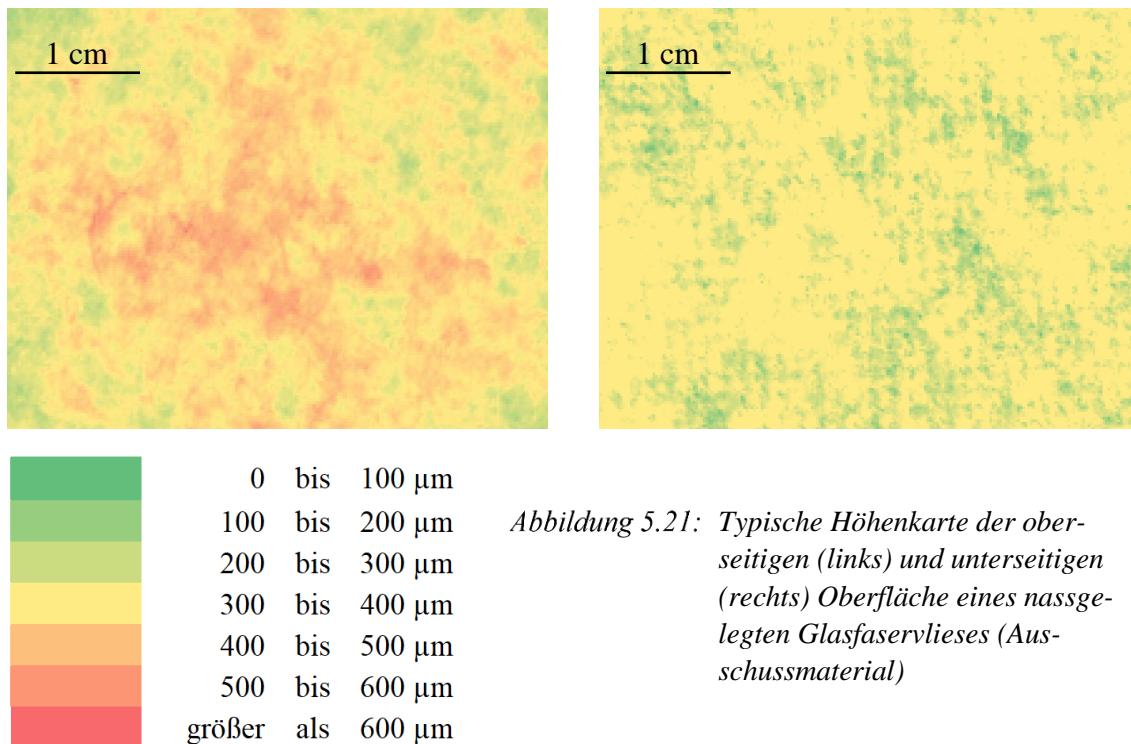


Abbildung 5.20: Aufnahme der oberseitigen (links) und unterseitigen (rechts) Oberfläche eines Glasfaservlieses (Ausschussmaterial)

Bedingt durch das Nasslegeverfahren, mit dem die abgebildeten Vliese hergestellt wurden, entspricht das Oberflächenprofil der Erwartungshaltung. Ebenfalls der Erwartungshaltung folgend, wiesen alle weiteren Glasfaservliese, die in dieser Studie untersucht wurden, dieselbe charakteristische Oberflächenbeschaffenheit sowohl auf der Oberseite als auch auf der Unterseite auf. Zur Beschreibung des Oberflächenprofils wurden die Vliese im nächsten Schritt mit dem Lichtschnittverfahren untersucht und (wie in Abschnitt 4.4.1 erläutert) die Oberflächenkarten erstellt.



Die beiden Bilder in Abbildung 5.21 zeigen exemplarisch zwei Höhenprofile des Ausschussmaterials der Firma BinNova GmbH, links in der Abbildung die

oberseitige Fläche und rechts die unterseitige Fläche. Die Bilder zeigen auch hier einen Vliesausschnitt mit einer Kantenlänge von etwa $3 \times 4 \text{ cm}$.

Auch in dieser Darstellung ist das beschriebene beidseitige Oberflächenprofil deutlich zu erkennen. Darüber hinaus kann die Annahme bestätigt werden, dass die Schwankungsbreite in der Höhe auf der oberseitigen Fläche erheblich größer als auf der unterseitigen Fläche ist. Auf dem oberseitigen Flächenausschnitt sind große Bereiche zu erkennen, die rot eingefärbt sind und damit $600 \mu\text{m}$ über dem niedrigsten gemessenen Punkt des Flächenausschnitts liegen. Im Vergleich dazu ist auf dem Bild der unterseitigen Fläche kein Bereich zu erkennen, der rot eingefärbt ist und damit mehr als $600 \mu\text{m}$ über dem tiefsten Punkt liegt. Betrachtet man die gewonnenen Datensätze genauer und ordnet jedem Messpunkt der Oberfläche einen Höhenbereich zu, entsteht eine typische Verteilung wie sie in dem Diagramm in Abbildung 5.22 dargestellt ist. Das Diagramm zeigt die Ergebnisse des primär untersuchten Ausschussmaterials (vgl. Abschnitt 4.4). Darin sind etwa 5,5 Millionen Messpunkte aufgetragen, wobei jeder Messpunkt eine Abmessung von $23,5 \times 23,5 \mu\text{m}$ hat. Der vermessene Vliesausschnitt hat insgesamt eine Abmessung von etwa $30,25 \text{ cm}^2$.

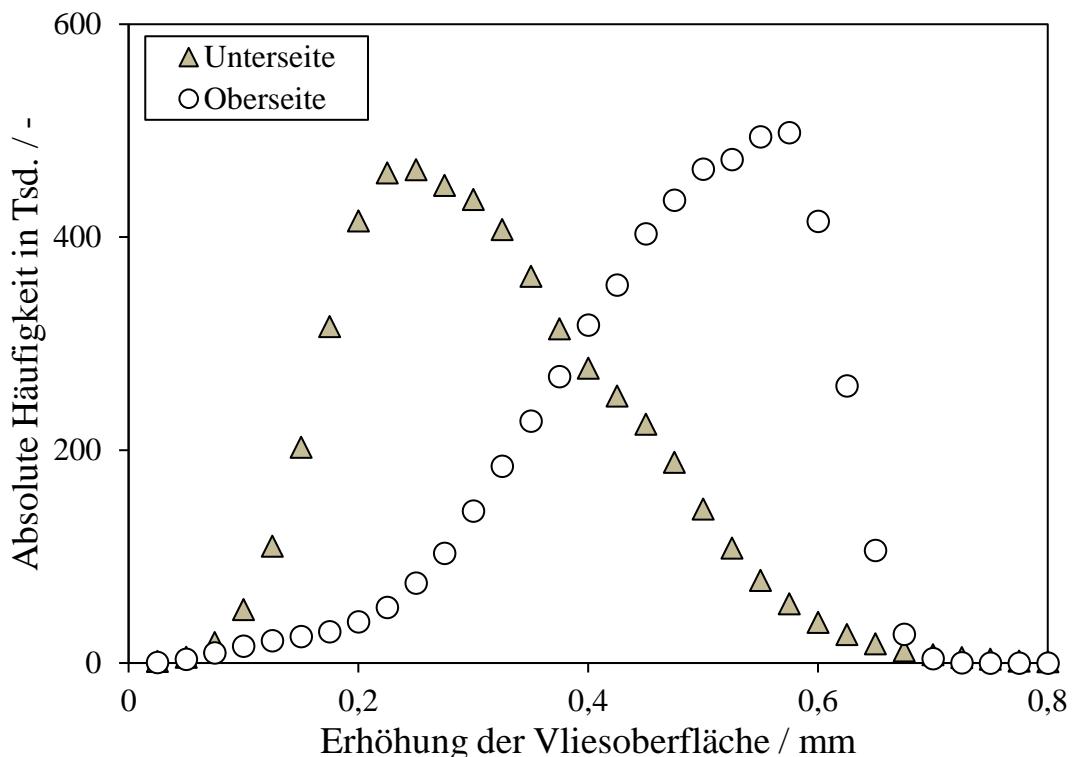


Abbildung 5.22: Verteilung der absoluten Häufigkeit der Messpunkte der oberseitigen und unterseitigen Oberfläche eines nassgelegten Glasfaservlieses (Ausschuss)

Im Diagramm ist die Anzahl der Messpunkte in einem bestimmten Höhenbereich über der Höhe aufgetragen, wobei der niedrigste gemessene Punkt als Basis gilt. Auch in dieser Darstellung ist deutlich zu erkennen, dass die Oberflächenbeschaffenheit der Oberseite wesentlich rauer ist als die der Unterseite. Das lässt sich im Vergleich zur unterseitigen Fläche an der erheblich größeren Anzahl an Messpunkten erkennen, die einen größeren Abstand zum tiefsten gemessenen Punkt haben. Bei der Interpretation der Daten muss beachtet werden, dass die Höhenskala vom tiefsten Punkt bis zum höchsten Punkt reicht, der tiefste gemessene Punkt also den Nullwert bestimmt und der höchste gemessene Punkt die Differenz zu dem niedrigsten ist. Bei der betrachteten Größe eines jeden Datenpunkts von $23,5 \times 23,5 \mu\text{m}$ kann der tiefste Punkt eine größere Lücke zwischen zwei Fasern und der höchste Punkt eine von dem Vlies abstehende Faser sein. Betrachtet man die Messpunkte in der Höhenmatrix genauer, zeigt sich auch darin das beschriebene Verhalten. Es treten vereinzelt sprunghafte Anstiege und Abfälle der Höhenwerte von einzelnen Messpunkten auf. Die sprunghaften Anstiege konnten überwiegend da ausgemacht werden, wo die Höhe der umliegenden Werte sich im oberen Bereich der Höhenskala befanden. Beim Auftreten der sprunghaften Abfälle der Höhe konnte kein bevorzugter Höhenbereich ausgemacht werden. Bereiche, in denen die Höhenwerte sprunghaft anstiegen oder abfielen, sind auf einen bis wenige Kantenlängen der Messpunkte. Die üblicherweise auftretende Höhendifferenz zweier nebeneinanderliegender Messpunkte beträgt weniger als eine Kantenlänge der Messpunkte. Insgesamt bestätigt diese Beobachtung die Annahme, dass diese Sprünge größere Poren im Vlies beziehungsweise lose vom Vlies abstehende Fasern sind. Bei einer Mittelung von vier im Quadrat nebeneinander liegender Messwerten der Höhenmatrix zeigt sich eine deutliche Reduzierung der Verteilungsbreite sowohl der oberseitigen als auch der unterseitigen Funktionen.

Tabelle 5.3: Lageparameter der oberseitigen und der unterseitigen Verteilung eines nassgelegten Glasfaservlieses (Ausschussmaterial)

Lageparameter	Oberseite (μm)	Unterseite (μm)
<i>Mittelwert</i>	460	304
<i>Modalwert</i>	567	210
<i>Medianwert</i>	477	289

In Tabelle 5.3 sind die Mittelwerte, die Modalwerte und Medianwerte der oberseitigen und der unterseitigen Höhenverteilung aufgeführt. Dabei beziehen sich die Angaben jedoch nur auf den oben gezeigten und analysierten Bereich von $30,25 \text{ cm}^2$ und damit auf eine Stichprobe des Vlieses. Insgesamt wiesen jedoch alle Proben des Ausschussmaterials eine starke Ähnlichkeit in der Höhenverteilung auf. Die gelisteten Lageparameter bestätigen noch mal die Beobachtung der unterschiedlichen Oberflächenrauheit der Oberseite und der Unterseite.

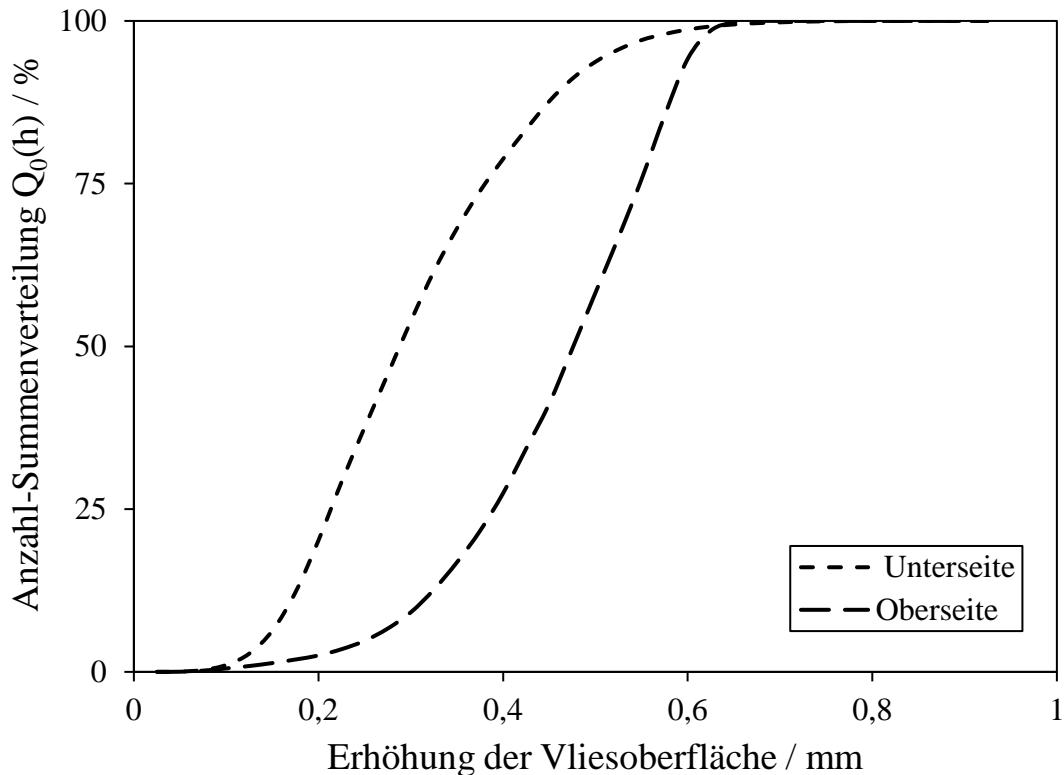


Abbildung 5.23: Typische Anzahl-Summenverteilung der oberseitigen und unterseitigen Oberfläche eines nassgelegten Glasfaservlieses (Ausschussmaterial)

Eine typische Summenverteilung der oberseitigen und unterseitigen Oberfläche ist in dem Diagramm in Abbildung 5.23 gezeigt. Auch in dieser Darstellung der Verteilungen zeigt sich der Unterschied in der Oberflächenrauheit beider Seiten deutlich. Eine weitere interessante Charakteristik, die in dieser Darstellung deutlich wird, ist der flachere Anstieg der oberseitigen Summenverteilung welcher bedeutet, dass es eine nicht zu vernachlässigende Anzahl (ca. 20 %) an Messwerten von $0 - 350 \mu\text{m}$ gibt. Jedoch findet am oberen Ende der Verteilung ein relativ abruptes Ende der Funktion statt. Es findet also kein flaches Auslaufen der Summenverteilung im oberen gemessenen Höhenbereich statt. Genau umgekehrt verhält es sich bei der Summenverteilung der Messpunkte des unterseitigen Höhenprofils. Hier ist zu Beginn ein steiler Anstieg der Funktion zu erkennen. Im oberen Bereich bei einer Messpunktanzahl von etwa 80 % und einer Messpunkthöhe von etwa $450 \mu\text{m}$ erfolgt wiederum ein flaches Auslaufen der Funktion. Das bedeutet

also, dass die Vliesstruktur auf der Oberseite eine größere Anzahl an tieferen Poren hat, jedoch nur eine unwesentliche Anzahl an herausragenden Erhöhungen wie beispielsweise abstehende Fasern aufweist. Genau andersherum verhält es sich auf der gegenüberliegenden unterseitigen Fläche des Vlieses. Hier deutet der Funktionsverlauf darauf hin, dass es eine höhere Anzahl an abstehenden Fasern gibt, jedoch nur eine geringe Anzahl an größeren Poren.

Abschließend wurden die beide Seiten so übereinandergelegt, dass die Positionen, die sich bei dem realen Filtervlies gegenüber liegen, auch bei dem virtuellen Vlies gegenüber liegen. Für die Matrizen bedeutet das, dass die einzelnen Messpunkte der Höhenmatrix der Oberseite mit den jeweilig gegenüberliegenden der Unterseite addiert wurden. Anschließend wurde die mittlere Dicke des Vlieses auf alle Summenwerte aufaddiert, wobei zuvor die Hälfte des arithmetischen Mittelwerts (Beispiel aus Tabelle 5.3) beider Oberflächenmatrizen von dem Wert der mittleren Vliesdicke subtrahiert wurde. Zur Positionierung der beiden Seiten zueinander wurden die in Abschnitt 4.4 beschriebenen Positionsmarker benutzt. Mit dieser Methode kann eine exakte Positionierung bei der Zellgröße von $23,5 \times 23,5 \mu\text{m}$ nicht gewährleistet werden. Auch bei der Zellauflösung von $47 \times 47 \mu\text{m}$, wie sie bei dem Großteil der Messungen in Abschnitt 5.3.2 für die Positionsbestimmung der Flüssigkeitskanäle benutzt wurde, ist eine exakte Positionierung nicht mit Sicherheit zu gewährleisten. Da die Oberflächenstrukturen, die in dieser Studie von Interesse waren jedoch zwei Größenordnungen über der

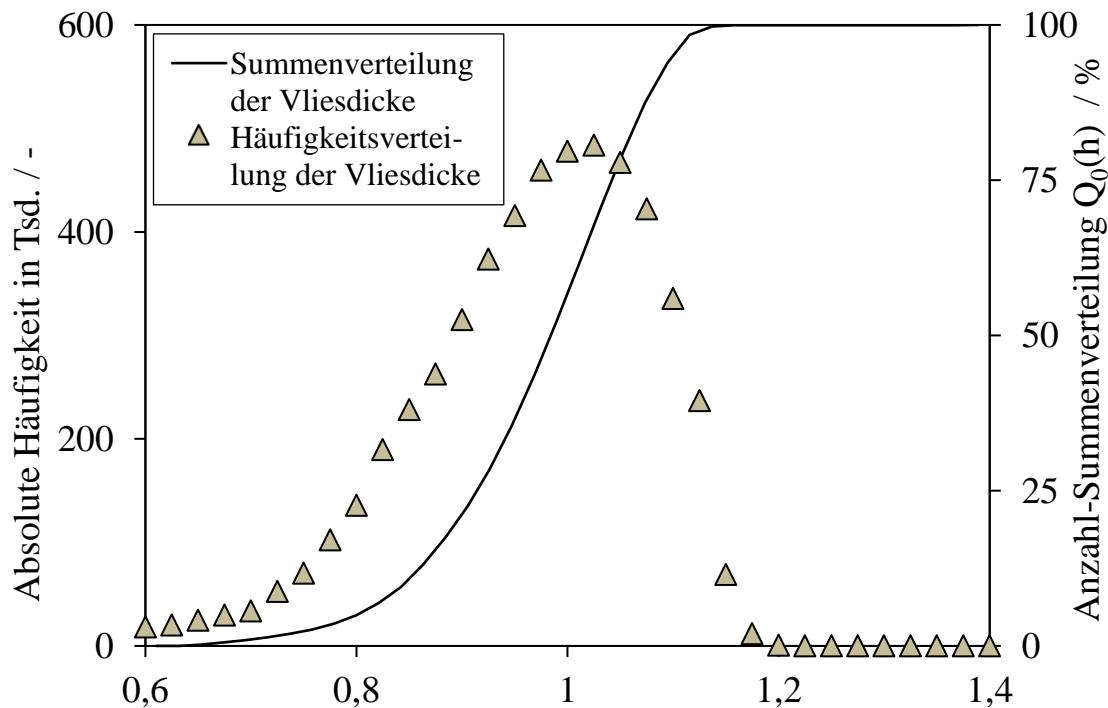


Abbildung 5.24: Typische Anzahl-Summenverteilung und Verteilung der absoluten Häufigkeit der Messpunkte der Dicke eines nassgelegten Glasfaservlieses (Ausschussmaterial)

Oberflächenauflösung liegen, konnte dieser Fehler als vernachlässigbar betrachtet werden. Die resultierende Dicke des virtuellen Vlieses entsprach dabei nicht exakt der Dicke des realen Vlieses. Die absolute Dicke war jedoch für die vorgestellten Ergebnisse nicht relevant.

Exemplarisch sind in Abbildung 5.24 die Verteilungsfunktionen der Dicke eines Ausschussmaterials der Firma BinNova gezeigt. Aus den Kurvenverläufen ist zu erkennen, dass die Eigenschaft der vermehrt auftretenden Oberflächenerhöhungen (abstehende Fasern) auf der Unterseite des Vlieses, die anhand des Diagramms auf Abbildung 5.23 beschrieben wurde, in den Vliesdickenverteilungen untergehen. Die tiefen Bereiche, die auf der oberseitigen Fläche ausgemacht wurden, sind hingegen in der Verteilung der Vliesdicke deutlich zu erkennen. Dies zeigt sich durch den vergleichsweise flachen Anstieg sowohl der Summenverteilung als auch der Verteilung der absoluten Häufigkeit im unteren Vliesdickenbereich und durch den vergleichsweise steilen Abfall der Häufigkeitsverteilung beziehungsweise dem relativ direkten Anstieg der Summenverteilung auf 100 %.

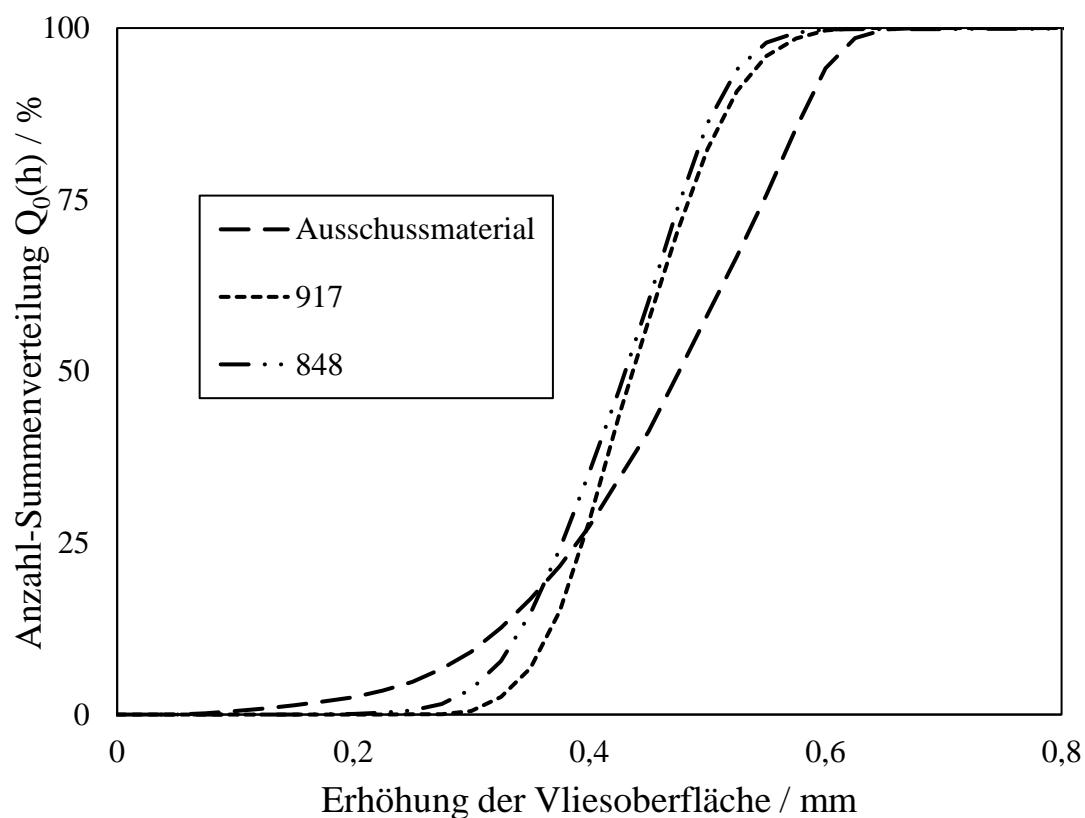


Abbildung 5.25: Typische Summenverteilungen der oberseitigen Oberflächen der untersuchten Glasfaservliese (Ausschussmaterial; 917; 848)

Abbildung 5.25 zeigt die Anzahl-Summenverteilungen der oberseitigen Oberflächen aller untersuchten Glasfaservliese. Bei dem Vergleich zeigt sich beidseitig ein ähnlicher Verlauf der jeweiligen Verteilungsfunktion mit geringerer Höhenausprägung des Oberflächenprofils. Der Erwartungshaltung folgend, also ein steilerer Verlauf der Anzahl-Summenverteilung und damit ein weniger ausgeprägtes Oberflächenprofil. Die unterseitigen Profile der untersuchten Materialien waren hier, sowohl in der Steigung wie auch der Form, insgesamt sehr ähnlich. Die Verteilungsfunktion der berechneten Dicke der beiden weniger untersuchten Vliese 917 und 848 entsprachen von der Form her, der Verteilung des beschriebenen Glasfaservlieses der Firma BinNova GmbH, waren jedoch äquivalent der Verteilungsfunktionen in Abbildung 5.25 steiler als bei dem Ausschussmaterial. Dieser Verlauf ist das Resultat der gezeigten inhomogeneren Oberflächenbeschaffenheit der Oberseite des Ausschussmaterials.

5.3.2 Positionen der Flüssigkeitskanäle

Nachdem beidseitig die Oberflächen vermessen und die resultierenden Dicken berechnet wurden, sind die jeweiligen Proben in die Testringhälften des Versuchsstands verklebt und anschließend im Versuchsstand mit Öl beladen worden. Im Folgenden wurden die Positionen der Flüssigkeitskanäle ermittelt und mit den vorab bestimmten Oberflächen- und Dickenprofilen der jeweiligen Probe verglichen. Die genaue Beschreibung der Versuchsdurchführung ist in Abschnitt 4.4.2 gegeben. Abbildung 5.26 zeigt nochmal exemplarisch das Vorgehen der Positionsbestimmung der Flüssigkeitskanäle. Dafür wurde das Ausschussmaterial der Firma BinNova, aufgrund des am deutlich ausgeprägtesten Dickenprofils, verwendet. Oben links im Bild ist ein Dickenprofil abgebildet, wie es mit der zuvor beschriebenen Methode bestimmt wurde. Oben rechts in der Abbildung ist eine Aufnahme gezeigt, welche die exakten Positionen der Flüssigkeitskanäle wiedergibt, die mit der Transmissionslicht-Methode bestimmt wurden. Unten links sind beide Bilder übereinandergelegt, um zu visualisieren, wo sich die Flüssigkeitskanäle in Relation zur Dicke des Vlieses gebildet haben. Die beiden schwarzen Punkte in der Darstellung der Kanalpositionen links oben in der Ecke sind Positionsmarker und keine Flüssigkeitskanäle. Diese und alle weiteren Positionsmarker wurden in der späteren Auszählung der Flüssigkeitskanäle nicht mit betrachtet.

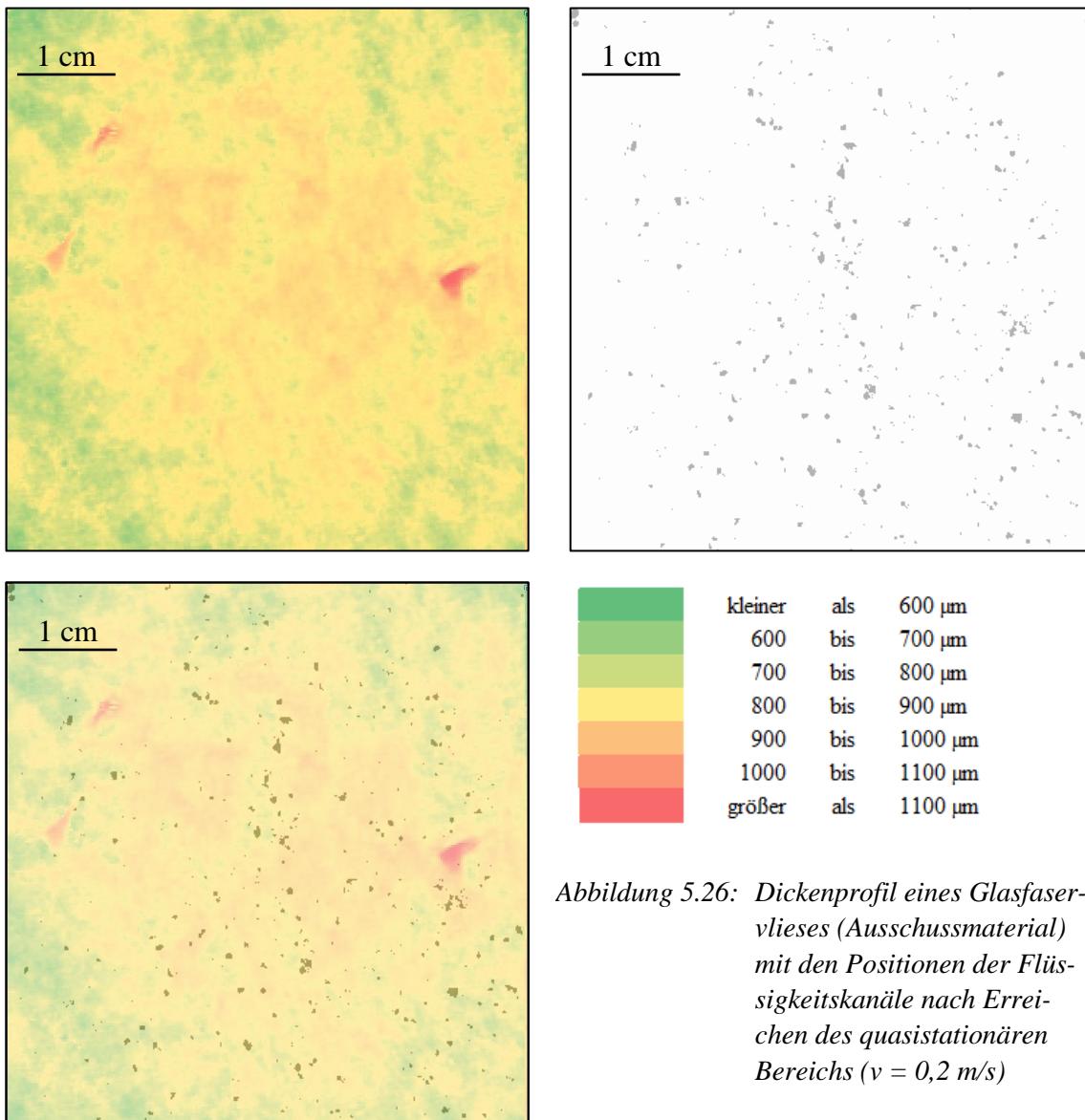


Abbildung 5.26: Dickenprofil eines Glasfaservlieses (Ausschussmaterial) mit den Positionen der Flüssigkeitskanäle nach Erreichen des quasistationären Bereichs ($v = 0,2 \text{ m/s}$)

Die nähere Betrachtung der übereinandergelegten Bilder lässt die Annahme zu, dass sich die Flüssigkeitskanäle bevorzugt in den insgesamt dünneren Bereichen des Vlieses bilden. Zumindest sind scheinbar keine Flüssigkeitskanäle in den dicken Arealen erkennbar, welche in der Abbildung rot eingefärbt sind. Zum Überprüfen der Annahme wurden die Messpunkte ausgewertet, die mit den Positionsmarkern der Flüssigkeitskanäle überlagert waren. Dafür wurde die Messpunktanzahl auf etwa 1,4 Millionen pro Aufnahme reduziert. Das entspricht einer Messzellenabmessung von $47 \times 47 \mu\text{m}$ bei einer Gesamtfläche von etwa $30,25 \text{ cm}^2$. Insgesamt wurden 6 Proben von jedem Vlies ausgewertet. Bei der Verarbeitung der Durchlichtbilder wurde der Schwellwert so gewählt, dass nach stationärer Sättigung des Vlieses 5 % der Fläche der Bilder als Flüssigkeitskanäle markiert waren. Das entspricht dem oben gezeigten Beispielbild und stellt sicher, dass nur die Zentren von Flüssigkeitskanälen als Marker dargestellt werden.

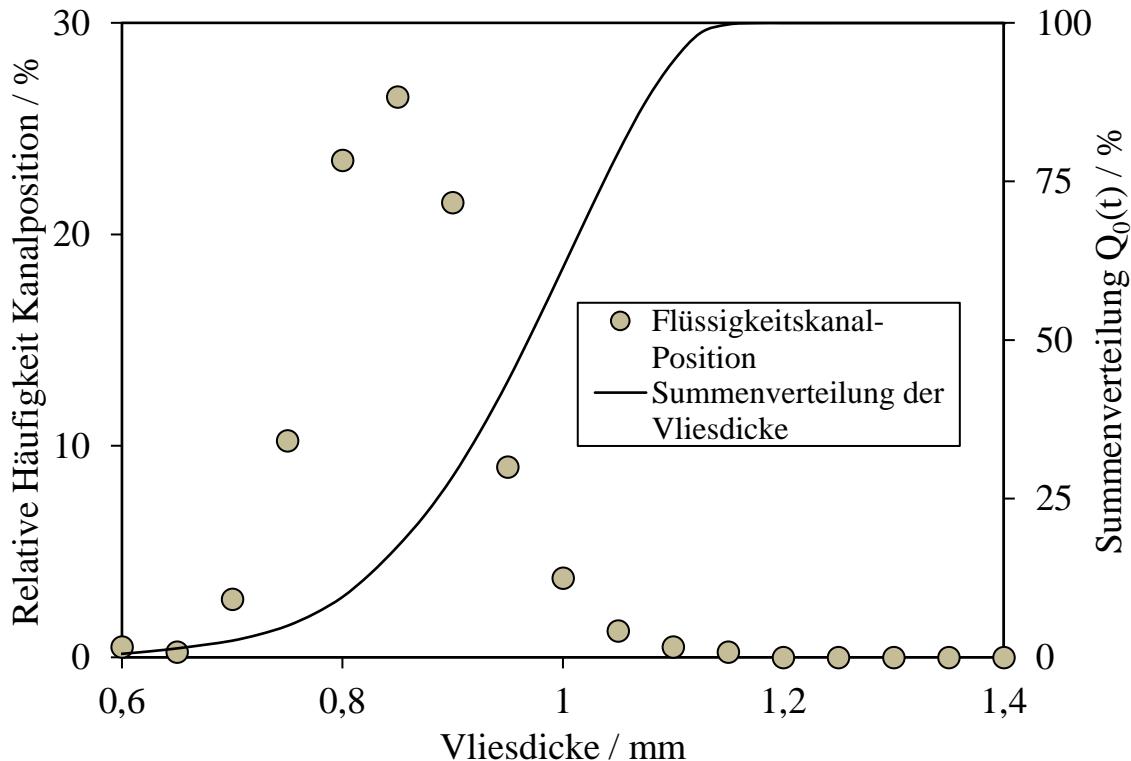


Abbildung 5.27: Typische Summenverteilung der Dicke eines nassgelegten Glasfaservlieses (Ausschussmaterial) und die Dichteverteilung der Messpunkte, an denen sich Flüssigkeitskanäle gebildet haben.

In dem Diagramm in Abbildung 5.27 ist wieder exemplarisch die Summenverteilung der Dicke des Ausschussmaterials der Firma BinNova GmbH aufgetragen. Außerdem ist der prozentuale Anteil der Messpunkte in den jeweiligen Vliesdickenklassen, in denen sich Flüssigkeitskanäle befanden, aufgetragen. Die ausgewertete Vliesfläche betrug dabei $181,5 \text{ cm}^2$, was einer Anzahl von 8,4 Millionen Messpunkt entspricht. Die Anzahl der Messpunkte, an denen Flüssigkeitskanäle ausgemacht wurden, belief sich auf etwa 400 Tausend. Der Verlauf der Summenverteilung der Vliesdicke zeigt, dass das gesamte Spektrum der Dicke zwischen $0,6 \text{ mm}$ und $1,2 \text{ mm}$ liegt, wobei sich der wesentliche Anteil des Vlieses zwischen $0,8 \text{ mm}$ und $1,1 \text{ mm}$ Dicke bewegt. Weiter ist aus der Summenverteilung ablesbar, dass etwa 50 % des Vlieses dünner und die anderen 50 % dicker als ein Millimeter sind. Beim Betrachten der Messwerte, welche die Positionen der Flüssigkeitskanäle zeigen, ist eindeutig zu erkennen, dass beinahe alle Kanäle in den dünnen Bereichen des Vlieses ($t < 1 \text{ mm}$) ausgemacht wurden. Betrachtet man im Vergleich dazu die anderen beiden untersuchten Glasfaservliese, zeigt sich auch bei denen ein sehr ähnliches Verhalten. Bei allen liegt der überwiegende Teil der Flüssigkeitskanäle in der unteren Hälfte der Vliesdicke. Dabei war die untersuchte beziehungsweise ausgewertete Probengröße bei den beiden anderen Glasfaservliesen jedoch wesentlich geringer als bei dem Ausschussmaterial. Alle Materialien wurden einmal mit der oberseitigen Fläche und einmal mit der unterseitigen Fläche

in Strömungsrichtung in den Versuchsstand eingebaut und mit Flüssigkeit beladen. Auch bei dem anschließenden Vergleich der Positionsverteilung der Flüssigkeitskanäle in Abhängigkeit der Einbauposition zeigte sich kein signifikanter Unterschied. Bei dem Erstellen der Durchlichtbilder zeigte sich nur eine minimale Seitenabhängigkeit in Bezug auf die Anordnung von Lichtquelle und Kamera. Es wurde also eine minimale Positionsänderung der Flüssigkeitskanäle ausgemacht, wenn Lichtquelle und Kamera für die Bilderstellung ihre Position tauschten, also die Kamera von der Oberseite des Vlieses zur Unterseite des Vlieses wechselte und die Lichtquelle entsprechend umgekehrt. Diese Positionsänderung der Flüssigkeitskanäle ist auf die Form der Kanäle, die nicht gerade und senkrecht durch das Vlies verlaufen, zurückzuführen, beziehungsweise auf die Begebenheit, dass die Querschnittsfläche auf der Eintrittsseite eine andere Größe und geometrische Ausdehnung besitzt als die Querschnittsfläche auf der Austrittsseite. Ein weiterer Grund für die gemessene, sehr geringe Positionsänderung der Kanäle kann eine leichte Änderung der Position der Probe beziehungsweise der Messanordnung sein. Bei einer minimalen Abweichung der Anordnung verändert sich die Intensität des Durchlichtbildes ebenfalls und damit auch die Position der Kanäle auf dem abschließenden binarisierten Bild, welches zur Positionsbestimmung herangezogen wird. Da die jeweiligen Kanäle jedoch keine Tendenz aufweisen in dickere oder dunnere Bereiche zu wechseln, geht das Verhalten insgesamt in der Verteilung unter.

Geht man von der Annahme aus, dass das Vlies eine homogene Porosität aufweist, also in den dickeren Bereichen dieselbe Porosität besitzt, wie in den dünnen Bereichen, kann folgende Annahme untermauert werden. Das Aerosol strömt zu Beginn des Filtrationsprozesses, dem geringsten Widerstand folgend, bevorzugt durch die dünnere Bereiche des Vlieses. Demnach wird ebenfalls ein großer Teil der Tröpfchen mit der Gasströmung in die dünnen Bereiche des Vlieses transportiert. Infolge des primären Flüssigkeitstransports in die dünnen Bereiche des Materials, bilden sich dort auch erste Flüssigkeitsansammlungen aus, die den Ursprung der Flüssigkeitskanäle bilden. Aus diesen Flüssigkeitsansammlungen bildet sich dann im weiteren Filtrationsverlauf der Flüssigkeitskanal aus, der sich wiederum weitgehend grade durch das Filtermaterial zieht.

Aus diesen gewonnenen Erkenntnissen lassen sich zukünftig, beispielsweise durch entsprechende Manipulationen der Filtervliese, die Positionen der Kanäle vorab bestimmen. Außerdem sind technologische Filtrationsanwendungen denkbar, bei denen die Flüssigkeitskanäle im Material vorab gesetzt werden, um Filtrationseigenschaften zu verbessern beziehungsweise den technischen Herausforderungen im realen Einsatz anzupassen. Bezüglich der Modellierung des gesamten Filtrationsprozesses muss die Inhomogenität der Vliesdicke zwingend mit in die Gesamtbetrachtung einfließen.

Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen geschlussfolgert werden, dass es eine starke Bevorzugung der Flüssigkeitskanalpositionen hin zu den dünneren Bereichen des Vlieses gibt. Das Verhalten ist dabei unabhängig von der Einbauposition und der Vliessorte. Die Ausprägung ist bei allen Versuchen sehr deutlich zu erkennen. Insgesamt sollten diese Phänomene in zukünftigen Arbeiten weiter erforscht werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Versuche zur Flüssigkeitsverteilung und zum Sättigungsverhalten von Filtervliesen durchgeführt, die in der Tröpfchen-Aerosol-Filtration Anwendung finden. Zusätzlich wurde die Faserstruktur dieser Medien auf mikroskopischer und auf makroskopischer Größenskala analysiert. Dabei war es das übergeordnete Ziel herauszufinden, ob es möglich ist, die Abscheideeffizienz und den Druckverlust mit Hilfe eines Zellmodells zu bestimmen, um sowohl die Einflüsse der mikroskopischen als auch der makroskopischen Struktureigenschaften auf den Filtrationsprozess mit zu berücksichtigen und das Konzept auf ganze Filtersysteme zu übertragen. Der Fokus lag dabei auf der Optimierung von Brenngasfiltern vor Gasturbinen. Diese sollten mit industriell verfügbaren Mitteln durch präzisere Auslegung effizienter gestaltet werden.

Zu Beginn der Arbeit wurde eine umfangreiche Darstellung zum Stand des Wissens gegeben. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Phänomenologie der Abscheidung von Tröpfchen-Aerosolen in Koaleszenzfiltern über den gesamten Betriebszeitraum von Filtrationsbeginn bis zum quasistationären Bereich. Hier kennzeichnet sich der Filtrationsbeginn dadurch, dass die Fasern keine Flüssigkeitsbeisetzung aufweisen und der quasistationäre Bereich durch die maximale Sättigung welche dann, unter der Voraussetzung konstanter Betriebsbedingungen, weitgehend gleichbleibt. Der Schwerpunkt bei der Präsentation der Grundlagen lag auf den Möglichkeiten der mathematischen Beschreibung. Aus der Betrachtung ging hervor, dass es zum Zeitpunkt der Verschriftlichung dieser Arbeit noch kein ganzheitliches und allgemeingültiges Modell zur Beschreibung der Filtereffizienz gab. Anschließend wurde ein Überblick über die verschiedenen Herstellprozesse und deren Einfluss auf den resultierenden Vliesaufbau gegeben. Zuletzt wurden die gebräuchlichen und industriell üblicherweise verwendeten Methoden zur Charakterisierung von Filtermedien vorgestellt.

In dem sich daran anschließenden Teil der Arbeit wurde der Aufbau und die Funktionsweise der Anlage beschrieben, an der im späteren Verlauf ein Großteil der Filterversuche durchgeführt wurden. In der Anlagenbeschreibung wurden bereits Ergebnisse aus Vorversuchen zur Charakterisierung des Aerosolgenerators präsentiert. Außerdem wurden die Messgeräte und die Messmethoden vorgestellt, mit denen die Messdaten vor, während und nach den Versuchen ermittelt wurden. Dabei waren die wesentlichen Messinformationen der Differenzdruck über den Testfilter, die Sättigung des Testfilters, die Tröpfchen-Aerosol-Konzentration und die Volumenströme in der Anlage. Neben dem eigentlichen Versuchsaufbau

wurden in dem Teil der Arbeit auch die Messverfahren vorgestellt mit denen die Struktur der Filtermedien, sowohl vor als auch nach dem Durchführen der Filtrationsversuche analysiert wurden. Das beinhaltet die Micro-Computertomographie, optische Profilometrie und die Durchlichtfotografie, wobei das letztgenannte Verfahren im Wesentlichen zur Positionsbestimmung der Flüssigkeitskanäle genutzt wurde.

Anschließend wurde das experimentelle Vorgehen der durchgeführten Versuche detailliert beschrieben. Dabei wurde neben den eigentlichen Versuchen auch die Auswahl der untersuchten Vliese und die Auswahl des verwendeten Tröpfchen-Aerosols begründet. Die eigentlichen Versuche waren die Vliesanalyse auf mikroskopischer Größenskala, die Vliesanalyse auf makroskopischer Größenskala und die Flüssigkeitsverteilung im Filtermedium, wobei die Versuche teilweise ineinander übergingen und nicht scharf voneinander zu trennen waren. Bei der Beschreibung der einzelnen Versuche wurden bereits erste Ergebnisse aus Vorversuchen präsentiert, welche wiederum für das Design der eigentlichen Versuche notwendig waren.

Abschließend wurden die Ergebnisse, beginnend mit denen der Strukturanalyse auf mikroskopischer Größenskala, präsentiert. Dabei zeigte sich entsprechend der Erwartungshaltung, dass eine sichere Vliesanalyse bei Fasern im unteren Mikrometerbereich und in dem darunterliegenden nanoskaligen Bereich aufgrund der Auflösung des Computertomografen nicht möglich ist. Insbesondere bei den Glasfasermedien, wie sie für die Koaleszenzfiltration üblicherweise zum Einsatz kommen, zeigte sich, dass die Faserstrukturen in der stark fehlerbehafteten und nicht mehr auflösbaren Größenordnung lagen. Bei der Analyse von Glasfaserstrukturen mit einem größeren mittleren Faserdurchmesser von mehreren Mikrometern zeigte sich, dass bei einer Zellgröße mit einer Kantenlänge von $100 \mu\text{m}$ etwa 50 % der Zellen um maximal $\pm 2,5 \%$ um die über das gesamte Vlies gemittelte Porosität schwankten und etwa 50 % der Zellen in dem Bereich um $\pm 7,5 \%$ der mittleren Porosität lagen. Bei Zellgrößen mit einer Kantenlänge von weniger als $100 \mu\text{m}$ nahm die Homogenität der Zellverteilung stark ab. Die Schwankungsbreite um die mittlere Porosität nahm also deutlich zu.

Die Untersuchungen zur Flüssigkeitsverteilung und zum Sättigungsverhalten waren in dieser Studie in zwei Bereiche geteilt, zum einen die Abscheideeffizienz bei unterschiedlichen Sättigungsniveaus und zum anderen die Flüssigkeitsverteilung im Vlies selbst. Der Fokus lag dabei auf der Flüssigkeitsverteilung im Vlies. Die Tröpfchenabscheidung selbst kann bei zunehmender Beladung gut vorhergesagt werden. Zur Untersuchung der Flüssigkeitsverteilung wurden verschiedene Vliese getestet. Dabei zeigte sich die Tendenz, dass gröbere Vliesstrukturen im niedrigen Anströmgeschwindigkeitsbereich eine höhere Sättigung aufweisen und die Sättigung mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit flacher abfällt. Bei der Flüssigkeitsbeladung wurde von dem unbenetzten Ursprungszustand bis hin zum

quasistationären Sättigungszustand bei allen Vliesen ein nahezu linearer Anstieg, korrelierend mit der Tröpfchen-Aerosol-Konzentration festgestellt. Die Flüssigkeitsbeladung stieg also linear mit der zugeführten Flüssigkeit an. Zudem zeigte sich in dieser Studie, dass es einen Sättigungsgradienten in vertikaler Richtung des Vlieses gibt. Am unteren Ende des Filters war die Sättigung höher als am oberen Ende. Dieses Verhalten wurde auf den Flüssigkeitsfilm auf der strömungsabgewandten Seite, der sich beim Stoppen der Vliesdurchströmung in das benetzbare Vliesmaterial bewegt, zurückgeführt.

Als letztes wurden die Ergebnisse der lokalen Dicken der Vliese und deren Einfluss auf den Bildungsort der Flüssigkeitskanäle präsentiert. Dazu wurden die beidseitigen Oberflächen der später mit Tröpfchen-Aerosol beaufschlagten Filterscheiben analysiert und es wurde für jede Filterscheibe ein individuelles Dickenprofil erstellt. Nach der teilweisen oder vollständigen Sättigung im Versuchsstand wurden Transmissionslichtfotos erstellt. Daraus wurden die Positionen der Kanäle bestimmt. Die beiden wichtigsten daraus gewonnenen Erkenntnisse waren, dass bei nassgelegten Glasfaservliesen für die Koaleszenzfiltration eine Schwankung in den lokalen Dicken um $\pm 300 \mu\text{m}$ nicht unüblich ist und dass sich die Flüssigkeitskanäle bei dem Filtrationsprozess bevorzugt in den dünneren Bereichen des Vlieses ausbilden.

Betrachtet man den ursprünglichen Gedanken einer mathematischen Modellierung mittels Zellmodell, besteht nach den Erkenntnissen aus dieser Arbeit die Herausforderung darin, die Strukturparameter zu erfassen, die unterhalb des unteren Mikrometerbereichs liegen und daraus wiederum die Permeabilität einer jeden Zelle bestimmen zu können. Für die Auflösung auf dieser Größenskala ist ein Computertomograph bei aktuellem Stand der Technik nicht ausreichend. Eine Möglichkeit wäre es jedoch, die Informationen des Porositätsverlaufs aus den Daten des Mikro-Computertomografen zu gewinnen, ohne die Geometrie der Fasern direkt aufzulösen. Die durchgeführten Versuche zum Sättigungsverhalten und der Kanalbildung weisen jedoch darauf hin, dass die Mikrostrukturen des Vlieses von entscheidender Bedeutung für das Sättigungsverhalten sind. Die Untersuchungen der lokalen Dickeschwankungen der Vliese gaben Hinweise darauf, dass die Position des Flüssigkeitstransports durch das Vlies von dessen Makrostruktur abhängt. Insgesamt kann bei heutigen Glasfaservliesen, wie sie in der Koaleszenzfiltration verwendet werden, eine Modellierung mittels Zellmodell ohne tieferes Wissen über die Mikrostruktur nicht durchgeführt werden.

Als Ausblick für weitere Studien wird empfohlen, die Sättigung und die Flüssigkeitsverteilung von nassgelegten Glasfasermedien weiter zu untersuchen. Insbesondere sollte in weiteren Arbeiten die bevorzugte Position der Kanalbildung in Abhängigkeit der Oberflächen- und Dickenbeschaffenheit weiter untersucht werden. Ebenfalls sollte, wie schon vorherige Arbeiten vorschlagen [Pen19b], die Flüssigkeitsverteilung im Medium auf mikroskopischer und makroskopischer

Ebene, im Bezug auf die Inhomogenität der Porosität im Medium genauer untersucht werden. Um die Idee des Zellmodells weiter zu verfolgen, muss eine Möglichkeit gefunden werden, die mikroskopische Inhomogenität des Vlieses in statistisch ausreichendem Umfang zu erfassen. Eine Option wäre möglicherweise die Strukturen mit dem Computertomografen nicht direkt zu erfassen, sondern eine Porositätsverteilung als Messergebnis zu erzeugen und weiter zu verwenden. Anschließend müsste dann ein physikalischer Zusammenhang zwischen der Porositätsverteilung, der Vliesdicke und dem Sättigungsverhalten hergestellt werden. Ohne dieses Wissen muss weiterhin auf die empirischen und materialbezogenen Modelle zurückgegriffen werden, die beispielsweise von [Mea13a; Ray00; Lie85] vorgeschlagen wurden. Diese funktionieren jedoch nur an den Viesen, an denen sie auch entwickelt wurden. Ein tiefergehendes Verständnis der Sättigungsphänomenologie ist also der Schlüssel zum erfolgreichen Modellieren des Filtrationsprozesses.

Quellenverzeichnis

- [Alb19] Albrecht, K.: Nachhaltige faserverstärkte Kunststoffe: Faserorientierung und Faserschädigung in Experiment und Simulation, Erlangen, FAU University Press, 2019
- [Alb31] Albrecht, F.: Theoretische Untersuchungen über die Ablagerung von Staub aus strömender Luft und ihre Anwendung auf die Theorie der Staubfilter, In: *Physikalische Zeitschrift* (Bd. 23), S. 48–56
- [Ane95] McAneny, J.; Leith, D., et al.: Volatilization of Mineral Oil Mist Collected on Sampling Filters, In: *Applied Occupational and Environmental Hygiene* (Bd. 10), H. 9, S. 783–787
- [ANS13] ANSI/TAPPI T 410 om-13: Grammage of Paper and Paperboard (Weight per Unit Area) (2013)
- [ANS15] ANSI/TAPPI T 411 om-15: Thickness (caliper of paper, paperboard, and combined board, Test Method (2015)
- [ANS21] ANSI/TAPPIT 460 OM-21: Air Resistance of Paper (Gurley Method) (2021)
- [Ant22] Anton Paar GmbH, Internet, 2022-01-29, (www.anton-paar.com)
- [ASH] ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, Internet, 2022-01-25, (www.ashrae.org)
- [Ash09] Ashari, A.; Vahedi Tafreshi, H.: General capillary pressure and relative permeability expressions for through-plane fluid transport in thin fibrous sheets, In: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* (Bd. 346), 1-3, S. 114–122
- [AST17] ASTM D3574-17: Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials—Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams (2017)
- [AST19] ASTM F316-03: Standard Test Methods for Pore Size Characteristics of Membrane Filters by Bubble Point and Mean Flow Pore Test (2019)
- [AVK14] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.): Handbuch Faserverbundkunststoffe / Composites: Grundlagen Verarbeitung Anwendung, 4. Aufl., Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2014

- [Bar11] Baron, A. P. (Hrsg.); Kulkarni, P. (Hrsg.); Willeke, K. (Hrsg.): Aerosol measurement: Principles, techniques, and applications, 3rd ed., Hoboken N.J., Wiley, 2011
- [Bat12] Batchelor, G. K.: An Introduction to Fluid Dynamics, New York, Cambridge University Press, 2012
- [Bee52] Beer: Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten, In: *Annalen der Physik* (Bd. 163), H. 5, S. 78–88
- [Ber] Berto, L.; del Rey, R., et al.: Reuse of textile powder remainders for acoustic applications using the Wet-Laid technology, 23-27 April 2012, Nantes, France, In: 11th Congrès Français d'Acoustique, S. 4067–4071
- [Ber06] Bernard, H.: Durchfluss- und Mengenmesstechnik, 1. Aufl., München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006
- [Ber11] Bernstein J.: Optisches Multi-Sensor-Messverfahren zur dimensionellen in-line Messung von Strangprofilen im Fertigungsprozess, 2011
- [Bin22] BinNova Microfiltration GmbH, Internet, 2022-01-27, (www.bin-nova.de)
- [Ble10] Blechschmidt, J. (Hrsg.): Taschenbuch der Papiertechnik, München, Hanser Verlag, 2010
- [Boh98] Bohren C. F; Huffmann D. R.: Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Weinheim, Wiley-VCH, 1998
- [Bös14] Böswirth, L.; Bschorer, S.: Technische Strömungslehre, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- [Bro22] Bronkhorst Deutschland GmbH, Internet, 2022-01-27, (www.bronkhorst.com)
- [Bro28] Brown, R.: Mikroskopische Beobachtungen über die im Pollen der Pflanzen enthaltenen Partikeln, und über das allgemeine Vorkommen activer Moleküle in organischen und unorganischen Körpern, In: *Annalen der Physik* (Bd. 90), H. 10, S. 294–313
- [Bro93] Brown, R. C.: Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters, 1. Aufl., Pergamon Press: Elsevir, 1993
- [Bru38] Brunauer, S.; Emmett, P. H., et al.: Adsorption of Gases in Multi-molecular Layers, In: *Journal of the American Chemical Society* (Bd. 60), H. 2, S. 309–319

- [Buz04] Buzug, T. M.: Einführung in die Computertomographie: Mathematisch-physikalische Grundlagen der Bildrekonstruktion, 1. Aufl., Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2004
- [Car09] Carpentier, J.-B.; Baillot, F., et al.: Behavior of cylindrical liquid jets evolving in a transverse acoustic field, In: *Physics of Fluids* (Bd. 21), H. 2, S. 23601
- [Cha10] Charvet, A.; Gonthier, Y., et al.: Experimental and modelled efficiencies during the filtration of a liquid aerosol with a fibrous medium, In: *Chemical Engineering Science* (Bd. 65), H. 5, S. 1875–1886
- [Cha16] Chang, Cheng; Ji, Zhongli, et al.: The effect of a drainage layer on filtration performance of coalescing filters, In: *Separation and Purification Technology* (Bd. 170), S. 370–376
- [Cha17] Chang, Cheng; Ji, Zhongli, et al.: The effect of a drainage layer on the saturation of coalescing filters in the filtration process, In: *Chemical Engineering Science* (Bd. 160), S. 354–361
- [Cha18] Chang, Cheng; Ji, Zhongli, et al.: The effect of a drainage layer on saturation and liquid distribution of oleophobic coalescence filters, In: *Separation and Purification Technology* (Bd. 194), H. 8, S. 355–361
- [Che80] Cheng, Y. S.; Yeh, H. C.: Theory of a screen-type diffusion battery, In: *Journal of Aerosol Science* (Bd. 11), H. 3, S. 313–320
- [Che90] Cheng, Y. S.; Yamada, Y., et al.: Diffusion Deposition on Model Fibrous Filters with Intermediate Porosity, In: *Aerosol Science and Technology* (Bd. 12), H. 2, S. 286–299
- [Con04] Contal, P.; Simao, J., et al.: Clogging of fibre filters by submicron droplets. Phenomena and influence of operating conditions, In: *Journal of Aerosol Science* (Bd. 35), H. 2, S. 263–278
- [Cou12] Coutelieris, F. A.; Delgado, J. M. P. Q.: Transport Processes in Porous Media, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2012
- [Dav52] Davies, C. N.: The Separation of Airborne Dust and Particles, In: *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers* (1952), S. 185–198
- [Dem02] Demant, C.; Streicher-Abel, B., et al.: Industrielle Bildverarbeitung: Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert, 2. Aufl., Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2002

- [Deu08] DIN 15259: Luftbeschaffenheit – Messung von Emissionen aus stationären Quellen – Anforderungen an Messstrecken und Messplätze und an die Messaufgabe, den Messplan und den Messbericht (2008)
- [DIN10] ISO 14419: Textilien – Oleophobie – Prüfung der Ölbeständigkeit mit Hilfe von Kohlenwasserstoffen (2010)
- [DIN12] ISO 534: Papier und Pappe – Bestimmung der Dicke, der Dichte und des spezifischen Volumens (2012)
- [DIN17] ISO 16890-2: Luftfilter für die allgemeine Raumlufttechnik: Teil 2: Ermittlung des Fraktionsabscheidegrades und des Durchflusswiderstandes (2017)
- [DIN19a] EN 1822-1: Schwebstofffilter (EPA, HEPA und ULPA): Teil 1: Klassifikation, Leistungsprüfung, Kennzeichnung (2019)
- [DIN19b] DIN 12790: Laborgeräte aus Glas – Aräometer – Grundlagen für Bau und Justierung (2019)
- [DIN20] ISO 536: Papier und Pappe – Bestimmung der flächenbezogenen Masse (2020)
- [DIN90] ISO 4003: Durchlässige Sintermetalle: Ermittlung der Porengröße mittels Gasblasentest (1990)
- [DIN92] EN 29073: Prüfverfahren für Vliesstoffe: Teil 1 : Bestimmung der flächenbezogenen Masse (1992)
- [DIN95] ISO 9237: Bestimmung der Luftpurchlässigkeit von textilen Flächengebilden (1995)
- [DIN97] ISO 9073-2: Prüfverfahren für Vliesstoffe: Teil 2: Bestimmung der Dicke (1997)
- [Dra19] Drabek, J.; Zatloukal, M.: Meltblown technology for production of polymeric microfibers/nanofibers: A review, In: *Physics of Fluids* (Bd. 31), H. 9
- [Dut08] Dutton, K. C.: Overview and Analysis of the Meltblown Process and Parameters, In: *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management* (Bd. 6), H. 1
- [EDA] EDANA - European Disposables and Nonwovens Association: superabsorbent polymers, Internet, 2022-01-22
- [EDA15] EDANA NWSP 120.6: Nonwoven Thickness (2015)
- [Era13] Eral, H. B.; Mannetje, D. J. C. M 't., et al.: Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications, In: *Colloid and Polymer Science* (Bd. 291), H. 2, S. 247–260

- [Erb33] Erbe, F.: Die Bestimmung der Porenverteilung nach ihrer Größe in Filtern und Ultrafiltern, In: *Kolloid-Zeitschrift* (Bd. 63), S. 277–285
- [Eur15] Europäische Gesellschaft für gesundes Bauen und Innenraumhygiene: Stellungnahme zu künstlicher Mineralfaser (KMF) - Steinwolle/ Mineralwolle aus gesundheitlicher Sicht (2015)
- [Flü56] Flügge S. (Hrsg.): Grundlagen der Optik: Fundamentals of Optics, 24. Aufl., Berlin Göttingen Heidelberg, Springer-Verlag, 1956
- [Fon99] Fong H., Chun i., Reneker D. H.: Beaded nanofibers formed during electrospinning, In: *The International Journal for the Science and Technology of Polymers* (Bd. 40), S. 4585–4592
- [For30] Formhals, A.: Process and apparatus for preparing artificial threads. Anmeldenr. 500,283., USA. Veröffentlichungsnr. 1,975,504, Mai 1930
- [Für99] Förster, B.: Ein neues Zellmodell zur bestimmung von Abscheidegrad und Druckverlust der in der Klimatechnik verwendeten Filtermedien, Essen, 1999
- [Fuc12] Fuchs, H. (Hrsg.); Albrecht, W. (Hrsg.): Vliesstoffe: Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung, 2. Aufl., Weinheim, Wiley-VCH, 2012
- [Gai12] Gail, L.; Gommel, U., et al.: Reinraumtechnik, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2012
- [Gaß09] Gaßmann E.; Gries A.: Elektronische Druckmesstechnik: Grundlagen, Anwendungen und Geräteauswahl, Verlag Moderne Industrie, 2009
- [Gra02] Graham, K.; Ouyang, M., et al.: Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications (Fifteenth Annual Technical Conference & Expo). Galveston, Texas, USA, 2002-04-09
- [Gre07] Greiner, A.; Wendorff, J. H.: Elektrospinnen: eine faszinierende Methode zur Präparation ultradünner Fasern, In: *Angewandte Chemie* (Bd. 119), H. 30, S. 5770–5805
- [Gri18] Grimm-Bosbach, T.; Mörk, M.: Diskussion über den Einsatz alternativer Filtermedien. Persönliche korrespondenz, 2018-07-12. (Adressat)
- [Gri19] Gries, T. (Hrsg.); Veit, D. (Hrsg.); Wulffhorst, B. (Hrsg.): Textile Fertigungsverfahren, 3. Aufl., München, Hanser Verlag, 2019
- [Hae15] Haefner, S.; Benzaquen, M., et al.: Influence of slip on the Plateau-Rayleigh instability on a fibre, In: *Nature communications* (Bd. 6)

- [Hap58] Happel, J.: Viscous flow in multiparticle systems: Slow motion of fluids relative to beds of spherical particles, In: *A.I.Ch.E. Journal* (Bd. 4), H. 2, S. 197–201
- [Hau14] Haus, J.: Optische Mikroskopie: Funktionsweise und Kontrastierverfahren, Wiley-VCH, 2014
- [Hel68] Helmholtz, H.: On discontinuous movements of fluids, In: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (Bd. 36), H. 244, S. 337–346
- [Her96] Hernández, A.; Calvos, J. I., et al.: Pore size distributions in micro-porous membranes: A critical analysis of the bubble point extended method, In: *Journal of Membrane Science* (Bd. 112), S. 1–12
- [Hew92] Hewitt A. J.: Droplet size spectra produced by the X15 stacked spinning-disc atomizer of the Ulvamast Mark II sprayer, In: *Crop Protection* (Bd. 11), S. 221–224
- [Hew93] Hewitt A. J.: Droplet size spectra produced by air-assisted atomizers, In: *Journal of Aerosol Science* (Bd. 24), H. 2, S. 155–162
- [Hil81] Hiller, R.: Der Einfluss von Partikelstoß und Partikelhaftung auf die Abscheidung in Faserfiltern, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1981
- [Hin99] Hinds, W. C. (Hrsg.): *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, New York, Wiley, 1999
- [Hol15] Holz, C. J.; Mead-Hunter, R., et al.: Detachment of droplets from cylinders in flow using an experimental analogue, In: *Journal of Fluid Mechanics* (Bd. 771), S. 327–340
- [Hol22] Hollingsworth & Vose GmbH, Internet, 2022-01-27, (www.de.hollingsworth-vose.com)
- [Hus09] Hussain, D.: Makroskopische Eigenschaften von elektrogesponnenen Nanofaser-Vliesen: Vergleich von theoretischen Vorhersagen und experimentellen Befunden, Marburg, 2009
- [Hut07] Hutton, I. M.: *Handbook of nonwoven Filter Media*, Burlington, Elsevier, 2007
- [IND] INDA Association of the Nonwoven Fabrics Industry, Internet, 2022-01-25, (<https://www.inda.org>)
- [IND20] INDA NWSP 120.1: Thickness of Nonwoven Fabrics (2020)
- [ISO03] ISO 11224: Textilien - Vliesstoffe; Vliesbildung und -bindung - Fachwörterverzeichnis (2003)
- [ISO07] NEN ISO 12500-2: Filters for compressed air - Test methods: Part 2: Oil vapours (2007)

- [ISO08] ISO16889: Hydraulic fluid power — Filters — Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element (2008)
- [ISO81] ISO 4572: Fluidtechnik, Hydraulik; Filter; Bewertung der Filtrationsleistung im Mehrfachdurchlaufverfahren (1981)
- [Jag09] Jaganathan, S.; Tafreshi, H. V., et al.: A realistic modeling of fluid infiltration in thin fibrous sheets, In: *Journal of Applied Physics* (Bd. 105), H. 11, S. 113522
- [Jon13] Jones, I. (Hrsg.); Stylios, G. K. (Hrsg.); POURMOHAMMADI, A. (Mitarb.): Joining textiles: Principles and applications, 1. Aufl., Sawston, Woodhead Publishing, 2013
- [Joo06] Joos, F.: Technische Verbrennung, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006
- [Kam14a] Kampa, D.: Filtration von Ölnebel: Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2014
- [Kam14b] Kampa, D.; Wurster, S., et al.: Pressure drop and liquid transport through coalescence filter media used for oil mist filtration, In: *International Journal of Multiphase Flow* (Bd. 58), S. 313–324
- [Kam15] Kampa, D.; Wurster, S., et al.: Validation of a new phenomenological “jump-and-channel” model for the wet pressure drop of oil mist filters, In: *Chemical Engineering Science* (Bd. 122), S. 150–160
- [Ker75] Kerker M.: Laboratory Generation of Aerosol, In: *Adv. Colloid Interface Science* (Bd. 5), H. 5, S. 105–175
- [Key] Keyence Corporation: Messung von Konturen, Ebenheiten und Rauheiten innerhalb einer Sekunde: 3D-Profilometer, Internet, 2022-01-20, (www.keyence.de)
- [Kız18] Kızılarsü, A.; Kreer, M., et al.: The Weibull distribution, In: *Significance* (Bd. 15), H. 2, S. 10–11
- [Kol18] Kolb H. E., Schmitt R., Dittler A., Kasper G.: On the accuracy of capillary flow porometry for fibrous filter media, In: *Separation and Purification Technology* (2018), H. 199, S. 198–205
- [Kol19a] Kolb, H. E.; Kasper, G.: Mist filters: How steady is their “steady state”?-, In: *Chemical Engineering Science* (Bd. 204), S. 118–127
- [Kol19b] Kolb, Eckhard; Kasper, Gerhard: On the functioning of coalescence filters with a drainage layer – A comment on several papers by Chang et al, In: *Separation and Purification Technology* (Bd. 225), S. 54–59

- [Kuw59] Kuwabara, S.: The Forces experienced by Randomly Distributed Parallel Circular Cylinders or Spheres in a Viscous Flow at Small Reynolds Numbers, In: *Journal of the physical Society of Japan* (Bd. 14), H. 4, S. 527–532
- [Lee82] Lee, K. W.; Liu, B. Y. H.: Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters, In: *Aerosol Science and Technology* (Bd. 1), S. 147–161
- [Lei96a] Leith, D.; Leith, F. A., et al.: Laboratory measurements of oil mist concentrations using filters and an electrostatic precipitator, In: *American Industrial Hygiene Association journal* (Bd. 57), H. 12, S. 1137–1141
- [Lei96b] Leith, D.; Raynor, P. C., et al.: Performance of Industrial Equipment to Collect Coolant Mist, In: *American Industrial Hygiene Association journal* (Bd. 57), H. 12, S. 1142–1148
- [Leu18] Leubner, O.; Binzer, J.: Vorstellung und Präsentation des Unternehmens BinNova Microfiltration GmbH, 2018-09-26. (Adressat)
- [Lie85] Liew, T. P.; Conder, J. R.: Fine mist filtration by wet filters—I. Liquid saturation and flow resistance of fibrous filters, In: *Journal of Aerosol Science* (Bd. 16), H. 6, S. 497–509
- [Lif05] Lifshutz, N.: On the ‘Mean Flow’ Pore Size Distribution of Microfiber and Nanofiber Webs, In: *International Nonwovens Journal* (Bd. 14), H. 1, S. 18–24
- [Löf72] Löffler, F.; Muhr, W.: Die Abscheidung von Feststoffteilchen und Tropfen an Kreiszylindern infolge von Trägheitskräften, In: *Chemie Ingenieur Technik* (Bd. 44), H. 8, S. 410–514
- [Löf88] Löffler, F.: Staubabscheiden, New York, Stuttgart, Georg Thieme Verlag, 1988
- [Lor09] Lorenceau, É.; Clanet, C., et al.: Off-centre impact on a horizontal fibre, In: *The European Physical Journal Special Topics* (Bd. 166), S. 3–6
- [Lyd22] Lydall Inc., Internet, 2022-01-27, (www.lydallpm.com)
- [May14] Mayer, P.: Einführung in die Mikroskopie, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 1914
- [May19] Mayerhöfer, T. G.; Popp, J.: Beer's Law - Why Absorbance Depends (Almost) Linearly on Concentration, In: *Chemphyschem : a European journal of chemical physics and physical chemistry* (Bd. 20), H. 4, S. 511–515

- [May73] May K. R.: The collision nebulizer: Description, performance and application, In: *Journal of Aerosol Science* (Bd. 4), H. 3, S. 239–243
- [Mea] Measurement Computing GmbH, Internet, 2022-01-12, (www.mccdaq.de)
- [Mea13a] Mead-Hunter, R.; Braddock, R. D., et al.: The relationship between pressure drop and liquid saturation in oil-mist filters – Predicting filter saturation using a capillary based model, In: *Separation and Purification Technology* (Bd. 104), S. 121–129
- [Mea13b] Mead-Hunter, R.; King, A. J. C., et al.: Computational fluid dynamics (CFD) simulation of liquid aerosol coalescing filters, In: *Journal of Aerosol Science* (Bd. 61), H. 3, S. 36–49
- [Mea14] Mead-Hunter, R.; King, A. J. C., et al.: Aerosol-mist coalescing filters – A review, In: *Separation and Purification Technology* (2014), H. 4, S. 484–506
- [Mea17] Mead-Hunter, R.; King, A. J. C., et al.: Fibrous filtration of liquid aerosols, In: Brown, C. (Hg.) 2017 – Fibrous filter media, S. 51–93
- [Mer68] Mercer, T. T.; Tillery, M. I., et al.: Operating characteristics of some compressed-air nebulizers, In: *American Industrial Hygiene Association journal* (Bd. 29), H. 1, S. 66–78
- [Mie08] Mie G.: Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen, In: *Annalen der Physik* (Bd. 25), H. 4, S. 377–445
- [Mor08] Morison, K. R.: A comparison of liquid–liquid porosimetry equations for evaluation of pore size distribution, In: *Journal of Membrane Science* (Bd. 325), H. 1, S. 301–310
- [Mug51] Mugele, R. A.; Evans, H. D.: Droplet Size Distribution in Sprays, In: *Industrial & Engineering Chemistry* (Bd. 43), H. 6, S. 1317–1324
- [Mui67] Muir D. C. F.; Davis C. N.: The Deposition of 0·5 μ Diameter Aerosol in the Lungs of Man, In: *Annals of Occupational Hygiene* (Bd. 10), S. 161–174
- [Mul05] Mullins, B. J.; Braddock, R. D., et al.: Observation and modelling of clamshell droplets on vertical fibres subjected to gravitational and drag forces, In: *Journal of Colloid and Interface Science* (Bd. 284), S. 245–254
- [Mul06] Mullins, B. J.; Kasper, G.: Comment on: “Clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: Experimental and

- phenomenological modelling study” by Frising et al, In: *Chemical Engineering Science* (Bd. 61), H. 18, S. 6223–6227
- [Mul07] Mullins, B. J.; Pfrang, A., et al.: Detachment of liquid droplets from fibres—Experimental and theoretical evaluation of detachment force due to interfacial tension effects, In: *Journal of Colloid and Interface Science* (Bd. 312), S. 333–340
- [Nag06] Nagel, D.; Schaber, K.: Charakterisierung und Abscheidung von Ölnebel. Karlsruhe, 2006
- [Nag07] Nagel, D.; Stokmann, R., et al.: Berechnung der Verdunstungseinflüsse auf die Aerosolmesstechnik bei der Bewertung Von Kühlenschmierstoffen, In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung Luft* (Bd. 67), 7/8, S. 297–303
- [Nei99] Neimark, A. V.: Thermodynamic equilibrium and stability of liquid films and droplets on fibers, In: *Journal of Adhesion Science and Technology* (Bd. 13), H. 10, S. 1137–1154
- [Neu17] Neuser, E.; Sommerfeld, D.: nanotom® Computertomographie mit Submikrometerauflösung (DGZfP-Jahrestagung 2007). 2017
- [Ngu15] Nguyen, T. B.; Le, T. S., et al.: Design of Rotoformer Mechanism and Cooling Steel - Conveyor in Sulfur Granulation Systems, In: *Key Engineering Materials* (656-657), S. 456–460
- [Nic70] Nicolaon G.; Cooke D. D., et al.: A New Liquid Aerosol Generator, In: *Journal of Colloid and Interface Science* (Bd. 34), H. 4, S. 534–544
- [Nie19] Niedermeyer, L.: Filtrationskinetik offener Partikelfilter, 2019
- [Ohn36] Ohnesorge, W.: Die Bildung von Tropfen an Düsen und die Auflösung flüssiger Strahlen, In: *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* (Bd. 16), H. 6, S. 355–358
- [Orh20] Orhan, K. (Hrsg.): Micro-computed Tomography (micro-CT) in Medicine and Engineering, Cham, Springer International Publishing, 2020
- [Pal] Palas GmbH, Internet, 2022-01-11, (www.palas.de)
- [Pen19a] Penner, T.; Meyer, J., et al.: Impact of operating conditions on the evolution of droplet penetration in oil mist filters, In: *Separation and Purification Technology* (Bd. 211), H. 3, S. 697–703
- [Pen19b] Penner, Thomas; Heikamp, Wolfgang, et al.: Einfluss ausgewählter Medienstrukturparameter auf das Betriebsverhalten von Ölnebelfiltern, In: *Chemie Ingenieur Technik* (Bd. 91), H. 11, S. 1615–1622

- [Pen20] Penner, T.; Meyer, J., et al.: Relevance of downstream support structure design for oleophilic and oleophobic oil mist filter operating performance, In: *Separation and Purification Technology* (Bd. 248), S. 117074
- [Pen21a] Penner, T.; Meyer, J., et al.: Oleophilic and oleophobic media combinations – Influence on oil mist filter operating performance, In: *Separation and Purification Technology* (Bd. 261), S. 118255
- [Pen21b] Penner, T.; Meyer, J., et al.: Characterization of mesoscale inhomogeneity in nonwovens and its relevance in the filtration of fine mists, In: *Journal of Aerosol Science* (Bd. 151), H. 7, S. 105674
- [Pet04] Peter H. H.: Röntgenaufnahmetechnik: Grundlagen und Anwendungen, 1. Aufl., Publicis Publishing, 2004
- [Pfe22] Pfeffinger, M.; Palas GmbH: Kalibrierkurven basieren auf dem Brechungsindex. Email, 2022-02-23. (Adressat)
- [Pia01] Piacitelli, G. M.; Sieber, W. K., et al.: Metalworking fluid exposures in small machine shops: an overview, In: *AIHAJ: a journal for the science of occupational and environmental health and safety* (Bd. 62), H. 3, S. 356–370
- [Pol40] Polzin, J.: Strömungsuntersuchungen an einem ebenen Diffusor, In: *Ingenieur-Archiv* (Bd. 11), H. 5, S. 361–385
- [Pro08] Profos P. (Hrsg.); Pfeifer T. (Hrsg.): Handbuch der industriellen Meßtechnik, 6. Aufl., München Wien, Oldenbourg Industrieverlag, 2008
- [Qin06] Qin, X.-H.; Wang, S.-Y.: Filtration properties of electrospinning nanofibers, In: *Journal of Applied Polymer Science* (Bd. 102), H. 2, S. 1285–1290
- [Rap55] Rapaport E.; Weinstock S. E.: A Generator for Homogeneous Aerosols, In: *Cellular and Molecular Life Sciences* (Bd. 11), H. 9, S. 363–364
- [Ray00] Raynor, P. C.; Leith, D.: The influence of accumulated liquid on fibrous filter performance, In: *Journal of Aerosol Science* (Bd. 31), H. 1, S. 19–34
- [Ray79] Rayleigh Lord, F. R. S.: On the Stability, or Instability, of certain Fluid Motions, In: *Proceedings of the London Mathematical Society* (Bd. 10), H. 4, S. 57–72
- [Reb92] Rebours A.; Boulaud, D., et al.: Production of monodispersed aerosol by evaporation and condensation of vapor under control process., In: *Journal of Aerosol Science* (Bd. 23), S. 189–192

- [Rei82] Reitz, R. D.: Mechanism of atomization of a liquid jet, In: *Physics of Fluids* (Bd. 25), H. 10, S. 1730
- [Ric31] Richards, L. A.: Capillary conduction of liquids through porous media, In: *Physics* (Bd. 1), H. 5, S. 318–333
- [Rit04] Ritman, E. L.: Micro-computed tomography-current status and developments, In: *Annual review of biomedical engineering* (Bd. 6), S. 185–208
- [Rit11] Ritman, E. L.: Current status of developments and applications of micro-CT, In: *Annual review of biomedical engineering* (Bd. 13), S. 531–552
- [Roe75] Roe, R. J.: Wetting of Fine Wires and Fibers by a liquid Film, In: *Journal of Colloid and Interface Science* (Bd. 50), H. 1, S. 70–79
- [Ros33] Rosin, P.; Rammler, E.: The laws governing the fineness of powdered coal, In: *Journal of the Institute of Fuel* (Bd. 7), S. 29–36
- [Ryl59] Ryley d. J.: Analysis of a polydisperse aqueous spray from a high-speed spinning disk atomizer, In: *British Journal of Applied Physics* (Bd. 10), H. 4, S. 180–186
- [Sau01] Sauter H. L.; Trautmann P., et al.: Messung und Abscheidung von Ölnebel aerosolen aus der Kurbelgehäuseentlüftung von Verbrennungsmotoren: Teil 2: Konzepte zur Abscheidung von Ölropfchen bei der Kurbelgehäuseentlüftung, In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* (2001), H. 62, S. 80–83
- [Sch03] Schubert H. (Hrsg.): Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik: Partikeleigenschaften, Mikroprozesse, Makroprozesse, Zerteilen, Agglomerieren, Trennen, Mischen, Schüttgut, Weinheim, Wiley-VCH, 2003
- [Sch19] Schönenfeld, F.: Kapillarfluss-Porometer, In: *CITplus* (Bd. 22), H. 10, S. 31–32
- [Sch93] Schweers, E.: Einfluss der Filterstruktur auf das Filtrationsverhalten von Tiefenfiltern, Düsseldorf, Karlsruhe, 1993
- [Sch94] Schaefer, H. (Hrsg.): VDI-Lexikon Energietechnik, Berlin, Springer-Verlag, 1994
- [Seu10] Seume, J. (Hrsg.); Lechner, C. (Hrsg.): Stationäre Gasturbinen, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010
- [Sin49] Sinclair D.; La Mar, V. K.: Light Scattering as a Measure of Particle Size in Aerosols: The Production of Monodisperse Aerosols, In: *Chemical Reviews* (1949), H. 44, S. 245–267

- [STE] Stemmer Imaging AG: Beleuchtungstechniken für die industrielle Bildverarbeitung, Puchheim, Internet, 2022-01-19, (www.stemmer-imaging.com)
- [Sti09] Stieß, M. (Hrsg.): Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [Sub69] Subramanyam, M. V.; Kuloor, N. R.: Dust Deposition on Single Cylinders, In: *Annals of Occupational Hygiene* (Bd. 12), H. 1, S. 9–25
- [Sun73] Suneja, S. K.; H, Lee C.: Aerosol Filtration by fibrous Filters at intermediate reynolds numbers, In: *Atmospheric Environment* (Bd. 8), S. 1081–1094
- [Tes13] Teschner, R.: Glasfasern, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2013
- [Thé17] Théron, F.; Lys, E., et al.: 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, In: *Powder Technology* (Bd. 320), H. 10, S. 295–303
- [Trä98] Tränkler H.-R. (Hrsg.): Sensortechnik: Handbuch für Praxis und Wissenschaft, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 1998
- [Tro54] Troesch, H. A.: Die Zerstäubung von Flüssigkeiten, In: *Chemie Ingenieur Technik* (Bd. 26), H. 6, S. 311–320
- [VDI19] VDI 2066: Messung von Partikeln Staubmessung in strömenden Gasen Gravimetrische Bestimmung der Staubbeladung (2019)
- [Ver04] VDI3677: Filternde Abscheider: Tiefenfilter aus Fasern (2004)
- [Ver16] VDI 3491: Messen von Partikeln: Herstellungsverfahren für Prüf aerosole Kondensationsverfahren (2016)
- [Ves80] Vesilind, P. A.: The Rosin-Rammler particle size distribution, In: *Resource Recovery and Conservation* (Bd. 5), S. 275–277
- [Wal49] Walton W. H.; Prewett W. C.: The Production of Sprays and Mists of Uniform Drop Size by Means of Spinning Disc Type Sprayers, In: *Proceedings of the Physical Society* (Bd. 62), H. 6, S. 341–350
- [Wal80] Walzel, P.: Zerteilgrenze beim Tropfenprall, In: *Chemie Ingenieur Technik* (Bd. 52), H. 4, S. 338–339
- [Wal90] Walzel, P.: Zerstäuben von Flüssigkeiten, In: *Chemie Ingenieur Technik* (Bd. 62), H. 12, S. 983–994
- [Was21] Washburn, E. W.: The Dynamics of Capillary Flow, In: *Physical Review* (Bd. 17), H. 3, S. 273–283

- [Web31] Weber, C.: Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles, In: *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik* (Bd. 11), H. 2, S. 136–154
- [Wec09] Weckenmann, A.; Bernstein, J.: Optical Bi-Sensorial Measurement System for Production Control of Extruded Profiles, In: *tm - Technisches Messen* (Bd. 76), 7-8, S. 369–373
- [Wen12] Wendorff, J. H.: *Electrospinning: Materials, Processing, and Applications*, 1. Aufl., Weinheim, Wiley-VCH, 2012
- [WIKA] WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, Internet, 2022-01-12, (www.wika.com)
- [Woz03] Wozniak G.: *Zerstäubungstechnik: Prinzipien, Verfahren, Geräte*, Springer Berlin Heidelberg, 2003
- [Wu86] Wu, K.-J.; Reitz, R. D., et al.: Measurements of drop size at the spray edge near the nozzle in atomizing liquid jets, In: *Physics of Fluids* (Bd. 29), H. 4, S. 941
- [Wur15a] Wurster, S.; Kampa, D., et al.: Measurement of oil entrainment rates and drop size spectra from coalescence filter media, In: *Chemical Engineering Science* (Bd. 132), H. 12, S. 72–80
- [Wur15b] Wurster, S.; Meyer, J., et al.: Bubbling vs. blow-off – On the relevant mechanism(s) of dropentrainment from oil mist filter media, In: *Separation and Purification Technology* (Bd. 152), S. 70–79
- [Wur17] Wurster, S.: Entrainment von Öltropfen an der Rückwand eines Faserfilters, Karlsruhe, 2017
- [Zeu05] Zeuke, M.: Superabsorber aus nachwachsenden Rohstoffen. Die gezielte Synthese mit nachwachsenden Rohstoffen, In: *CHEMKON* (Bd. 12), H. 4, S. 155–159
- [Zha98] Zhang, D.: Evolution of Structure and Properties in a Spunbonding Process, In: *Textile Research Journal* (Bd. 68), H. 1, S. 27–35

Studentische Arbeiten

Die nachstehend aufgeführten studentischen Arbeiten wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation am Lehrstuhl für Partikelverfahrenstechnik der Universität Paderborn angefertigt. Die Definition der Aufgabenstellung, die Bearbeitung sowie die Auswertung, Interpretation und Visualisierung von Ergebnissen erfolgten unter wissenschaftlicher Anleitung des Verfassers dieser Dissertation. Die erzielten Ergebnisse sind zum Teil in die Arbeit eingeflossen.

- [Are21] Arens, C. (Betreuer: Hassel, R.): Untersuchung des Sättigungsverhaltens von Koaleszenzfiltervliesen und den Wiedereintrag bereits abgeschiedener Tropfen, unveröffentlichte Masterarbeit, 2021
- [Kra18] Kramer, P. (Betreuer: Hassel, R.): Entwicklung und Aufbau eines Teststandes zur Charakterisierung des Sättigungsverhaltens von Koaleszenzabscheidern, unveröffentlichte Studienarbeit, 2018
- [Seu20] Seuthe, J. (Betreuer: Hassel, R.): Untersuchung der makroskopischen Oberflächenstruktur von Vliesen bei der Tröpfchen Aerosol Filtration, unveröffentlichte Studienarbeit, 2020
- [Xu20] Xu, J. (Betreuer: Hassel, R.): Inbetriebnahme und Charakterisierung eines Aufbaus zur definierten Herstellung eines monodispersen Tropfenaerosol; unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2020
- [Yu20] Yu, M. (Betreuer: Hassel, R.): Charakterisierung eines Versuchsaufbaus zur Messung des Betriebsverhaltens von Koaleszenzfiltern medien, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2020

Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten

In Ergänzung zu meinem Antrag auf Zulassung zur Promotion in der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn erkläre ich gemäß §11 der Promotionsordnung und unter Beachtung der Regelung zur Zitation studentischer Arbeiten:

Die von mir vorgelegte Dissertation habe ich selbstständig verfasst, und ich habe keine anderen als die dort angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Es sind Inhalte studentischen Ursprungs (studentische Arbeiten) in dieser Dissertation enthalten.

Ich habe die verwendeten Arbeiten entsprechend der Regelung „Zitation aus studentischen Arbeiten in Dissertationen“ zitiert.

Rinteln, 01.04.2023

(Richard Hassel)

