



forschen.
vernetzen.
anwenden.

Innovationsreport 2019

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF-Forschungsvorhaben 19109 N

Steigerung der Energieeffizienz der Drucklufttechnik - SEEDT

Laufzeit:

01.07.2016 – 31.12.2018

Beteiligte Forschungsstelle(n):

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT GmbH,
Duisburg

Technische Universität Dortmund
Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen
Lehrstuhl für Strömungsmechanik

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.,
Bereich Luftreinhaltung & Filtration

iuta.de

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19109 N/1

Thema

Steigerung der Energieeffizienz der Drucklufttechnik (SEEDT): Analyse von Zweiphasen-Prozessen in Filtrationsmedien

Berichtszeitraum

01.07.2016 - 31.12.2018

Forschungsvereinigung

Institut für Energie- und Umwelttechnik (IUTA) e.V.

Forschungsstelle(n)

1. Zentrum für BrennstoffzellenTechnik (ZBT), Carl-Benz-Str. 201, 47057 Duisburg
2. Technische Universität Dortmund, Strömungsmechanik, Emil-Figge-Str. 68, 44221 Dortmund
3. Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA), Bliersheimer Str. 58-60, 47229 Duisburg

Duisburg, 02.05.2019

Ort, Datum

Nadine v. d. Schoot

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

24.04.19 Dortmund

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Duisburg, 02.05.2019

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

W. Mölter -
Siemens

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Forschungsnetzwerk
Mittelstand

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1.	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	3
1.1	Arbeitspaket 1: Aufbau eines Messverfahrens zur Vermessung und Visualisierung der Phasenausbreitung in porösen Strukturen (ZBT)	4
1.2	Arbeitspaket 2: Aufbau von Versuchsständen zur optischen Analyse von Filtrationsmedien (ZBT/IUTA)	5
1.3	Arbeitspaket 3: Durchführung von Messungen mit Verfahren aus AP 1 an verschiedenen Filtermedien und definierten porösen Strukturen (ZBT)	7
1.4	Arbeitspaket 4: Untersuchung und Charakterisierung verschiedener Filtermaterialien (Porosität, Permeabilität, Tortuosität, Benetzung, etc.); Auswahl geeigneter Materialien (IUTA)	8
1.5	Arbeitspaket 5: Modellierung der Ausbreitungsmechanismen einer eintretenden flüssigen Phase in den Poren definierter Teststrukturen mittels VOF (LSM).....	24
1.6	Arbeitspaket 6: Aufbau eines Messverfahrens zur integralen Vermessung des zeitlich veränderlichen Sättigungsgrades (Durchlicht-Verfahren in Kombination mit Fluoreszenz) (ZBT)	30
1.7	Arbeitspaket 7: Aufbau eines Verfahrens zur Vermessung der Durchtrittsgeschwindigkeitsverteilung (ZBT)	33
1.8	Arbeitspaket 8: Messungen des Sättigungsgrades und der Strömungsverhältnisse am Filter (ZBT/ IUTA)	34
1.9	Arbeitspaket 9: Ermittlung von Korrelationen zu Durchfluss und Druckwiderstand; Erarbeitung von entsprechenden Modellen für klassische CFD-Verfahren (Makroskala) (LSM)	43
1.10	Arbeitspaket 10: Vermessung von Test-Filterstrukturen unter Realbedingungen im Filterteststand zur Ermittlung von Standzeiten, Druckverlusten, etc. (IUTA).....	49
1.11	Arbeitspaket 11: Implementierung der gefundenen Korrelationen und Modelle in kommerziellen Strömungslöser und Simulation kompletter Filterstrukturen (IUTA).....	52
1.12	Entwicklung eines Werkzeugs zur Optimierung von Druckluftfiltern und Erstellen von Auslegungsrichtlinien für die Auswahl von Filtermaterialien und der Konstruktion von Filtern. (IUTA)	59
2.	Verwendung der Zuwendung	59
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	60
4.	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU.....	60
5.	Durchführende Forschungsstellen.....	61
6.	Förderhinweis und Danksagung.....	61
7.	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	62
7.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen	62
7.2	Geplante Transfermaßnahmen	63
7.3	Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts	63
8.	Literatur.....	63

1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Ziel des vorliegenden Projektes war es, ein Werkzeug zur Entwicklung optimierter Druckluftfilter zu erstellen. Bei Kenntnis der ungesättigten Eigenschaften eines Filtermediums sollte es Firmen aus dem Bereich der Filtrations- und Drucklufttechnik ermöglicht werden, mit den Randbedingungen Massenkonzentration, Ölsorte, Volumenstrom, Temperatur, Struktur- und Materialparameter der Filter mit Hilfe einfacher numerischer Simulationen das sich über die Betriebszeit ändernde Verhalten eines Filtermediums vorherzusagen. So können Druckluftfilter in kürzerer Zeit und mit weniger Aufwand hinsichtlich ihres individuellen Einsatzes optimiert werden. Die gewonnenen Kenntnisse und Methoden hinsichtlich des Verhaltens von Flüssigkeiten in gasdurchströmten porösen Medien beschränken sich selbstverständlich nicht auf die Druckluftfiltertechnik, sondern können auch in anderen relevanten Anwendungsgebieten, z.B. bei Koaleszenzfiltern im Reinflufttechnik-Bereich, Filtern in Tankbelüftungsanlagen, GetriebeentlüftungsfILTER oder aber auch in der Brennstoffzellentechnik oder der chemischen Verfahrenstechnik, bei denen mehrphasige Strömungssysteme in porösen Geweben, Gitterstrukturen oder Schüttungen etc. vorkommen, genutzt werden.

Die entwickelten Modelle sollten in kommerzielle CFD-Software integriert werden. Die experimentellen Untersuchungen dienen insbesondere zur Absicherung geeigneter Eingangs- und Randbedingungen für die Modellierung relevanten Kenngrößen wie den Druckabfall oder die Flüssigkeitsbeladung und der Validierung der numerischen Vorhersagen, die die empirisch bestimmten Druckwiderstands- und Durchflusskorrelationen verwenden.

Die Gegenüberstellung der im Antrag aufgestellten Projektziele mit den erreichten Zielen ist in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Die durchgeführten Arbeiten werden explizit in den anschließenden Unterkapiteln erläutert.

Tabelle 1: Status der Projektziele

AP	Zielsetzung gemäß Forschungsantrag	Status
AP 1	Aufbau eines Messverfahrens zur Vermessung und Visualisierung der Phasenausbreitung in porösen Strukturen (ZBT)	abgeschlossen
AP 2	Aufbau von Versuchsständen zur optischen Analyse von Filtrationsmedien (ZBT/IUTA)	abgeschlossen
AP 3	Durchführung von Messungen mit Verfahren aus AP 1 an verschiedenen Filtermedien und definierten porösen Strukturen (ZBT)	abgeschlossen
AP 4	Untersuchung und Charakterisierung verschiedener Filtermaterialien (Porosität, Permeabilität, Tortuosität, Benetzung, etc.); Auswahl geeigneter Materialien (IUTA)	abgeschlossen
AP 5	Modellierung der Ausbreitungsmechanismen einer eintretenden flüssigen Phase in den Poren definierter Teststrukturen mittels VOF (LSM)	abgeschlossen
AP 6	Aufbau eines Messverfahrens zur integralen Vermessung des zeitlich veränderlichen Sättigungsgrades (Durchlicht-Verfahren in Kombination mit Fluoreszenz) (ZBT)	teilweise abgeschlossen
AP 7	Aufbau eines Verfahrens zur Vermessung der Durchtrittsgeschwindigkeitsverteilung (ZBT)	abgeschlossen
AP 8	Messungen des Sättigungsgrades und der Strömungsverhältnisse am Filter (ZBT/ IUTA)	abgeschlossen

AP 9	Ermittlung von Korrelationen zu Durchfluss und Druckwiderstand; Erarbeitung von entsprechenden Modellen für klassische CFD-Verfahren (Makroskala) (LSM)	abgeschlossen
AP 10	Vermessung von Test-Filterstrukturen unter Realbedingungen im Filterteststand zur Ermittlung von Standzeiten, Druckverlusten, etc. (IUTA)	abgeschlossen
AP 11	Implementierung der gefundenen Korrelationen und Modelle in kommerziellen Strömungslöser und Simulation kompletter Filterstrukturen (IUTA)	abgeschlossen
AP 12	Entwicklung eines Werkzeugs zur Optimierung von Druckluftfiltern und Erstellen von Auslegungsrichtlinien für die Auswahl von Filtermaterialien und der Konstruktion von Filtern. (IUTA)	teilweise abgeschlossen

1.1 Arbeitspaket 1: Aufbau eines Messverfahrens zur Vermessung und Visualisierung der Phasenausbreitung in porösen Strukturen (ZBT)

Ein optischer Versuchsstand mit digitalen Mikroskopkameras zur qualitativen und quantitativen Analyse der Phasenausbreitung in porösen Strukturen wurde entwickelt und aufgebaut. Zwei Mikroskopkameras ermöglichen die Beobachtung der Ober- und Unterseite von künstlich präparierten porösen Strukturen oder von realen Filtermaterialien. In Abb. 1 sieht man den Versuchsstand mit oberer und unterer Kamera. Zudosierung von gefärbten Flüssigkeiten wurde über eine Spritzenpumpe (Nemesys, Cetoni) und Spritzenkanüle (Sterican 0,3 x 12 mm) realisiert. Durch Verkippung der zu untersuchenden Zelle und durch die Beobachtung aus zwei Raumrichtungen ist eine Beurteilung des Schwerkrafteinflusses möglich.

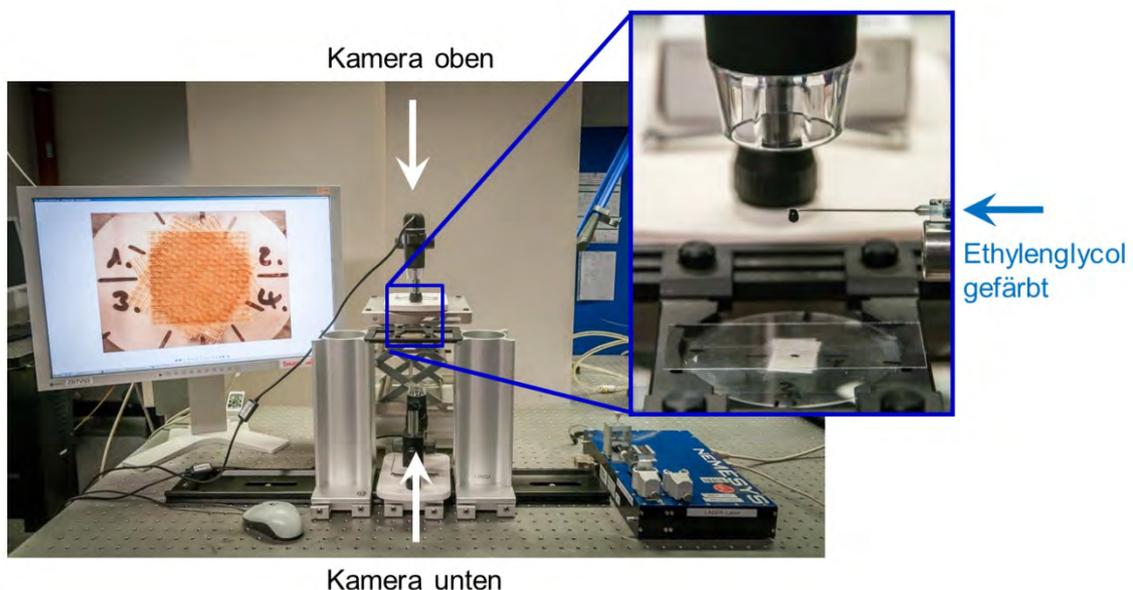


Abb. 1: Versuchsstand mit digitalen Mikroskopkameras und Spritzenpumpe, Vergrößerung zeigt Zudosierung von Flüssigkeitstropfen über Spritzenkanüle

1.2 Arbeitspaket 2: Aufbau von Versuchsständen zur optischen Analyse von Filtrationsmedien (ZBT/IUTA)

1.2.1. Arbeiten des ZBT:

In Absprache mit dem IUTA ist am ZBT ein Teststand zur optischen Analyse von Filtrationsmedien geplant, konstruiert und aufgebaut worden, s. Abb. 2. Das Mittelteil des Strömungskanal wurde optisch zugänglich aus Plexiglas, Einlauf- und Auslaufstrecke aus Polypropylen und Spannrahmen zum Verspannen des Filters und Flanschanschlüssen aus Alu gefertigt. Die Aufspannvorrichtung ist so gestaltet, dass das Filtermaterial gewechselt werden kann und Wiegeversuche des Filtermaterials bzw. Untersuchungen zum Sättigungsgrad vor und nach Durchströmung mit Öltröpfchen-beladener Luft durchgeführt werden können. Die Öltröpfchen-beladene Luft kann über einen Aerosolgenerator in der Anfangsstrecke des Teststands zudosiert werden. Ein Strömungsgleichrichter in der Einlaufstrecke sorgt dafür, dass sich das Strömungsprofil über eine kurze Kanallänge ausbildet. Vor dem Flansch mit wechselbarem Filter ist der Teststand transparent, um die optische Zugänglichkeit für die Particle Image Velocimetry (PIV)-Messung zu ermöglichen. Die Öltröpfchen in der Luftströmung dienen als Tracer für die PIV-Messung. Die Messebene (s. Abb. 2, rechts) kann mit einem Laser-Lichtschnitt beleuchtet werden und orthogonal dazu vermisst eine Kamera die Anströmseite des Filters. Anschlüsse zum Messen des Differenzdrucks (An-/ Abströmseite des Filters) sind ebenfalls vorhanden.

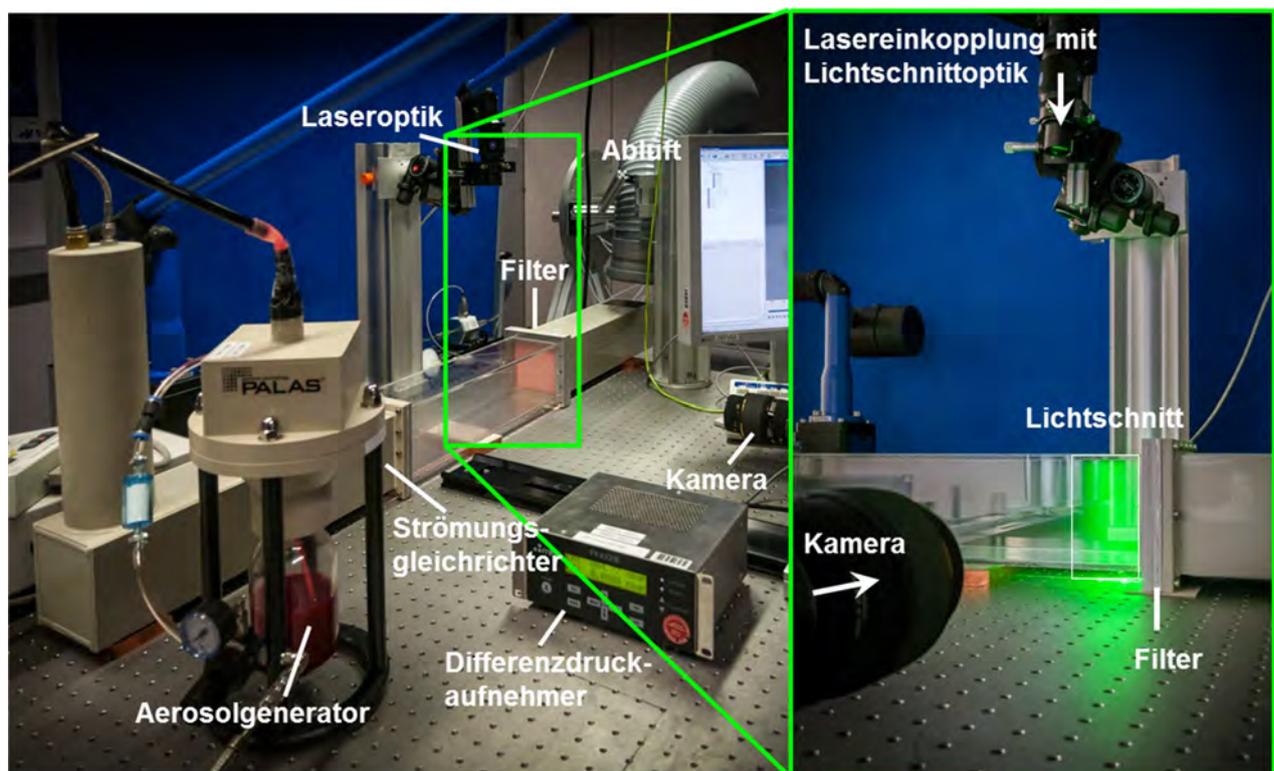
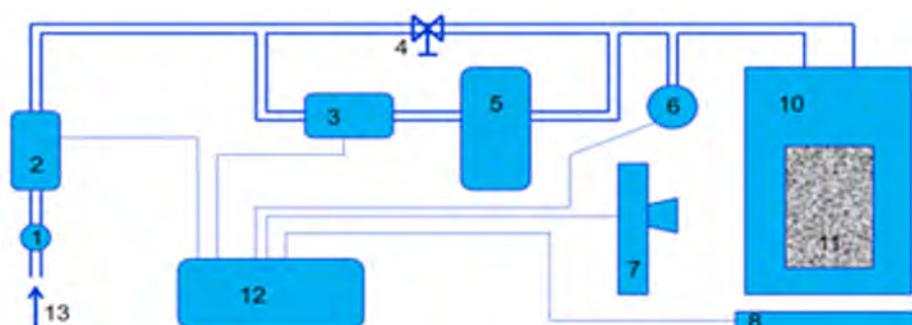


Abb. 2: (links) Foto des optischen Versuchsstands zur optischen Analyse von Filtrationsmedien, (rechts): Ausschnitt des Messortes mit Laser-Lichtschnittebene und Kamera

1.2.2. Arbeiten des IUTA:

Der Filterprüfstand des IUTA wurde ertüchtigt und für die Untersuchungen vorbereitet. Dieser ist in Abb. 3. schematisch dargestellt. Die gesamte Apparatur wurde an das Druckluftnetz angeschlossen und über zwei Druckminderer versorgt. Durch die Verwendung von zwei Druckminderern wurden Druckschankungen aufgrund des Schaltzykluses des Druckluftkompressors minimiert. Die Regelung des Gesamtvolumenstroms durch die Anlage erfolgte über den im Anschluss verbauten MFC1 (2). Anschließend erfolgte eine Aufteilung des Luftstroms in zwei Teile. Teil 1 wird über das Drosselventil (4) zum Filterhalter geleitet, während der zweite Teil MFC2 (3) passiert, dann im Aerosolgenerator (5) zur Vernebelung des Testöls eingesetzt und schließlich wieder mit Teilstrom 1 vereinigt wird.



- | | |
|------------------------------|------------------------------------|
| 1: Druckminderer | 7: Kamera |
| 2: MFC 1 | 8: Waage |
| 3: MFC 2 | 10: Filterhalter |
| 4: Drossel | 11: Prüfling (Filtermedium) |
| 5: Tröpfchengenerator | 12: Rechner |
| 6: Druckmessdose | 13: Druckluftversorgung |

Abb. 3: Übersicht Flachmedienprüfstand

Der gesamte Volumenstrom wird dann zur Filterhalterung (10) geführt und passiert dabei den Drucksensor (6) bevor er durch das Filter (11) aus der Anlage austritt. Das Drainageverhalten auf der Abströmseite des Flachfiltermediums wird mit Kamera (7) festgehalten, während die Masse des drainierenden Öls durch die unter dem Filterhalter positionierte Waage (8) bestimmt wird. Ein Computer (12) zeichnet die durch (6), (7) und (8) gewonnen Daten auf. Alternative zur Kamera (7) kann außerdem ein OPC installiert werden, der die Detektion abströmseitiger Partikel ermöglicht.

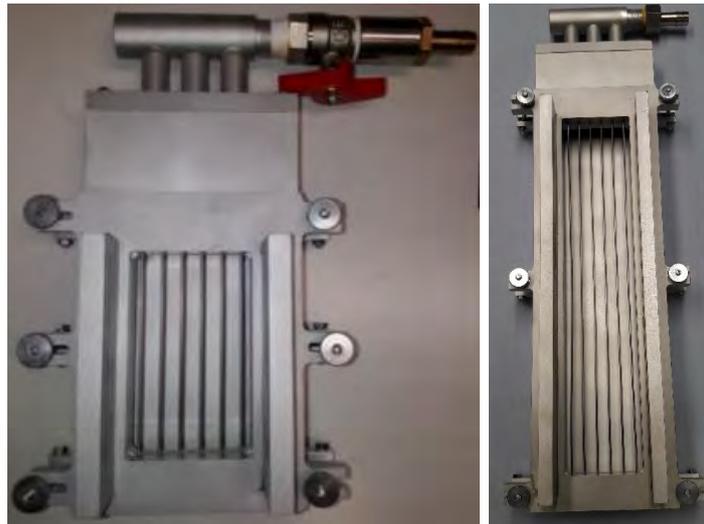


Abb. 4: Die entwickelten Filterhalterungen.

Der vorhandene Prüfaufbau wurde im Projekt mit den in Abbildung 4 dargestellten Filterhalterungen erweitert. Der ursprünglich eingesetzte Filterhalter wurde ersetzt, da anströmende Luft auch seitlich aus diesem austrat und so zu einer Verfälschung der Ergebnisse führte. Durch die in Abbildung 4 gezeigten Neuentwicklungen tritt der Gesamtvolumenstrom nun nur noch durch ein 60 bzw. 180 cm² Fenster aus. Der 30 cm hohe Filterhalter wurde gebaut, um der realen Bauhöhe vieler Koaleszenzfilter gerecht zu werden. Mit ihm wurde u. A. untersucht, ob die lokale Sättigung von der Gesamtbauhöhe der Filter abhängt. Entsprechende Ergebnisse finden sich in den Kapiteln 1.8.2.1 und 1.8.2.2.

Außerdem wurde im Rahmen dieses Arbeitspaketes der in Abbildung 3 dargestellte Prüfaufbau optimiert und die Aerosolzuführung auf höhere Ölmassenströme erweitert. Dies war für die Untersuchung größerer Flächen vorteilhaft. Mit diesem Aufbau wurden die Untersuchungen in AP8 und AP4 durchgeführt. Ein zweiter Aerosolgenerator konnte mit gefärbtem Öl gefüllt werden und hiermit der Durchtritt des Öls durch die Filtermedien näher untersucht (AP4) werden. Insgesamt konnte dieses Arbeitspaket wie geplant abgeschlossen werden.

1.3 Arbeitspaket 3: Durchführung von Messungen mit Verfahren aus AP 1 an verschiedenen Filtermedien und definierten porösen Strukturen (ZBT)

Die Fertigung von definierten porösen Strukturen aus Glas erfolgte mittels Laserstrukturierung an der Trotec Speedy Laseranlage des ZBT. Die Kanal-Struktur ist 20 x 20 mm groß, besitzt Kanalbreiten von 400 µm und Stegbreiten von 900µm. Die Glassubstrate haben eine Dicke von 160-190µm. Eine poröse Testzelle besteht aus 5 Ebenen, die verdreht mit einem bestimmten Winkel übereinander ausgerichtet werden, s. Abbildung 5. Durch die festgelegte Kanalstruktur und die Ausrichtung der Ebenen erhält man ein Filter-Modell mit definierter Tortuosität und Porosität. An diesen Strukturen wurde die Phasenausbreitung verschiedener benetzender und nicht-benetzender Versuchsfluide vermessen. Die Ergebnisse dieser Versuche dienen der Validierung der numerischen Simulationen auf Porenskala der TU Dortmund (AP5).

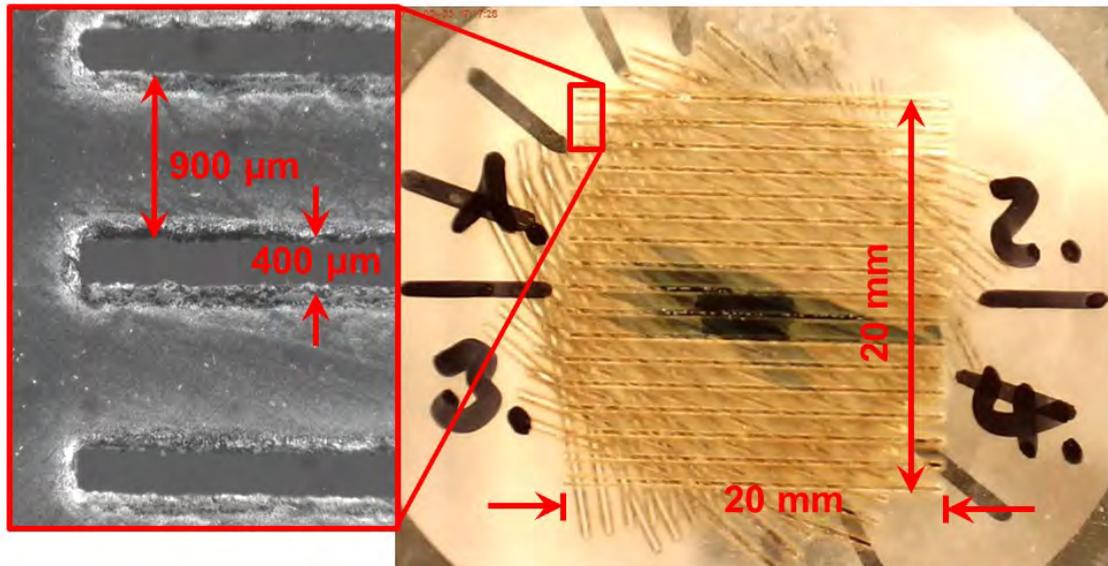


Abb. 5: definierte poröse Testzelle mit 5 Ebenen aus Glas und gefärbter Flüssigkeit (rechts), Vergrößerung einer Ebene (links)

Tests an diesen Strukturen sind mit gefärbtem Ethylenglycol durchgeführt worden (Kontaktwinkel: 77° , dyn. Viskosität 21 mPas), Corena 46 (Kontaktwinkel: 32° , dyn. Viskosität 110 mPas) bzw. Ethanol (Kontaktwinkel: 32° , dyn. Viskosität 1,2 mPas). Als Farbstoff wurde Nilblau bzw. Sudan III verwendet. Es wurden Zellen mit 10° , 20° , 30° und 40° Verschiebung der Ebenen getestet. Ein Tropfen mit 3 μl Volumen wurde direkt auf die Mitte der obersten Ebene aufgebracht. Mikroskopaufnahmen der Flüssigkeitsausbreitung in den porösen Strukturen zeigen eine Abhängigkeit der lateralen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Phasengrenze und der Ausbreitungsfläche von dem Verschiebungswinkel der Zellebenen. Bei den Tests mit Ethylenglycol beträgt die Anfangsgeschwindigkeit der Phasengrenze bei der Zelle mit 10° Verschiebung: 20 mm/s bei 20° : 15 mm/s und bei 30° : 13,5 mm/s. Bei höherer dynamischer Viskosität (Tests mit Corena 46) zeigt sich eine wesentlich niedrigere Ausbreitungsgeschwindigkeit: 10° Verschiebung: 0,6 mm/s bei 20° : 0,7 mm/s und bei 30° : 4 mm/s. Die benetzte Fläche ist bei kleinerem Verschiebungswinkel größer. Dieses Experiment zeigt ebenfalls, dass die Einflüsse der Kapillarkräfte gegenüber den Gravitationskräften dominieren. Benetzt wurden nur die obersten zwei bzw. im Fall 20° die obersten drei Ebenen.

1.4 Arbeitspaket 4: Untersuchung und Charakterisierung verschiedener Filtermaterialien (Porosität, Permeabilität, Tortuosität, Benetzung, etc.); Auswahl geeigneter Materialien (IUTA)

1.4.1 Auswahl und Charakteristika der untersuchten Filtermedien

Ziel des Projektes war die Erarbeitung eines besseren Verständnisses der Koaleszenzfiltration und die Umsetzung der Erkenntnisse zu einem Planungswerkzeug für KMU. Dazu war es notwendig Daten von einer möglichst breiten Palette an Filtermedien zu sammeln. Die Mitglieder des PA stellten daher Filtermedien verschiedener Oberflächengüte und Materialdichte zur Verfügung. Eine Übersicht ist in Tabelle 2 zu finden. Neben zwei polymerbasierten Drainagemedien finden sich verschiedene Glasfaservliese mit teils ölabweisenden und teils ölaufsaugenden Oberflächeneigenschaften.

Tabelle 2: Physikalisch-mechanische Charakteristika der Filtermedien

Bezeichnung	Material	Benetzungswinkel		Verhalten	Mediendicke [mm]	spez. Gewicht [g/m ²]
		An ¹	Ab ²			
A	Glasfaservlies	Spreiten		Oleophil	0,5	108
E	Glasfaservlies	-	-	Oleophob	0,5	78
F	Glasfaservlies	120°	109°	Oleophob	0,4-0,6	70
G	Glasfaservlies	Spreiten		Oleophil	0,5-0,6	81
DF1	Glasfaservlies	110°	71°	Oleophob	0,6-0,75	72
DF2	Glasfaservlies	129°	127°	Oleophob	0,5	76
DF3	Glasfaservlies	115°	125°	Oleophob	0,4-0,5	67-78
DF4	Glasfaservlies	125°	111°	Oleophob	0,5-0,6	73
DF5	Glasfaservlies	Spreiten		Oleophil	0,5-0,6	86
DF6	Glasfaservlies	107°	99°	Oleophob	0,5-0,7	84
163V	Polymervlies			Oleophob	1,7	553
164V	Polymervlies			Oleophob	1,9-2,0	609

Die Bestimmung des Fraktionsabscheidegrades an den Medien ergab, dass es sich bei DF3 und DF4 um sehr dichte Filter mit einer sehr guten Abscheideleistung handelte, während DF2 etwas weniger gut abscheidet und alle anderen Medien deutlich offenere Glasfaservliese waren (Abb. 6). Die Abscheideleistung wird in etwa von den trockenen Differenzdrücken Δp_0 nachgebildet (Tabelle 3). Der Druckverlust in Sättigung nach 6 Stunden zeigte außer bei DF3 eine entsprechende Abfolge.

Tabelle 3: Physikalisch-mechanische Charakteristika der Filtermedien

Bezeichnung	Packungsdichte [%]	Druckverlust (trocken) (Δp_0) bei Q = 4,01 m ³ /h	Druckverlust in Sättigung, 1-lagig, bei Q = 4,01 m ³ /h nach 6h Betrieb
		[mbar]	[mbar]
A	8,9	3,4	57
E	5,8-6,2	3,2	55
F	4,7-6,5	2,0	32
G	5,4-6,0	3,5	56
DF1	5,2	3,6	55
DF2	6,0-6,7	5,1	75
DF3	6,2-7,5	10,5	69
DF4	4,9-6,5	14,6	141
DF5	6,3-6,5	3,9	55
DF6	4,8-6,7	2,5	46
163V	23,6	2,1	19 (10h)
164V	22,6-23,7	2,3	20 (10h)

¹ Anströmseitig² Abströmseitig

Alle mit „spreiten“ gekennzeichneten Filtermedien verhalten sich oleophil und nehmen Öl ohne Einwirken einer externen Kraft in das Material auf. Packungsdichten und Schichthöhen wurden bestimmt (Tabelle 2 und Tabelle 3).

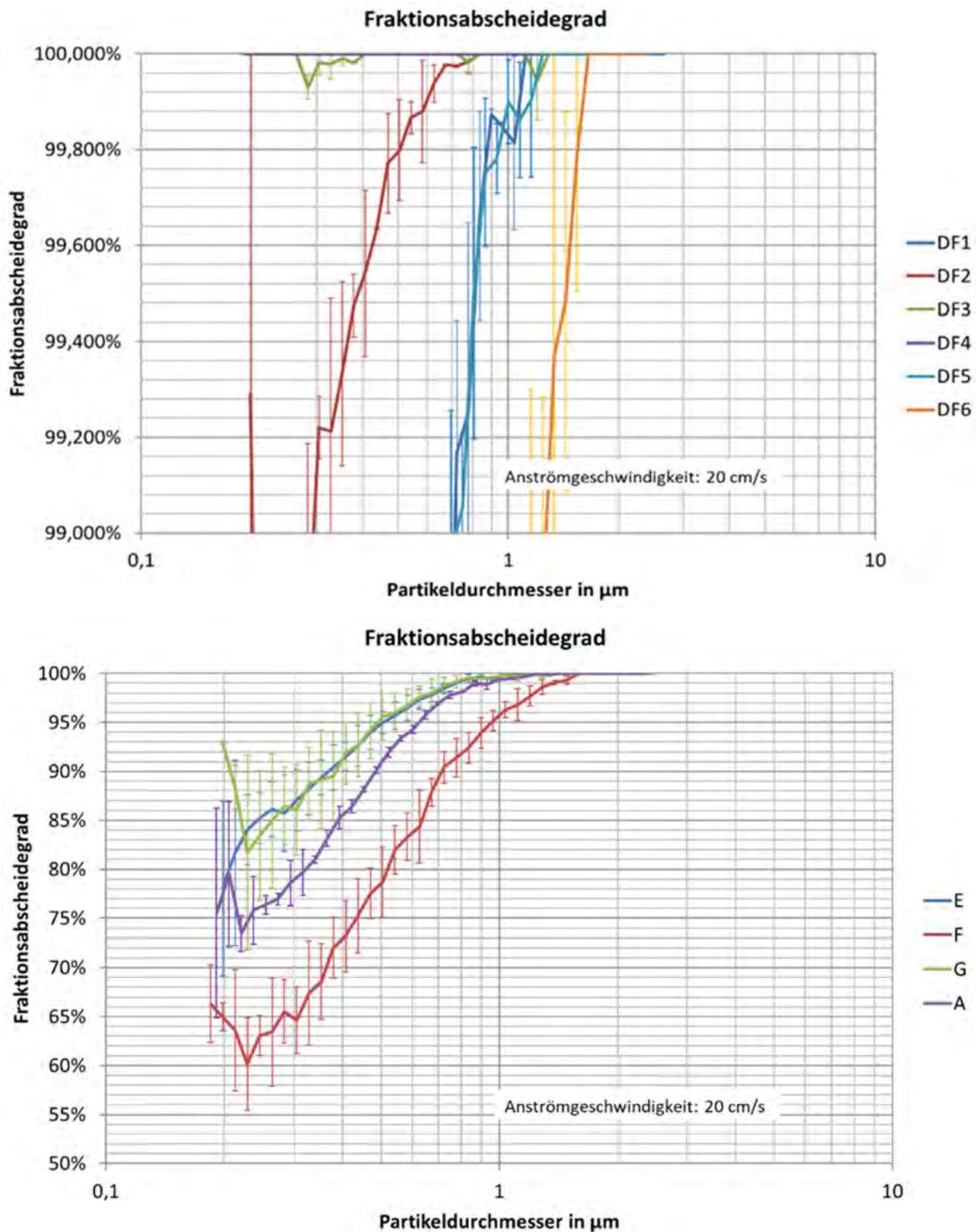


Abb. 6: Fraktionsabscheidegrade von DF1-DF6 (oben), Fraktionsabscheidegrade Medien A, E, F und G (unten)

1.4.2 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Durch Messung mehrerer Zuschnitte aus den Testmedien wurde die Reproduzierbarkeit geprüft. Von Glasfasermedien ist bekannt, dass diese eine vergleichsweise große produktionsbedingte Varianz der Glasfaseranordnung und damit des Luftwiderstands aufweisen. Eine Testfläche muss deshalb eine gewisse Mindestgröße haben, damit Schwankungen in Materialstärke und Dichte nur einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Zu prüfen war, ob die durchströmte Fläche des Filtermedienhalters ausreichend groß ist.

Ein weiterer Punkt war die Prüfung der Wiederholbarkeit der Testergebnisse mit der aufgebauten Testeinrichtung. Hier wurden insbesondere mit Medium G wiederholende Messungen durchgeführt.

In Tabelle 4 sind Differenzdrücke nach jeweils ca. 6 h für Messungen am gleichen Filtermedien-Typ unter vergleichbaren Anlageneinstellungen angegeben

Tabelle 4: Reproduzierbarkeit der Messungen: Eckdaten

Messungen (1-lagig, Q= 4,01 m ³ /h)	Differenzdruck nach 6 h Betrieb [mbar]	Mittelwert [mbar]	Abweichung vom Mittelwert
Messung 1 - DF1	52,5	55,2	<10%
Messung 2 - DF1	54,0		
Messung 3 - DF1	59,2		
Messung 1 - DF3	68,8	69,3	<10%
Messung 2 - DF3	69,7		
Messung 1 - G	55,7	56,2	<10%
Messung 2 - G	56,7		
Messung 3 - G	57,0		
Messung 4 - G	56,5		
Messung 5 - G	54,9		

Abweichungen unter 10% vom Mittelwert lassen sich auf Schwankungen in der Medienzusammensetzung zurückführen und sind damit vernachlässigbar. Außerdem war der Verlauf der Differenzdruckkurven in den einzelnen Messungen an unterschiedlichen Medien des gleichen Typs zwar vom prinzipiellen Verlauf vergleichbar, aber nicht immer deckungsgleich. Dies war auf Schwankungen in der Förderleistung des Aerosolgenerators, die im Bereich von $\pm 0,7$ g/h zwischen den einzelnen Messungen lagen, zurückzuführen.

Der entwickelte Versuchsaufbau zeigt damit die nötige Reproduzierbarkeit für eine tiefer gehende Analyse der Vorgänge während der Koaleszenzfiltration.

1.4.3 Untersuchungen zur Tortuosität, Permeabilität und Porosität

1.4.3.1 Untersuchung des Wetbands

Bei den ersten Experimenten war die Höhe des sog. „Wetbands“ (durchnässte Zone im unteren Bereich der senkrecht stehenden Medien) Gegenstand der Untersuchungen. Es zeigte sich,

dass je nach Medieneigenschaft dieses Wetband nur 5 % (einige Millimeter) der Gesamthöhe belegt. Bei anderen Medien erreicht dies ca. 10 % bzw. 50 %. Bei einem Medium mit sehr schlechten Abfließigenschaften bedeckte das Wetband sogar die gesamte Höhe. Die Höhe des Wetbands ist also ein aussagekräftiges Maß für die Wechselwirkung zwischen Faseroberfläche und abzuführender Flüssigkeit.

Das Wet-Band entsteht sobald der Luftstrom durch einen gesättigten Filter gestoppt wird. Wesentliche Einflussfaktoren für die Entstehung sind neben den Eigenschaften des Mediums selbst, die Mengen an Öl, die zum Stoppzeitpunkt in Kontakt mit diesem stehen. Kanten auf denen sich Öl sammelt, sind deshalb für Filterelemente nachteilig. Das Wet-Band beeinflusst den sich nach Reaktivierung des Volumenstroms neu einstellenden Differenzdruck (s. auch Kapitel 1.8).

1.4.3.2 Farbtests – Untersuchungen zum Transportweg des Öls

Verschiedene Farbtests zur Untersuchung der Struktur der Medien wurden während des Projektes entwickelt. Zur Untersuchung des Öltransports innerhalb des Mediums wurde Farbstoff an einem einzelnen Punkt auf der Anströmseite des Mediums in einem möglichst kleinen Bereich aufgebracht. Anschließend wurde das Medium in die Halterung (AP2) eingebaut und in der üblichen Weise mit Testöl gesättigt. Farbliche Veränderungen auf der Abströmseite des Mediums wurden mit einer Kamera über die Zeit beobachtet. Da der Farbstoff Sudan III in Öl löslich ist, wurde dieser beim Abscheiden des Ölaerosols aufgenommen und mittransportiert. Verschiebungen des Austrittspunkts gegenüber dem Eintrittspunkt lassen sich durch die Beobachtung mit einer Kamera detektieren und eine Abschätzung der sog. Tortuosität, der Gewundenheit, des Transportweges des Öls durchführen. Eine Verbreiterung des Farbpunktes lässt auf Gabelungen schießen. So konnte gezeigt werden, dass der abströmseitige Ölaustritt im Vergleich zur anströmseitigen Markierung um einige mm seitlich verschoben war. Weiterhin war zu erkennen, dass sich im Laufe der weiteren Beaufschlagung das eingefärbte Öl flächig ausbreitete, allerdings überlagert von einem nach unten abfließenden Anteil. Erwartet hätte man eher ein ausschließlich nach unten abfließendes, eingefärbtes Öl. Dies deutet auf eine nur untergeordnete Rolle der Gravitation während des Öltransports durch das Medium hin.

Zur Untersuchung des zeitlichen Sättigungsverhaltens wurde mit vollständig eingefärbtem Öl gearbeitet. Dazu wurde Sudan III Rot in Shell Corena R3 S46 aufgelöst und diese Lösung im Aerosolgenerator eingesetzt. Durch den in Kapitel 1.2.2 beschriebenen, erweiterten Prüfaufbau wurde es möglich während des gleichen Experiments zwischen gefärbtem und ungefärbtem Öl zu wechseln.

Es gab zwei wesentlich unterschiedliche Verhaltensweisen während der Beaufschlagung. Bei oleophilen Medien kam es nach dem Umschalten auf gefärbtes Öl zu einem gleichmäßig über die Fläche verteilten Durchtreten. Nach der ersten rötlichen Farbnote vertiefte sich diese im Verlauf des Experiments. Dieser Prozess verlief über die gesamte Fläche. Oleophobe Medien zeigten dagegen ein anderes Verhalten bei dem in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften der erste Durchtritt des gefärbten Öls nur an wenigen, heterogen verteilten Stellen stattfand. Allerdings war auch bei oleophilen Medien keine vollständig homogene Durchdringung und damit Farbvertiefung auf der Abströmseite zu erkennen (Abbildung 7). Vielmehr tritt in einigen Bereichen, die im Gegensatz zu den Durchdringungszonen der oleophoben Medien deutlich kleiner in der Ausdehnung sind, zuerst gefärbtes Öl aus, bevor es dann zu einer allgemeinen Vertiefung des Rottons und damit des Durchtritts in der Fläche kommt. Dies wird auf die produktionsbedingt unvermeidlichen Inhomogenitäten in den Filtermedien zurückgeführt.

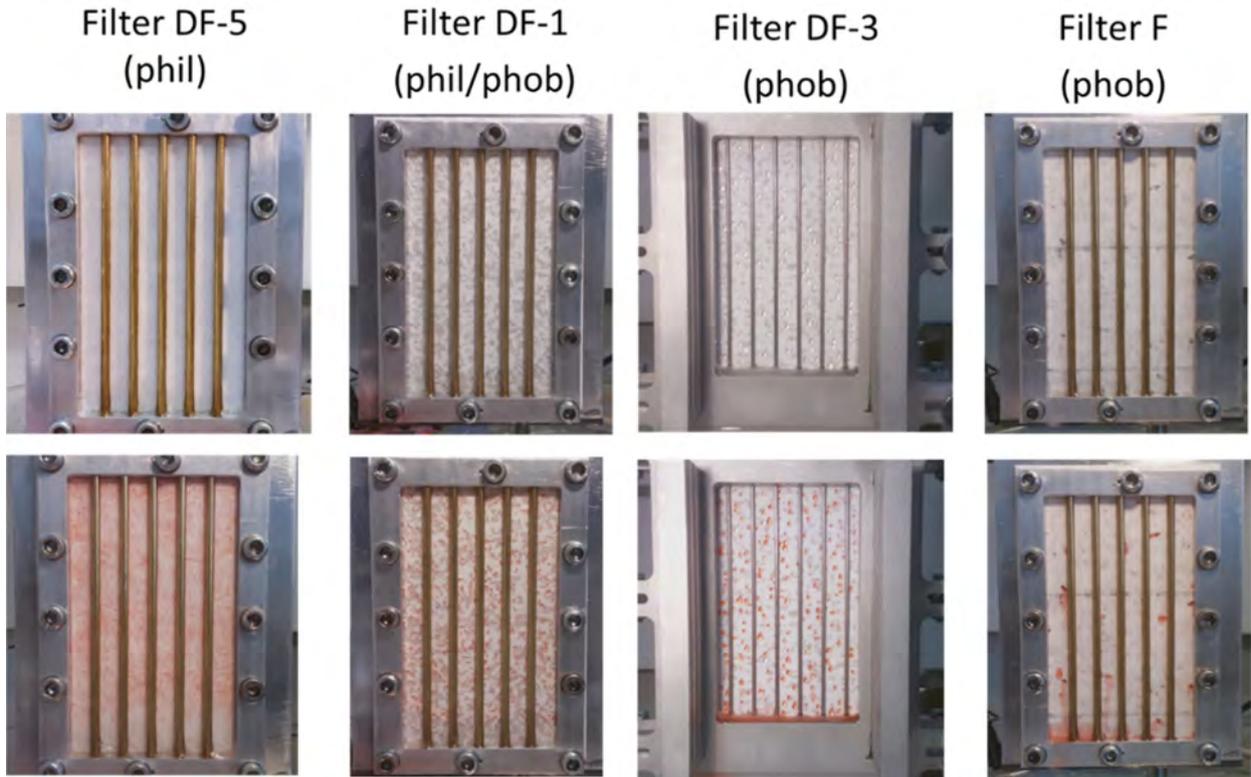


Abbildung 7: Farbstoffdurchdringung bei oleophoben und oleophilen Medien (oben: Vor dem Test, nach Sättigung mit farblosem Öl; unten: nach Umschalten auf gefärbtes Öl, beginnender Durchtritt des gefärbten Öls)

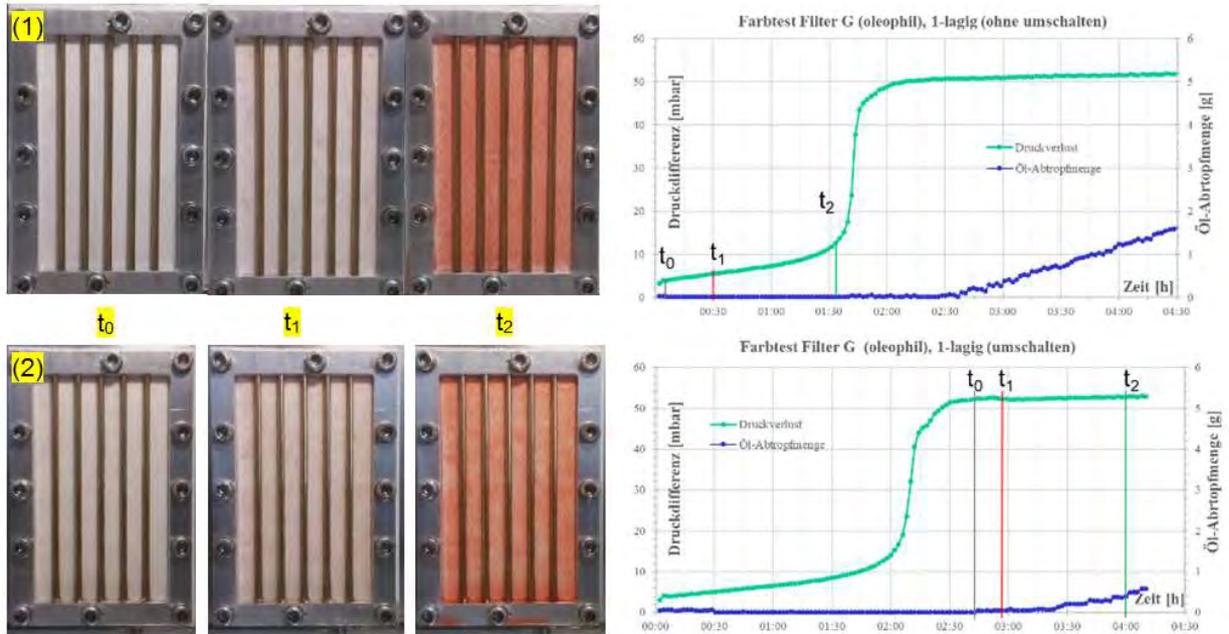


Abbildung 8: Medium G im Farbstoffdurchtrittstest: (1) Direkte Beaufschlagung mit gefärbtem Öl; (2) Umschalten auf gefärbtes Öl nach Sättigung; t_0 : trockenes bzw. mit farblosem Öl gesättigtes Medium, t_1 : erster Durchtritt farbigen Öls; t_2 : Ende der Farbvertiefung; rechts: Differenzdruckkurven und Lage von t_0 , t_1 und t_2

Bemerkenswert ist dabei, dass die Dauer des Durchtritts unabhängig von der Vorgehensweise zu sein scheint. Abbildung 8 zeigt am Beispiel des oleophilen Mediums G eine Dauer des Durchtritts für eine Lage dieses Mediums von ca. 60 min. Dies ist die Zeit, die zwischen dem Erscheinen einer ersten Färbung auf der Abströmseite und dem Abschluss der Farbvertiefung (Tabelle 5) vergeht.

Der Test von mehreren Lagen eines oleophilen Filtermediums führte weder zu einer Verdopplung der Durchdringzeit noch des Druckabfalls. Es scheint so zu sein, dass zuerst ein Durchtritt an prädestinierten Stellen stattfindet und dann das nachströmende Öl in Abhängigkeit von den lokalen Strömungsbedingungen die übrigen Gewebebereiche füllt. Dieses zweistufige Verhalten beim Durchtritt von gefärbtem Öl konnte bei den oleophoben Medien nicht beobachtet werden. Hier gibt es nur einen einzigen charakteristischen Zeitpunkt für den Durchtritt des gefärbten Öls. Das Öl wird im Farbstoffdurchdringungstest (mit Umschalten auf gefärbtes Öl nach Sättigung mit farblosem Öl) an strukturell prädestinierten Punkten des Filtergewebes unter Bildung von mehr oder weniger großen Kanälen abtransportiert und sättigt das Filter nicht homogen.

Tabelle 5: Farbstoffdurchdringungstest

Medium	Druckverlust [mbar]	Durchtritt (Start) [min]	Durchtritt (Ende) [min]	Durchtrittszeit [min]	Bemerkung
G (oleophil)	46-48(1-lagig)	≈ 25	87	62	Direkt
		≈ 13	73	60	Nach Sättigung
	60 (3-lagig)	≈21	118	97	Nach Sättigung
F (oleophob)	24 (1-lagig)	≈13	≈65	52	Nach Sättigung
	43 (2-lagig)	≈12	≈118	106	Nach Sättigung
	46 (3-lagig)	≈27	≈141	114	Nach Sättigung
A (oleophil)	46 (1-lagig)	≈ 9	45	36	Nach Sättigung
DF1 (oleophob)	55 (1-lagig)	≈ 11	?	-	Direkt
	74 (5-lagig)	≈ 9	?	-	Nach Sättigung
DF2 (oleophob)					
DF3 (oleophob)	74 (1-lagig)	≈ 10	>60	>50	Nach Sättigung
	190 (5-lagig)				
DF4 (oleophob)					
DF5 (oleophil)	55 (1-lagig)	≈ 6	?	-	Nach Sättigung
	84 (5-lagig)				
DF6 (oleophob)					
Versuchsparameter:					
$v_{an} = 0,2 \text{ m s}^{-1}$, Beladung: $\sim 0,85 \text{ g h}^{-1}$ ($\sim 0,2 \text{ g m}^{-3}$), gegen Atmosphärendruck					

Eine genaue Analyse der mit gefärbtem Öl beaufschlagten Filtermedien zeigt eine Musterung, die sich von An-/Abströmseite zu An-/Abströmseite unterscheidet, s. Abbildung 9, sich einzelne Formen des Musters aber auf der gegenüberliegenden Seite wiederfinden. Entsprechend den Differenzdrücken in Tabelle 5 wirkt auf den dreilagigen Filterstapel eine Masse von etwa 2,7 kg. Dies lässt einen direkten Kontakt zwischen den Medien erwarten. Im vorliegenden Fall des oleophoben Mediums F in Abbildung 9 ist die stärkste Rotfärbung anströmseitig auf A1 zu

finden. Auf der Abströmseite A2 und der Anströmseite B2 sind weniger rote Flächen vorhanden, die aber eine ähnliche Musterung an sich direkt gegenüberliegenden Stellen aufweisen. Dabei sind die Muster an der Anströmseite (B1) großflächiger und stärker miteinander verbunden. Beim zweiten Medienübergang B2 auf C1 ist dieser Unterschied zwischen den beiden Oberflächen noch stärker ausgeprägt, so dass hier auf der Abströmseite nur noch einige wenige stark eingefärbte Bereiche über den großflächig eingefärbten Bereichen der Anströmseite C1 zu finden sind. Abströmseitig auf C2 sind erneut nur wenige eingefärbte Bereiche zu finden.

Die beschriebenen Beobachtungen deuten auf einen Durchtritt des gefärbten Öls an nur wenigen Punkten hin. Anschließend findet dann aufgrund der Oleophobie ein Querfluss auf der gegenüberliegenden Anströmseite statt bevor das Öl erneut durch das nächste Medium dringt.

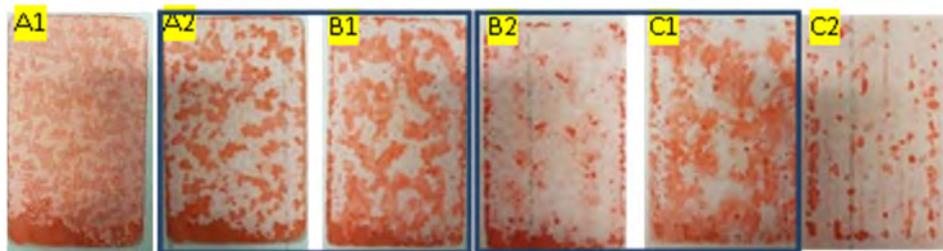


Abbildung 9: Medium F, 3-lagig nach Test mit gefärbtem Öl, von innen nach außen: Anströmseiten A1, B1 und C1; Abströmseiten (gespiegelt): A2, B2 und C2; blauer Kasten: Seiten mit direktem Kontakt während der Messung, (C2: senkrechte Streifen durch Stützstäbe der Halterung)

Versuche an Medium DF3 bestätigen den direkten Transport durch das Medium entlang von Kanälen, s. Abbildung 10. Bei diesem oleophoben Medium kommt es zu einer deutlichen Verringerung der Kanalanzahl im zweiten Medium, die anscheinend ebenfalls mit einem Querfluss zwischen den beiden Medien einhergeht, wie in B1.1 an den rötlichen Flächen erkennbar wird. DF3 scheint zusätzlich eine Varianz im Medienverhalten aufzuweisen, die an einer deutlich verschiedenen Anzahl ölgetränkter Bereiche auf den beiden B Medien x.1 und x.2 deutlich wird.

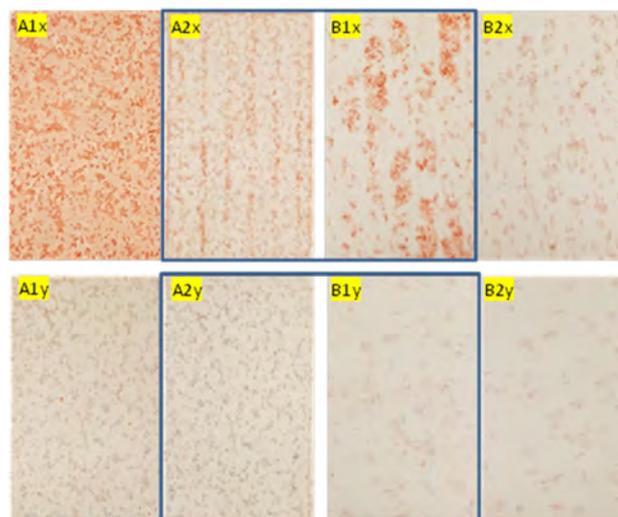


Abbildung 10: Medium DF3, 2-lagig nach Test mit gefärbtem und ungefärbtem Öl (Umschalten), von innen nach außen: Anströmseiten A1 und B1; Abströmseiten (gespiegelt): A2 und B2; blauer Kasten: Seiten mit direktem Kontakt während der Messung; x: Umschalten von farblosem Öl auf rotes Öl; y: Umschalten von rotem Öl auf farbloses Öl

Bei oleophilen Medien stellt sich die Situation anders dar, Abbildung 11. Hier kommt es nicht zu einem Querfluss zwischen den Medien. Auf der innersten Anströmseite findet eine gleichmäßige Beaufschlagung mit gefärbtem Ölaerosol statt (A1). Beim Durchtritt durch das Medium erfolgt dann eine Verringerung der gefärbten Flächen (A2) und eine Übergabe des Öls an wenigen Punkten (B1). Nach dem erneuten Durchtritt ist eine Aufweitung der roten Bereiche vermutlich durch Verästelungen des Transportkanals zu erkennen (B2), bevor erneut eine Übergabe an nur wenigen Punkten auf das dritte Medium (C1) erfolgt, dann aber auf der äußersten Abströmseite (C2) durch die Drainage größere Areale ungleichmäßig eingefärbt werden.

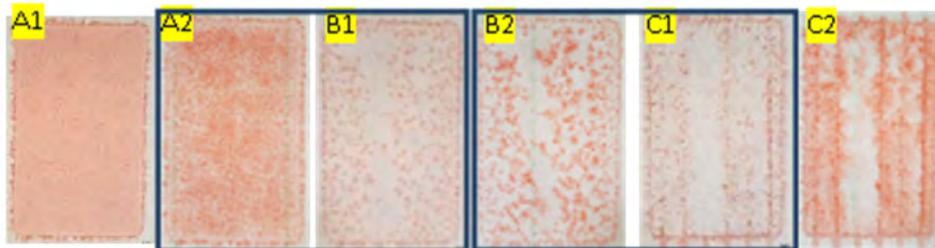


Abbildung 11: Medium G, 3-lagig nach Test mit gefärbtem Öl, von innen nach außen: Anströmseiten A1, B1 und C1; Abströmseiten (gespiegelt): A2, B2 und C2; blauer Kasten: Seiten mit direktem Kontakt während der Messung

Im oleophilen Fall kommt es damit zu einem direkteren Transport durch den Medienstapel. Dies lässt sich mit den ölaufsaugenden Eigenschaften des Mediums in Zusammenspiel mit der permanenten Luftströmung erklären. Ankommendes Öl wird direkt aufgenommen und durch Stellen, die für den Öltransport bevorzugt sind, weitergeleitet.

Eine Betrachtung der Übergabepunkte vor einer hellen Lichtquelle zeigt durchscheinende Punkte, die bei oleophoben Medien klar größere Durchmesser aufweisen als bei oleophilen. Diese Bereiche werden in den Farbexperimenten mit gefärbtem Öl bevorzugt angefärbt, Abbildung 12. Da die Beaufschlagung mit gefärbtem Öl gegenüber der mit ungefärbten vergleichsweise kurz war, ist davon auszugehen, dass durch diese Kanäle die Hauptmenge an Öl transportiert wird. Andere Bereiche in der Umgebung dieser Kanäle werden erst langsam mit farbigem Öl gefüllt. Hier lässt sich nur eine schwache Rotfärbung erkennen.

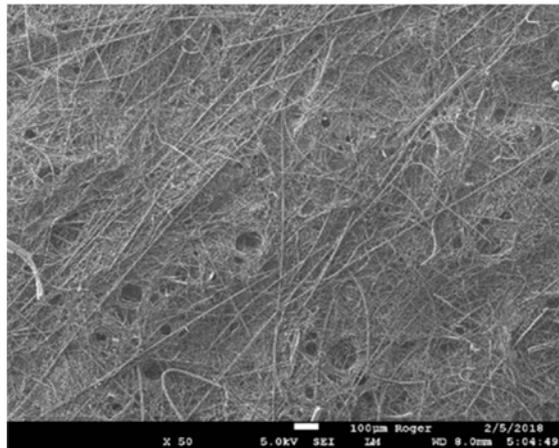


Abb. 12: Mikroskopische Aufnahmen eines Öltransportkanals (Medium G); die gleiche Stelle in unterschiedlichen Aufnahmemodi (von links nach rechts): Auflicht, Dunkelfeld, Durchlicht

Daten aus der Filtercharakterisierung wurden an die Projektpartner übergeben. Insgesamt konnte das Transportverhalten des Öls durch unterschiedliche Medien näher aufgeklärt werden und dabei deutlich Unterschiede zwischen Medien unterschiedlicher Oberflächengüte festgestellt werden. Es wurde festgestellt, dass sich beim Beladungsvorgang mit Öl dieses nicht direkt durch das Glasfaservlies bewegt, sich dann aber im weiteren Verlauf der Beaufschlagung Kanäle ausbilden, durch die vermutlich nach Sättigung ein Großteil des Öls transportiert wird.

1.4.3.3 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Die Erfassung der Struktur- und Oberflächenparameter erfolgte an Filtermedien, die von den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt wurden.



*Abb. 13: Abströmseitige, lochartige Strukturen in Medium DF3
(weißer Balken = 100 µm)*

Die Bestimmung von Porosität, Faserdurchmesserverteilung und Tortuosität sollte mit Hilfe von rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (REM) erfolgen. Es zeigte sich ein Aufbau aus geschichteten, langen Glasfasern ohne erkennbare Vorzugsausrichtung mit stark unterschiedlichen Diametern, wobei die Anzahl größerer Fasern (bis über 1,5µm) in den äußeren Bereichen höher war und eine Art Deckstruktur bildete. Weiter im Inneren fanden sich mehr feinere Fasern mit Durchmessern bis in den zweistelligen Nanometerbereich und an Kreuzungspunkten segelartig aufgespanntes Bindermaterial. Auffällig war, dass bei Medium DF3 abströmseitig lochartige Strukturen zu erkennen waren, Abbildung 13. Bei diesem oleophoben Medium wurde eine Drainage in Form von kleinen Tröpfchen an weitgehend ortsfesten Punkten beobachtet. Es wird daher vermutet, dass dieses Verhalten mit den im REM gefunden Strukturen zusammenhängt. Die Filtermedien zeigen makroskopisch eine weitgehende Homogenität, unter dem REM offenbaren sich allerdings Schwachstellen in der Struktur, die wahrscheinlich mit den Orten des Öltransports durch das Medium zusammenfallen.

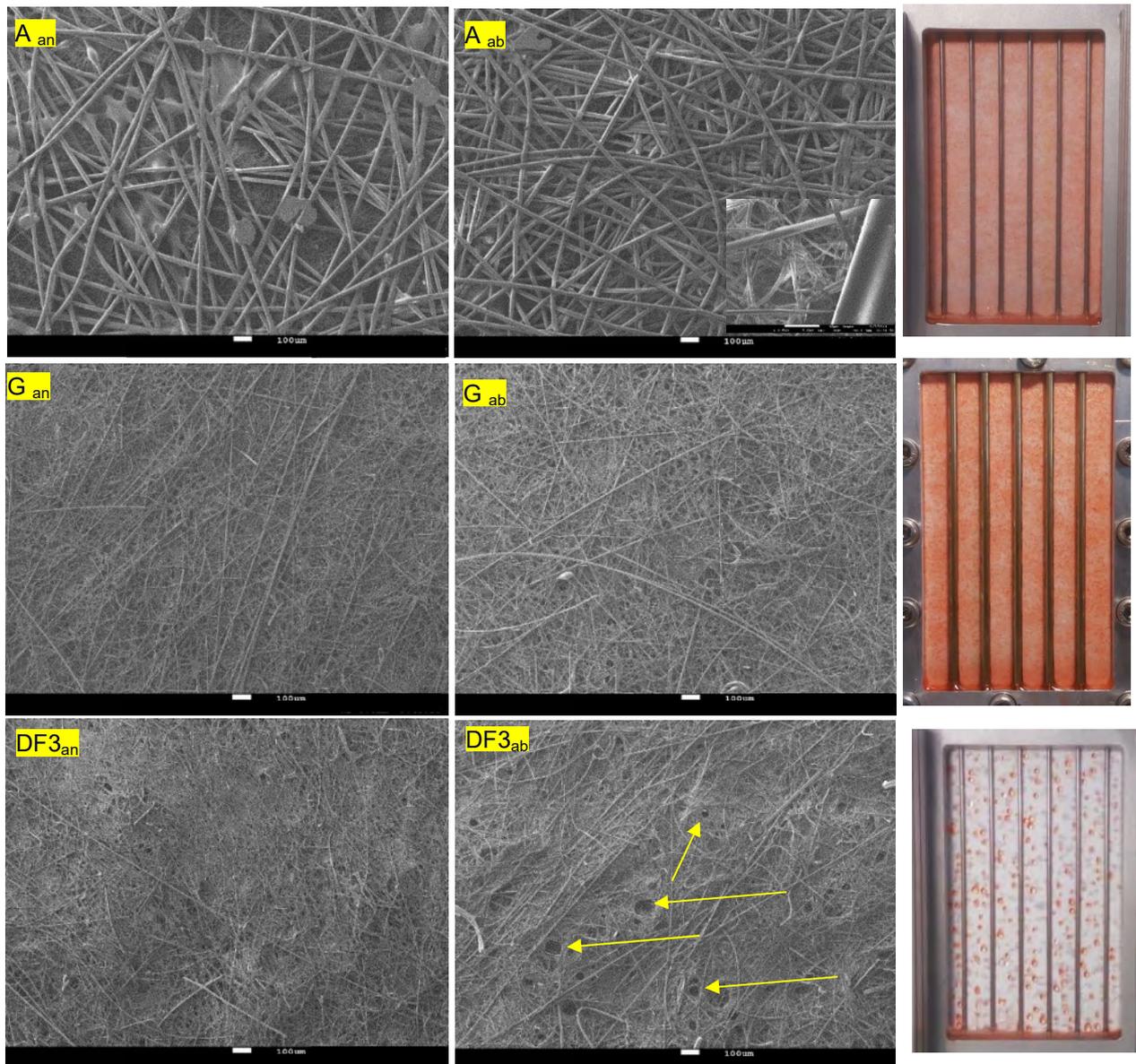


Abb. 14: REM-Aufnahmen verschiedener Filtermedien: A, G und DF3, jeweils An- und Abströmseite (weißer Balken = 100 µm)

Des Weiteren fiel bei den Untersuchungen auf, dass die Medien DF3 und DF4 in ihrer Faserstruktur dichter erscheinen als etwa die Medien F und G. Diese Beobachtung deckt sich mit der eines im Vergleich höheren trocken Differenzdruck Δp_0 für diese Medien. Der Anteil feiner Fasern ist hier offensichtlich höher. Filter A zeigt im Gegensatz zu allen anderen Medien eine polymere Stützstruktur, die die Glasfasermatrix umhüllt.

Aufgrund des extremen Aspektverhältnisses zwischen Durchmesser und Länge konnte keine Faserdurchmesserverteilung ermittelt werden.

Es wurde der Versuch unternommen die in DF3 gefundenen, lochartigen Strukturen mit den Austrittspunkten des Öls in Verbindung zu bringen. REM Aufnahmen um diesen Bereich liefern keinen eindeutigen Hinweis. Interessant ist aber, dass sich auf diesem oleophoben Medium, dessen Benetzungsverhalten mit einem Kontaktwinkel von 125° auf der Abströmseite nach einigen Stunden Betriebszeit eine oleophile Schicht bzw. Teilbereiche ausbilden, die von drainierendem Öl benetzt sind, s. Abbildung 15. Dieses Verhalten ist für ein oleophobes

Medium unerwartet. Eigentlich sollte eine nahezu ölfreie Außenschicht und Öltröpfchen, die in Kugelform in Zwischenräumen der Glasfasern eingeschlossen sind, auftreten. Derartige Tropfen lassen sich in den REM Aufnahmen nicht nachweisen. Dies kann darin begründet sein, dass derartige Öltröpfchen erst in weiter innen gelegenen Bereichen auftreten und deshalb im nur oberflächennah arbeitenden REM nicht erscheinen.

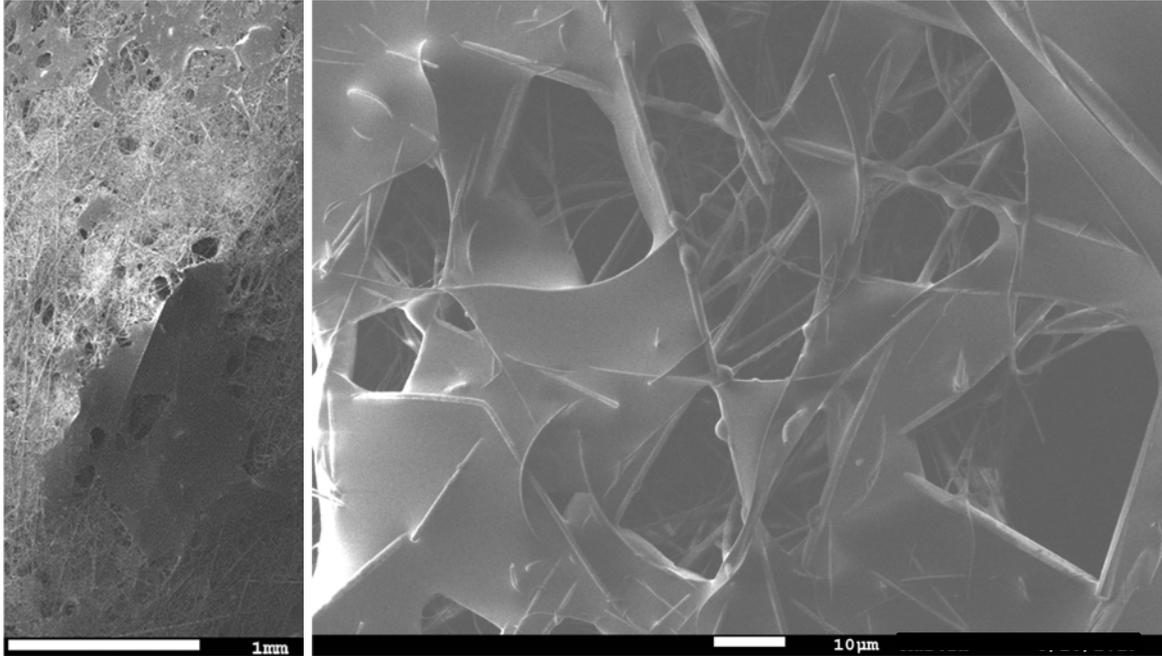


Abb. 15: Medium DF3: REM-Aufnahmen der Abströmseite nach dem Betrieb

Das beobachtete Verhalten kann möglicherweise mit einer mangelnden Homogenität der oleophoben Beschichtung zusammenhängen. Diese konnte auf einigen Fasern nachgewiesen werden, s. Abbildung 16.

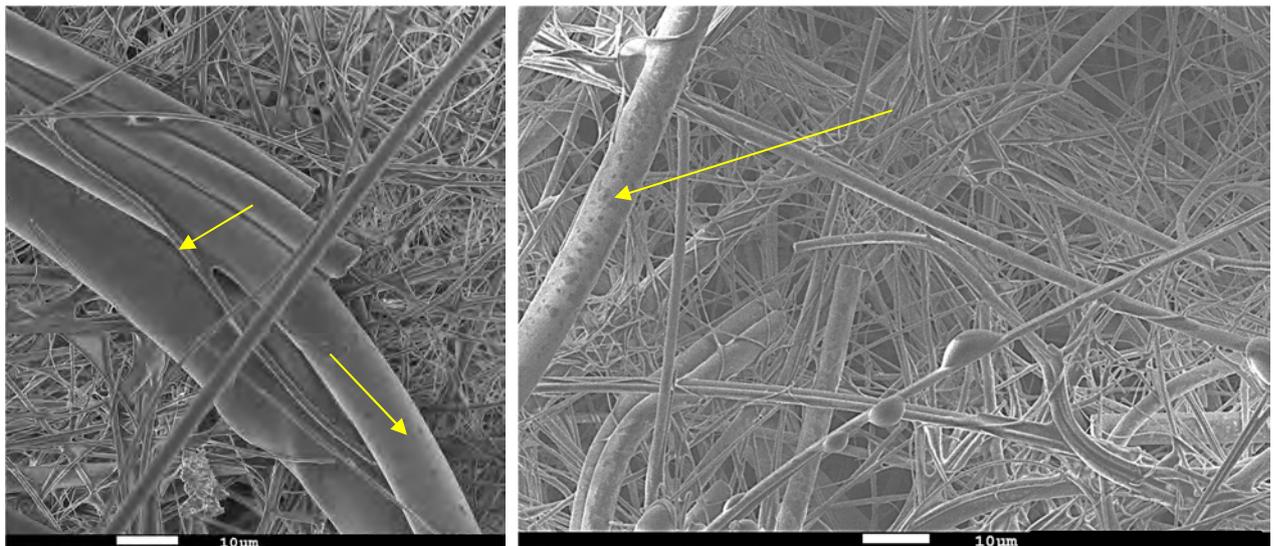


Abb. 16: Medium DF3: Inhomogenität in der oleophoben Beschichtung (Links trocken; rechts nach Testlauf mit Öl)

1.4.3.4 Untersuchung der Entwicklung des Öl-Abscheideverhaltens im Versuchsverlauf

Zur Untersuchung des Partikelabscheideverhaltens über den gesamten Verlauf der Sättigung der Medien wurde der abströmseitige Luftstrom mit einem Alphasense OPC-N2 untersucht.

Die Untersuchungen zeigten zwei unterschiedliche Verhaltensweisen. Die weniger dichten Medien wie DF1, DF2, G, E, etc, zeigten zu Beginn (vor und) während der Sprungphase des Differenzdruckaufbaus einen deutlich höheren Durchtritt von Ölpartikeln als nach dem Erreichen der Sättigungsphase, s. Abbildung 17. In dieser Startphase dringen auch vermehrt größere und damit massereichere Partikel durch die Medien. Je offener die Medien desto größere Partikel können durchtreten. Mit zunehmender Sättigung wird das Abscheideverhalten der Medien aufgrund sich verschließender Strömungskanäle besser und die Partikelkonzentration nimmt deutlich ab.

Bei den dichten Medien DF3 und DF4 zeigt sich dagegen ein geringes und eher homogenes Durchdringverhalten der kleinen Partikel im Hundertnanometerbereich nach Eintritt in die Sättigungsphase und dann über die Versuchszeit hinweg. Größere Partikel sind über den gesamten Experimentverlauf kaum vorhanden. Auffällig ist hier, dass in der Anfangsphase, wenn sich der Differenzdruck bis zur Sättigung aufbaut, wie auch in Kapitel 1.4.1 gezeigt, nahezu keine Partikel durch das Medium dringen, dann aber, nach Erreichend er Sättigung, Primärpenetration auftritt. Diese deutet auf die Ausbildung von festen Lufttransportkanälen nach Erreichen der Sättigung hin. Durch diese Kanäle können bestimmte Partikelgrößen das Medium passieren.

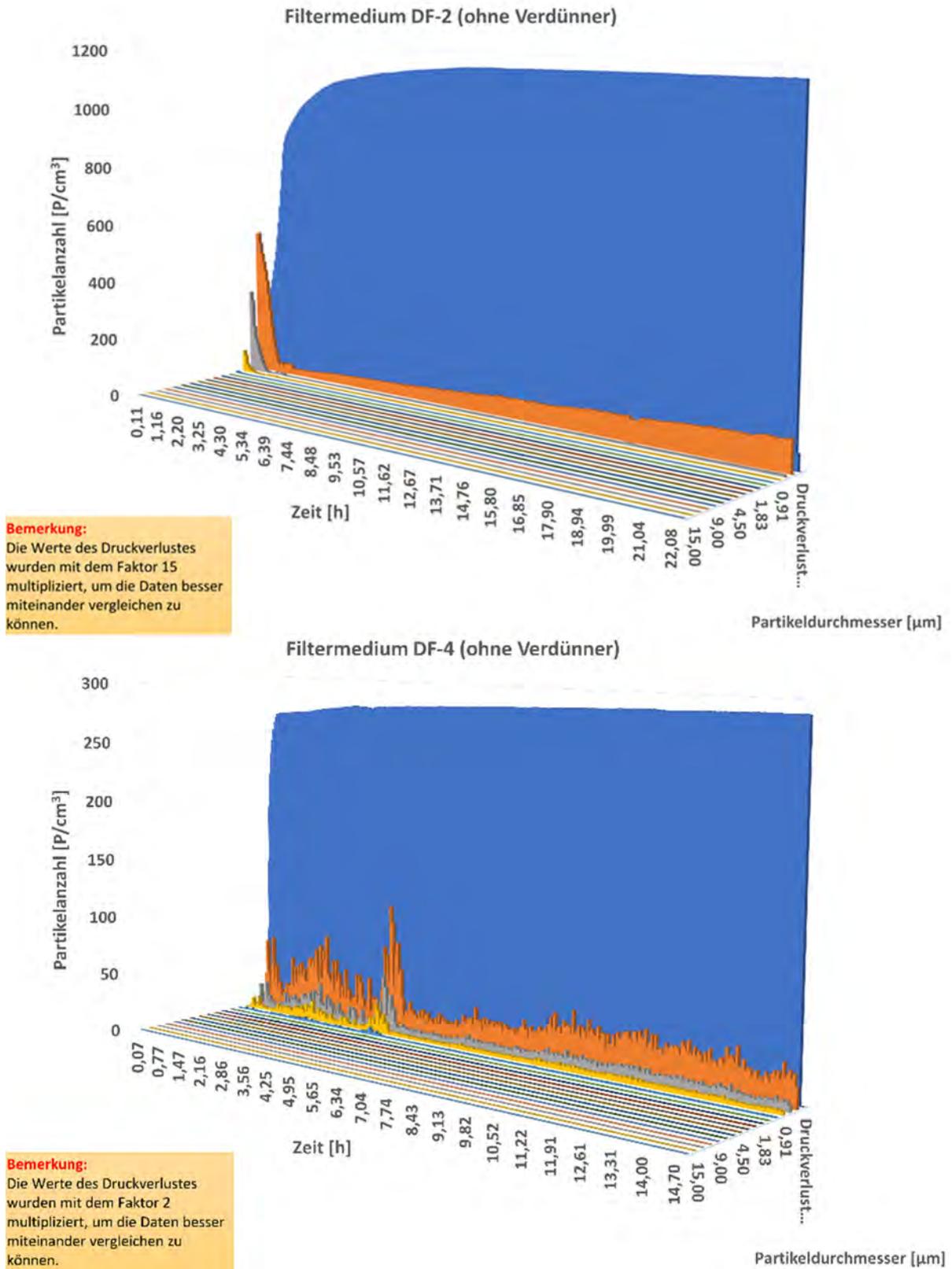


Abb. 17: Zeitliche Entwicklung der abströmseitigen Partikelkonzentration: Das weniger dichte Medium DF2 im Vergleich zum dichten Medium DF4 (dunkelblau: Verlauf der Differenzdruckkurve)

1.4.3.5 Untersuchung des Kapillarendrucks unter Verwendung von Zentrifugation

1.4.3.5.1 Verfahren zur Ermittlung der Sättigung in Abhängigkeit vom Kapillardruck einer benetzenden Flüssigkeit im Inneren einer porösen Struktur mit Hilfe einer Zentrifuge (Hassler Methode).

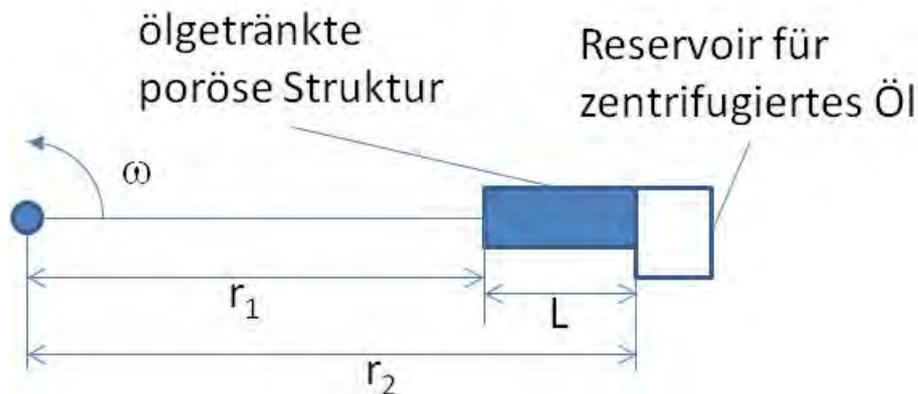


Abb. 18: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Als Kapillardruck wird der Druck bezeichnet, der nötig ist, um eine benetzende Flüssigkeit aus einer porösen Struktur heraus zu drücken.

Wird ein bestimmter Druck auf die Flüssigkeit in einer porösen Struktur ausgeübt, so stellt sich eine bestimmte Sättigung ein. Je größer dieser Druck, desto geringer die Sättigung. Mit Hilfe der Zentrifugenmethode kann dieser Druck in weiten Bereichen eingestellt und die zugehörige mittlere Sättigung im jeweiligen Gleichgewicht bestimmt werden. Im Gleichgewicht sind dabei der von außen aufgebrauchte Druck und der interne Kapillardruck gleich. Aus beiden experimentellen Größen (äußerer Druck und mittlere Sättigung) kann, wie nachstehend erläutert, die Sättigung als Funktion des Kapillardruckes ermittelt werden.

Hassler et al beschreiben diese Vorgehensweise und liefern den zugehörigen Formelapparat zur Bestimmung dieser Abhängigkeiten.

Nach Hassler et al gilt:
$$S(z) = \frac{d(z\bar{s})}{dz}$$

$S(z)$: Sättigung als Funktion des Kapillardruckes; das ist der Zusammenhang, der uns interessiert.

z : Kapillardruck

\bar{s} : mittlere Sättigung bei einem Kapillardruck z

Zu ermitteln ist also die mittlere Sättigung \bar{s} , die sich bei Anwendung eines bestimmten äußeren Druckes z im porösen Medium einstellt.

$$z = \rho \alpha L \text{ mit } \alpha = \omega^2 \frac{r_2 + r_1}{2} \text{ und } L = r_2 - r_1$$

ρ : Dichte des Fluids

α : Zentrifugalbeschleunigung

ω : Winkelgeschwindigkeit = $2 \pi n$

n : Umdrehungen pro Sekunde

L : Länge der porösen Struktur in radialer Richtung

r_1, r_2 : Radien der inneren und äußeren Begrenzung der porösen Struktur

Für den Kapillardruck ergibt sich also:

$$z = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (r_2^2 - r_1^2)$$

Aus dem Experiment wird zunächst die mittlere Gleichgewichtssättigung in Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit (also vom Kapillardruck) ermittelt.

Mit Hilfe dieser Werte wird anschließend das Produkt aus Kapillardruck und zugehöriger mittlerer Sättigung über dem Kapillardruck graphisch dargestellt und schließlich die Steigung des resultierenden Graphen in Abhängigkeit des Kapillardrucks graphisch ermittelt.

Das Resultat ist der Zusammenhang $S(z)$.

Die hier beschriebene Methode wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eingesetzt, um das Verhalten von Filtermedien gegenüber bestimmten Ölen experimentell zu erfassen. Die Ergebnisse sind in nachstehendem Abschnitt dargestellt. Die Methode wurde zunächst an oleophilen Filtermedien und unter Verwendung des Standardöls Corena 46 verifiziert.

Oleophile Medien haben den Vorteil, dass sich mit diesen auf sehr einfache Art und Weise (nämlich durch Tauchen) ein vollständig gesättigtes Medium präparieren lässt.

Innerhalb des laufenden Projektes konnte aus Zeitgründen und aus Gründen des experimentellen Aufwandes eine Verifizierung der Methode an oleophoben Medien nicht mehr durchgeführt werden. Oleophobe Filtermedien lassen sich nicht ohne weiteres in einen gesättigten Zustand überführen. Mögliche Ansätze, dies zu tun, sehen wir in der Anwendung der Aerosoltechnologie oder dadurch, dass mit Hilfe eines Vakuums das Öl in das Innere der Medien transportiert wird. Dies muss aber im Vorfeld weiterer Experimente noch untersucht werden. Wir erachten die Methode jedoch als ein sehr hilfreiches Mittel, um gezielt den Einsatz verschiedener Medien für die Koaleszenzfiltration gegenüber bestimmten Ölen auszuwählen.

1.4.3.5.2 Untersuchung des Kapillarendrucks unter Verwendung von Zentrifugation

Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass die Permeabilität der Filtermedien vom Projektpartner TUDo benötigt werden würde, um das Multiskalenmodell zu entwickeln, da aber aufgrund anderer Lösungsansätze dies im Projektverlauf nicht mehr der Fall war, wurden die Untersuchungen zum Kapillardruck erst gegen Ende des Projektes begonnen und eine prinzipielle Umsetzbarkeit gezeigt (Abbildung 19). Die durchgeführten Experimente lassen außerdem eine Anwendbarkeit zur allgemeinen Charakterisierung von Filtermedien gegenüber verschiedenen Ölen vermuten. Daher ist beabsichtigt diese Idee in zukünftigen Forschungsstudien weiter zu verfolgen, sei es in einer Masterarbeit oder in weiteren Forschungsprojekten.

Bisher konnten nur wenige Versuche an einem Drainagemedium durchgeführt werden. Dieses besitzt die nötige Steifigkeit, um auch bei höheren Umdrehungen in der Halterung stabil zu bleiben. Die Halterung wurde mittels 3D-Druck erstellt und so angepasst, dass der Streifen Medium aufrecht mit möglichst geringem Kontakt in ein Zentrifugenröhrchen (50ml) eingebracht werden konnte. Versuche mit Glasfaservliesen führten ab einer bestimmten Rotationsgeschwindigkeit zu einem Zerknüllen des Mediums und machen daher die Entwicklung einer verbesserten Halterung nötig.

In ersten Versuchen konnte gezeigt werden, dass ähnlich wie bei porösen Gesteinen durch Zentrifugation ein Austritt einer definierten Flüssigkeitsmenge in Abhängigkeit von der eingestellten Rotationsgeschwindigkeit auftritt. Wie Abbildung 19 verdeutlicht, nähert sich die Sättigung des Mediums nach etwas 30 min einem Grenzwert an, der ein Maß für den Kapillardruck im Material ist. Die jeweilige Rotationsgeschwindigkeit entspricht der Kraft, die

eine bestimmte mittlere Sättigung im Medium verursacht. Mit Hilfe der in Kapitel 1.4.3.5.1 dargestellten Formel zur Berechnung des Kapillardrucks z lässt sich die Abhängigkeit der Sättigung $S(z)$ grafisch darstellen. In Abbildung 19 ist der nach der Theorie erwartete Verlauf der Kurve gestrichelt angedeutet [10]. Sofern zukünftige Versuche diesen Verlauf bestätigen, sollte mit Hilfe des vorgestellten Verfahrens eine schnelle Charakterisierung des Verhaltens von Filtermaterialien gegenüber verschiedenen Ölen möglich werden. Dadurch können beide Komponenten in Hinblick auf einen möglichst geringen Druckverlust auf einander abgestimmt und so eine zusätzliche Energieeinsparung erreicht werden.

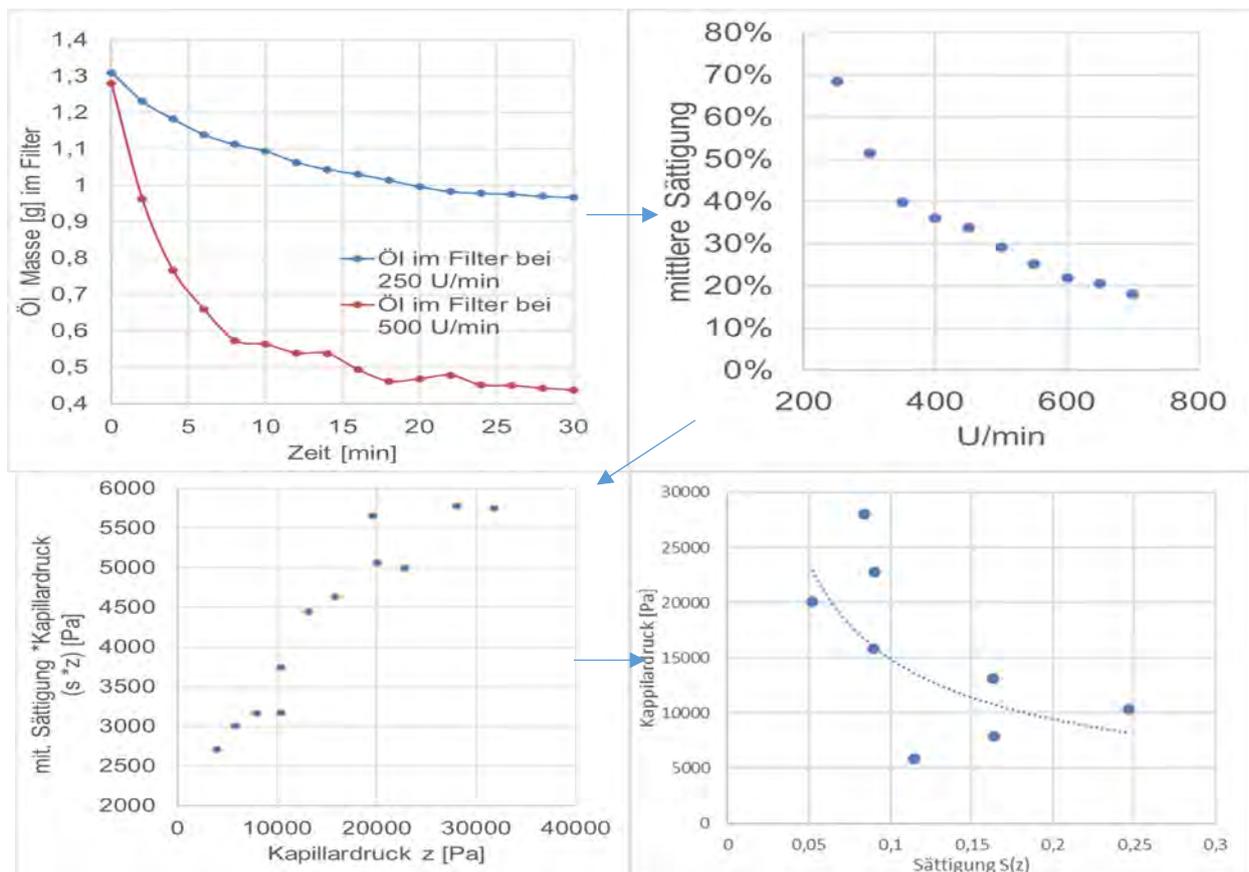


Abbildung 19: zeitliche Entwicklung des Ölsättigung in Drainagemedium 163-V durch Zentrifugation, Restsättigung nach 30 min Zentrifugation und Transformation der Werte (gestrichelt: vermuteter Verlauf des Kapillardrucks in Abhängigkeit von der Sättigung)

1.5 Arbeitspaket 5: Modellierung der Ausbreitungsmechanismen einer eintretenden flüssigen Phase in den Poren definierter Teststrukturen mittels VOF (LSM)

Die Leistungsfähigkeit eines Filtermediums wird über den Druckverlust und den Abscheidegrad beurteilt. Eine Voraussage dieser Parameter ohne umfangreiche experimentelle Untersuchungen würde die Auswahl geeigneter Filter erleichtern. In der vorliegenden Untersuchung wird das Verhalten perfekt benetzbarer Faserfilter numerisch untersucht. Die Simulationen werden mit dem Euler-Euler Verfahren im kommerziellen CFD-Programm ANSYS CFX[®] durchgeführt. Es werden verschiedene theoretische Modelle zur Vorhersage des Abscheidegrades an einer Einzelfaser miteinander verglichen und daraus ein Modell entwickelt, um die Nettoabscheidung der Ölpartikel vorhersagen zu können. Es werden numerische Untersuchungen zum Druckverlust der Strömung eines viskosen Fluides durch eine beliebige

Faseranordnung durchgeführt. Im stationären Gleichgewicht wird auch eine mehrphasige Simulation unter Einfluss der Gewichtskraft durchgeführt und die physikalische Plausibilität geprüft.

1.5.1 Untersuchungen zum Druckverlust

Die heutigen Theorien zur Filtration basieren hauptsächlich auf dem sogenannten Zellenmodell von Happel-Kuwabara, welches für eine Strömung mit vernachlässigbarem Trägheitseinfluss entwickelt wurde (Strömung im Stokesflow-Bereich). Für eine zylindrische Faser mit dem Radius r_f wird der Radius der Zelle R_F , so gewählt, dass das Verhältnis des Zylinders zum Zellenvolumen der Solidität des tatsächlichen Filters entspricht. Das Zellenmodell ist in Abb. 20 dargestellt, mit der ungestörten Anströmgeschwindigkeit U_0 auf die Faser.

Happel [1] und Kuwabara [2] stellten das Modell unabhängig voneinander auf und verwendeten beide die Haftbedingung auf der Faseroberfläche als Randbedingung. Auf dem äußeren Rand des Strömungsgebietes nahm Happel die Schubspannungsfreiheit und Kuwabara die Rotationsfreiheit an.

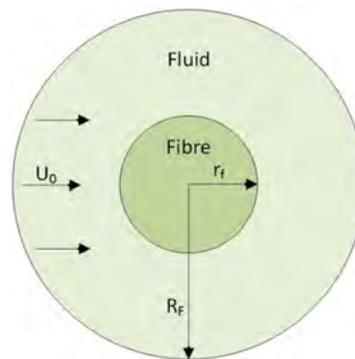


Abb. 20: Zellenmodell von Happel-Kuwabara: zylindrische Faser (dunkelgrün) und Strömungsgebiet (hellgrün)

In einer vorausgegangenen Abschlussarbeit berechnete Shi [3] für parallel angeordnete Zylinder das zweidimensionale Strömungsfeld numerisch mit ANSYS CFX[®] und entwickelte aus den Ergebnissen eine Gleichung für den Druckverlust in Abhängigkeit der Solidität des Filters und der Reynolds-Zahl. Dabei wurde die *fictitious domain*-Methode von Khadra [4] verwendet. Abschließend wurde das Verfahren auf 3D erweitert. Dazu wird zunächst der Einfluss der räumlichen Orientierung einer einzelnen Faser auf den Druckverlust untersucht. Anschließend werden Strukturen aus vielen zufällig orientierten Fasern erstellt und auch hier der Druckverlust berechnet. Anhand der Ergebnisse wird eine Druckverlustkorrelation in Abhängigkeit der Solidität und der Reynolds-Zahl erstellt. Die eigenen Ergebnisse werden mit denen von Happel-Kuwabara und Shi verglichen.

1.5.1.1 Modellierung

Das numerische Simulationsprogramm ANSYS CFX[®] wird zur Berechnung des Druckverlustes verwendet. Es wird von einer laminaren und stationären Strömung ausgegangen. Aufgrund der kleinen Mach-Zahlen und Druckverluste kann die Luft als inkompressibles Medium angenommen werden. Äußere Kräfte werden nicht berücksichtigt, es wird jedoch ein

Impulsverlust \vec{S} hinzugefügt, welcher die Festkörper in der *fictitious domain*-Methode darstellt. Die Erhaltungsgleichungen ergeben sich durch die Kontinuitätsgleichung und die Navier-Stokes Gleichung (Chaudhuri et al. [5]),

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{v} &= 0, \\ \rho((\vec{v} \cdot \nabla) \cdot \vec{v}) &= -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} + \vec{S}, \end{aligned} \quad (1)$$

mit der Dichte ρ , dem Geschwindigkeitsvektor \vec{v} , dem statischen Druck p , der dynamischen Viskosität μ und dem Impulsverlustterm \vec{S} , welcher proportional zu \vec{v} ist: $\vec{S} \propto \vec{v}$. Um eine stabile Simulation zu gewährleisten und die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Fälle zu verbessern, werden die Größen in den Gleichungen mit charakteristischen Werten entdimensioniert. Im Folgenden werden alle dimensionslosen Größen mit einem * markiert. Während sich die Kontinuitätsgleichung nicht grundlegend ändert, lauten die entdimensionierte Navier-Stokes Gleichung (2) und die zugrundeliegenden Skalierungsbeziehungen (3):

$$Re((\vec{v}^* \cdot \nabla^*) \cdot \vec{v}^*) = -\nabla^* p^* + \Delta^* \vec{v}^* + \vec{S}^*, \quad (2)$$

$$(x^*, y^*, z^*) = \frac{(x, y, z)}{d_f}, \quad \vec{v}^* = \frac{(u, v, w)}{u_0}, \quad p^* = \frac{p \cdot d_f}{\mu \cdot u_0}, \quad (3)$$

$$Re = \frac{\rho u_0 d_f}{\mu}, \quad \vec{S}^* = \frac{\vec{v}^*}{k}. \quad (4)$$

Die charakteristischen Größen in Gleichung (3) sind der Faserdurchmesser d_f , die Eintrittsgeschwindigkeit u_0 und die viskose Druckskala $\frac{\mu \cdot u_0}{d_f}$.

Die Reynolds-Zahl Re in Gleichung (4) repräsentiert das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den viskosen Kräften. Der letzte Term in Gleichung (2), \vec{S}^* , ist der skalierte Impulsverlust. Dieser kann in kommerziellen CFD-Programmen wie ANSYS CFX[®] als poröses Gebiet mit der Konstanten k definiert werden, wie in Gleichung (4) dargestellt ist. In dieser Untersuchung wird der Druckverlust durch eine Strömung um die Fasern simuliert. Innerhalb der Fasern wird die Konstante k nahe Null gesetzt. Dies entspricht einer unendlich großen Impulssenke, was eine Durchströmung dieses Bereiches verhindert. Im restlichen Bereich wird k auf den numerisch größtmöglichen Wert gesetzt, was einer freien Strömung entspricht.

An dieser Stelle bietet sich die Einführung einer anderen wichtigen Kennzahl an. Die Solidität c , vgl. Gleichung (5) ist als Verhältnis des Faservolumens zum Filtervolumen definiert. Ein guter Filter sollte eine niedrige Solidität aufweisen, da dies einen niedrigen Druckverlust bewirkt. Da der Faserdurchmesser d_f als charakteristische Längenskala verwendet wird, bestimmt die Solidität c die Kantenlänge H des zweidimensionalen, quadratischen Berechnungsgebietes für eine Einzelfaser

$$c = \frac{\pi d_f^2}{4H^2} \rightarrow H = \sqrt{\frac{\pi d_f^2}{4c}}. \quad (5)$$

1.5.1.2 Implementierung der Fasern

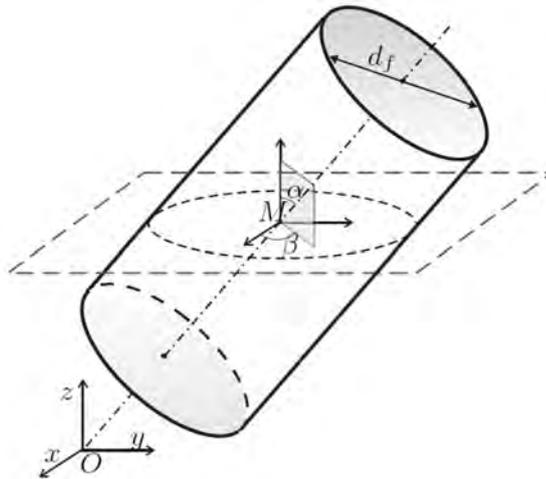


Abb. 21: 3D-Darstellung einer Faser des Durchmessers d_f

Bei dreidimensionaler Betrachtung ist für eine beliebig orientierte Faser die Querschnittsfläche in der XY -Ebene nicht kreisförmig, sondern elliptisch, wie anhand Abbildung 21 ersichtlich. Das von der Faser belegte Gebiet kann durch Gleichung (7) beschrieben werden (Chaudhuri [5]). Darin befinden sich fünf Freiheitsgrade: Der Steigungswinkel α , der Drehwinkel β und die Koordinaten eines Mittelpunktes x_m , y_m und z_m (Gleichung (6))

$$x_m = \frac{z_m}{\tan \alpha} \cos \beta - x_0, \quad y_m = \frac{z_m}{\tan \alpha} \sin \beta - y_0, \quad z_m = z - z_0, \quad (6)$$

$$\left(\frac{\sin \beta \left(x - \left(\frac{z-z_0}{\tan \alpha} \cos \beta - x_0 \right) \right) + \cos \beta \left(y - \left(\frac{z-z_0}{\tan \alpha} \sin \beta - y_0 \right) \right)}{R / \sin \alpha} \right)^2 + \left(\frac{\cos \beta \left(x - \left(\frac{z-z_0}{\tan \alpha} \cos \beta - x_0 \right) \right) - \sin \beta \left(y - \left(\frac{z-z_0}{\tan \alpha} \sin \beta - y_0 \right) \right)}{R} \right)^2 = 1. \quad (7)$$

Unter Verwendung der ANSYS Workbench werden Zufallswerte für α , β , x_m , y_m und z_m erstellt. Die Variationen für α und β erfolgen im Bereich $-\pi/2 \leq \alpha, \beta \leq \pi/2$ und x_m , y_m , z_m werden zwischen 0 und H variiert, was den gesamten Parameterbereich abdeckt. Die Faser kann somit irgendwo starten und jede räumliche Orientierung ausweisen. Dabei werden alle Fasern als unendlich lang angenommen.

Die Geometrie des Berechnungsgebietes ist ein Würfel, dessen Kantenlänge durch die Solidität festgesetzt ist. Aus numerischen Gründen dürfen bei den verwendeten Randbedingungen in der Eintrittsfläche keine Fasern vorliegen, weshalb der Würfel an der Eintrittsseite um ein kleines Volumen verlängert wird. Aufgrund der räumlichen Orientierung der Fasern könnten diese sonst in der Eintrittsfläche vorliegen und der verwendeten Randbedingung am Eintritt (inlet), einer einheitlichen Geschwindigkeit, entgegenstehen.

Die Randbedingungen der oberen und unteren Wand, sowie der Vorder- und Rückseite werden als freies Rutschen (free slip) definiert. Die Randbedingungen der linken und rechten Seite des Berechnungsgebietes sind wie die in der zweidimensionalen Simulation. Eine

Zusammenfassung der im 3D-Fall verwendeten Randbedingungen ist in Abb. 22 dargestellt. Die erweiterte Geometrie an der Einströmseite ist in Abb. 23 für gleichförmige, parallel angeordnete Fasern dargestellt.

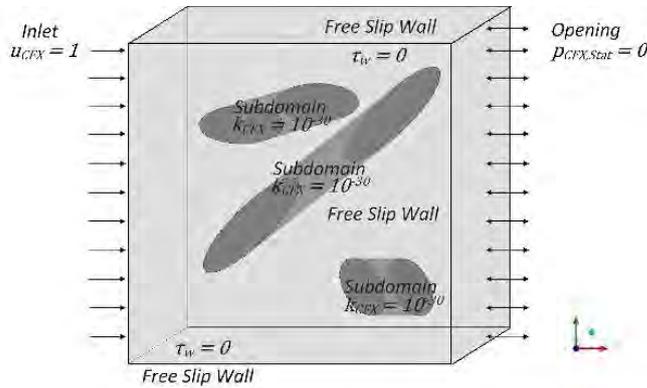


Abb. 22: Randbedingungen der 3D-Simulationen

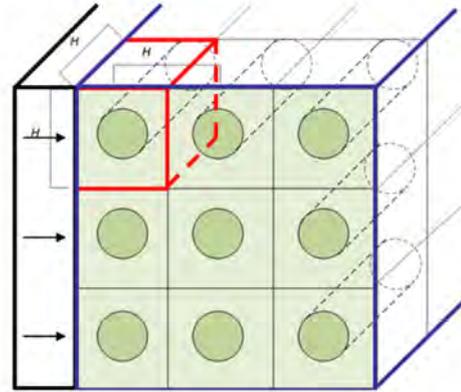


Abb. 23: 3D-Berechnungsgebiete mit dem erweiterten Einströmbereich; rot: Einzelfaser, blau: strukturierte parallele Fasern

1.5.1.3 Ergebnisse Druckverlust

Die Wände sind nicht durchströmbar und beschränken somit den Strömungsweg. Um diesen Wandeffekt zu reduzieren, wird das eigentliche Berechnungsgebiet in ein größeres Pseudogebiet gesetzt, wie in Abb. 24 dargestellt. Aus verschiedenen Simulationen wird ersichtlich, dass eine Erweiterung der Kantenlängen um den 2,5-fachen Faserdurchmesser d_f zur Vermeidung des Wandeffektes ausreichend ist. Für die Auswertung wird der Würfel der Kantenlänge X verwendet, und in das gesamte Berechnungsgebiet der Kantenlänge Y platziert. Die Erweiterung an der Einströmseite hat nun die Länge N .

Der Druckgradient ∇p^* ist definiert als Druckunterschied bezogen auf die Einheitslänge, wobei hier die mittleren Drücke an den Flächen bestimmt werden:

$$\nabla p^* = \frac{1}{X} \left(\frac{1}{X^2} \int^{Inlet} p_{in} dA - \frac{1}{X^2} \int^{outlet} p_{out} dA \right). \quad (8)$$

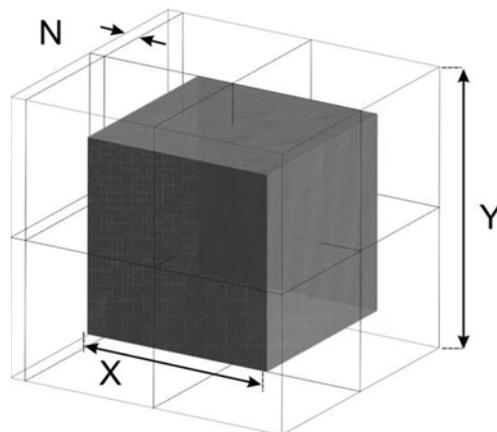


Abb. 24: Ausgewertetes Berechnungsgebiet innerhalb des gesamten Berechnungsgebietes

Um eine für den entdimensionierten Druckgradienten gemittelte Korrelation erstellen zu können, ist eine Mindestgröße des Berechnungsgebietes erforderlich. Zwar wird mit der Größe des Berechnungsgebietes die statistische Aussagekraft größer, es steigt aber auch der numerische Aufwand. Um den Einfluss der Größe des Berechnungsgebietes zu untersuchen, wird der Druckgradient gegen die Größe des ausgewerteten Berechnungsgebietes (vgl. Abb. 24) in Abb. 25 dargestellt. Die Druckgradienten ∇p^* für das ausgewertete und das gesamte Berechnungsgebiet weichen für kleinere Gebiete stark voneinander ab, ergeben aber für Gebietsgrößen ab 45 Faserdurchmessern ähnliche Werte ($\pm 3\%$).

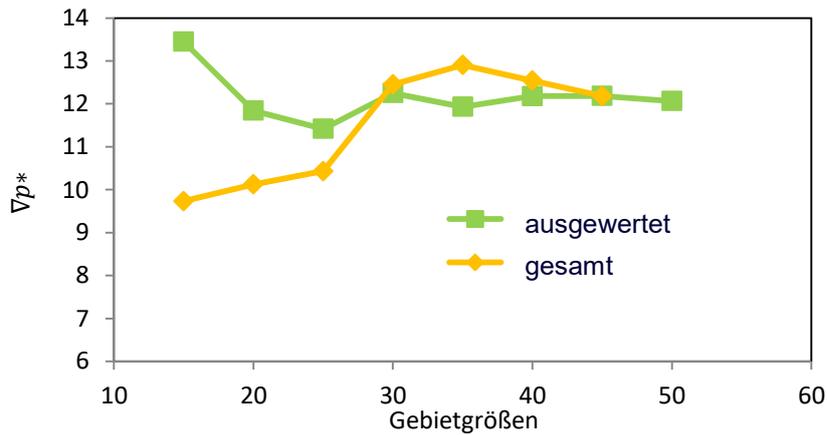


Abbildung 25: ∇p^* vs. Gebietsgröße

Abb. 26 zeigt den Druckgradienten ∇p^* für verschiedene Soliditäten c und Reynolds-Zahlen Re . ∇p^* steigt deutlich mit der Solidität c , zeigt aber nur eine schwache Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl Re . Für schleichende Strömungen $Re < 0,1$ zeigt die Reynolds-Zahl erwartungsgemäß keinen Einfluss mehr auf ∇p^* .

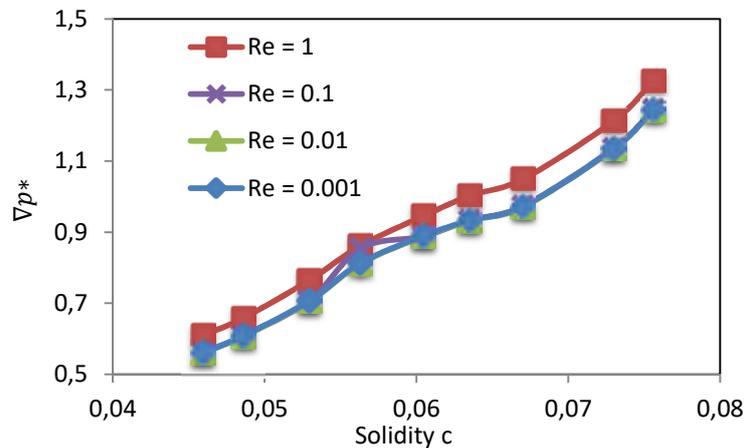


Abbildung 26: ∇p^* für verschiedene Soliditäten c und Reynolds-Zahlen Re

Die folgende Druckverlustkorrelation wurde auf Grundlage von 120 Simulationen erstellt. Sie wurde durch die nichtlineare Flächenapproximation eines Polynoms mit OriginLabs® erstellt

$$\nabla p^* = -0,19118 + 13,19826 c - 0,08371 Re + 71,44049 c^2 + 0,07393 Re^2 + 1,22064 c Re. \quad (9)$$

Der Anwendungsbereich dieser Funktion ist durch die verwendeten Ergebnisse der Simulationen begrenzt. Damit gilt für die Reynolds-Zahl $Re \in [0,001; 1]$ und für die Solidität $c \in [5; 10]$ %. Die gemittelte Übereinstimmung der Funktion mit den numerischen Ergebnissen beträgt 98,88 %. Der Bestimmtheitsgrad ist $R^2_{\text{poly}} = 0,99$ und der RMS-Fehler = 0,01687. Es ergibt sich ein Chi-Quadrat Wert von $\chi^2 \leq 10^{-9}$.

1.5.2 Abscheideeffizienz

Um die Abscheideeffizienz zu untersuchen, wurden einige theoretische Modelle verglichen, siehe Abbildung 24 und 25. Das Model von Kasper [4] scheint dabei die besten Ergebnisse zu liefern. In diesem Modell wird die Netto-Abscheideeffizienz E folgendermaßen beschrieben:

$$1 - E = (1 - E_D)(1 - E_R)(1 - E_I)(1 - E_G) \quad (10)$$

Dabei sind E_D, E_R, E_I, E_G die Abscheideeffizienzen durch Diffusion (D), Interzeption (R), Inception (I) und Schwerkraft (G).

Die Abscheideeffizienz einer einzelnen Faser kann durch Skalierung auf die Makroskala übertragen werden: $E_{\text{fibre}} = \frac{E D_f}{H}$. Weiterhin kann die Netto-Abscheiderate mehrerer hintereinander angeordneter Fasern durch die folgende, exponentiell fallende Funktion dargestellt werden: $E_{\text{net}} = 1 - e^{-N E_{\text{fibre}}}$. Dabei ist N die Anzahl an Fasern in Durchströmungsrichtung.

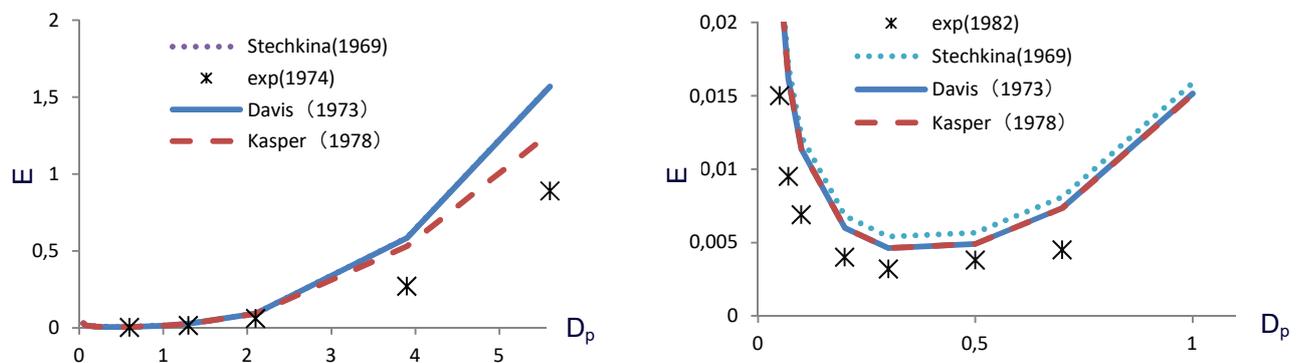


Abbildung 27: Abscheideeffizienz für verschiedene Partikeldurchmesser

1.6 Arbeitspaket 6: Aufbau eines Messverfahrens zur integralen Vermessung des zeitlich veränderlichen Sättigungsgrades (Durchlicht-Verfahren in Kombination mit Fluoreszenz) (ZBT)

Die im Antrag verfolgten Ansätze eines Durchleuchtungsverfahrens und eines Fluoreszenzverfahrens, zur Bestimmung des lokalen über die Filterdicke integrierten Sättigungsgrads, haben sich als nicht geeignet erwiesen, da die Filtermaterialien für sichtbares Licht nicht durchlässig sind und deshalb mit diesen Verfahren keine Aussagen über den integrierten

Sättigungsgrad über die Filterdicke möglich sind. Stattdessen wurde ein neuer Ansatz umgesetzt: Mit einer Thermokamera wird die Wärmeleitung im Filter untersucht (s. Abb. 28, links), welcher von einer Blitzlampe rückseitig, kurzzeitig angestrahlt wird. Durch die Dauer der Wärmeleitung können Rückschlüsse auf den Grad der lokalen Ölsättigung gezogen werden. Temperaturänderungen verlaufen langsamer an ölbeladenen Stellen. In Abb. 28 (rechts) sind Thermokameraaufnahmen eines oelophilen Filters (DF5) im ungesättigten, teilweise gesättigten (nach 15 min im Strömungskanal mit 2,5 g/h Corena Beladung im Luftstrom) und im gut gesättigten Zustand (nach 3 h im Strömungskanal mit 2,5 g/h Corena Beladung im Luftstrom), 0,05 s nach Auslösen des Blitzes, zu sehen. Der unbeladene Filter ist nach 0,05 s größtenteils wieder abgekühlt, während der beladene Filter an ölgesättigten Stellen Wärme gespeichert hat.

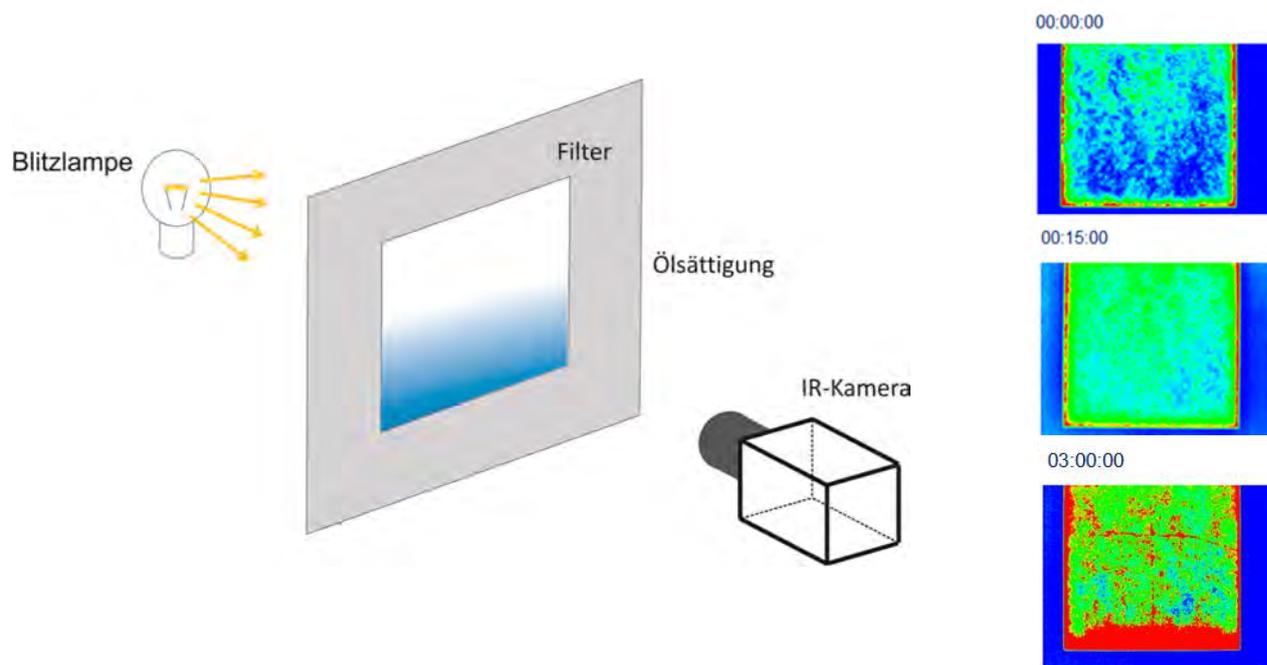


Abbildung 28: (links) Versuchsstand zur optischen Vermessung des Sättigungsgrads, (rechts) Thermokameraaufnahmen eines Filters: ungesättigter Fall (oben), teilweise gesättigt (Mitte) und gut gesättigt (unten) jeweils 0,05 s nach Auslösen des Blitzes

Die lokale Ablagerung von Flüssigkeit im unteren Bereich des Filters „Wet-Band“ ist qualitativ nachweisbar. Außerdem werden Ölsammlungen (durch das im Strömungskanal hinter dem Filter liegenden Alu-Gitter) und an Knicken im Filter sichtbar. Der Einfluss des Öls ist schon nach 15 Minuten im Strömungskanal mit 2,5 g/h Corena Beladung nachweisbar, s. Abb. 28 (rechts, Mitte). Allerdings hat sich bei der Anwendung des Messverfahrens herausgestellt, dass bei der Interpretation der Ergebnisse Oberflächeneinflüsse berücksichtigt werden müssen. Unterschiedliche Filtermedien absorbieren unterschiedlich: Das Material, die Dicke und die Struktur des Filterpapiers und auch Abstand und Ausrichtung zur Lichtquelle (Blitz) haben einen Einfluss auf die Absorption. Außerdem verändert das zu detektierende Medium, Corena 46 Öl, nicht nur die Wärmeleitung im Filter sondern auch die Absorption der Wärmestrahlung auf der Filteroberfläche. Es spielt eine Rolle welche Seite des Filters vom Blitz beleuchtet wird. Wir haben dazu einen Filter von einer Seite mit Öl belegt, s. Abbildung 29 und mit dem Versuchsstand zur optischen Vermessung des Sättigungsgrads untersucht (Abb. 28).

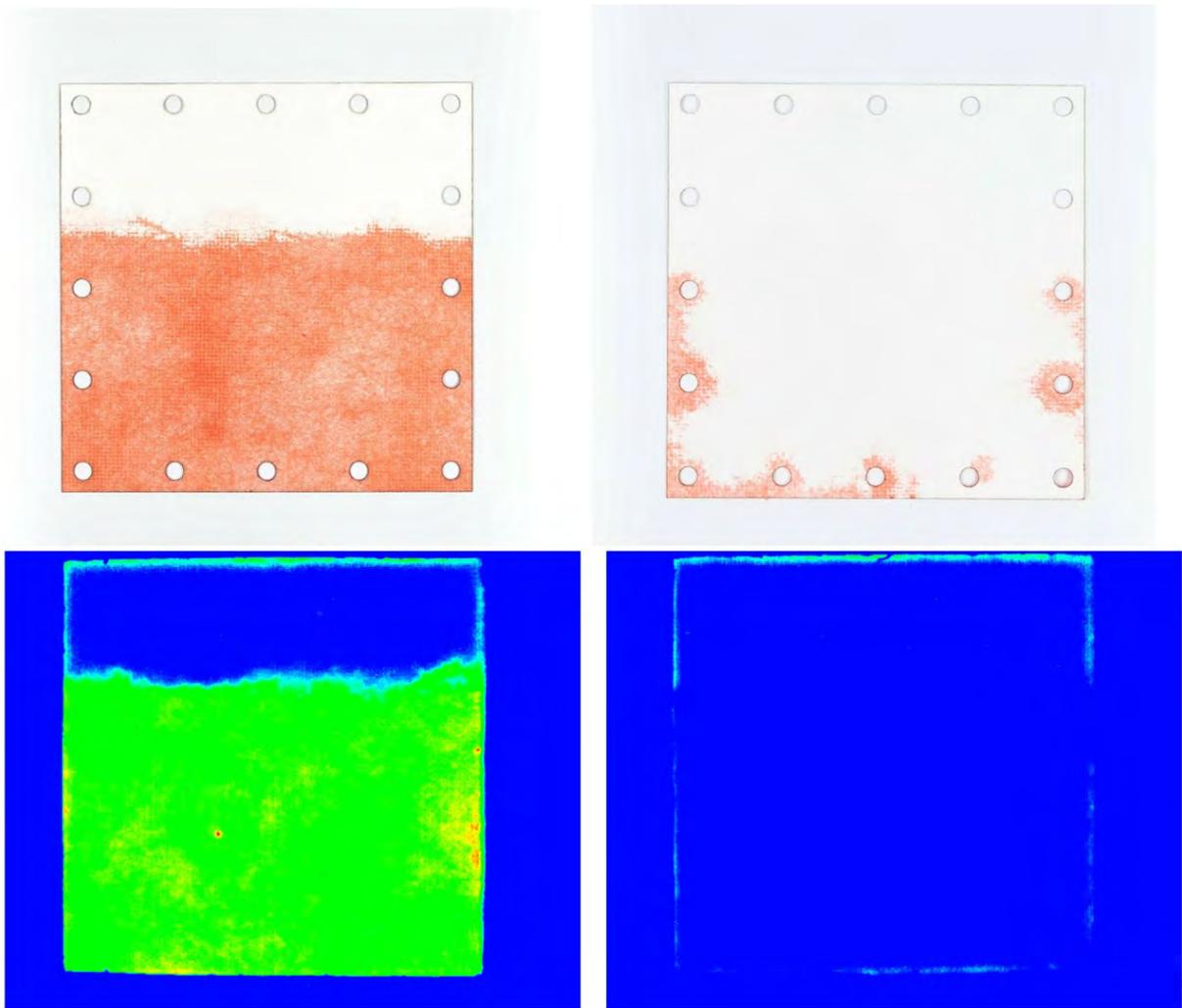


Abbildung 29: Filter, einseitig mit gefärbtem Öl belegt, (oben) Fotos beider Seiten, (unten) Thermokameraaufnahmen: (links) die mit Öl belegte Seite wurde angeblitzt, (rechts) die mit Öl belegte Seite war der Kamera zugewandt

Die Thermokameraaufnahmen zeigen, dass die ölgesättigte Seite das Blitzlicht absorbiert und die Wärme nur langsam ableitet, aber die unbelegte Filterseite das Blitzlicht reflektiert. Also im zweiten Fall die Wärmestrahlung kaum in das Filterpapier eindringt. Durch den großen Einfluss von Oberflächeneffekten auf die Absorption des Lichtes können mit diesem Messverfahren keine eindeutigen qualitativen Aussagen über die lokale Ölsättigung gemacht werden, da diese immer durch Einflüsse der Filteroberfläche überlagert werden.

Das Messverfahren ist demnach für diese Anwendung ungeeignet. Das Ziel dieses Arbeitspakets, der Aufbau eines Messverfahrens zur integralen Vermessung des zeitlich veränderlichen Sättigungsgrades konnte in der Projektlaufzeit nicht zufriedenstellend realisiert werden.

1.7 Arbeitspaket 7: Aufbau eines Verfahrens zur Vermessung der Durchtrittsgeschwindigkeitsverteilung (ZBT)

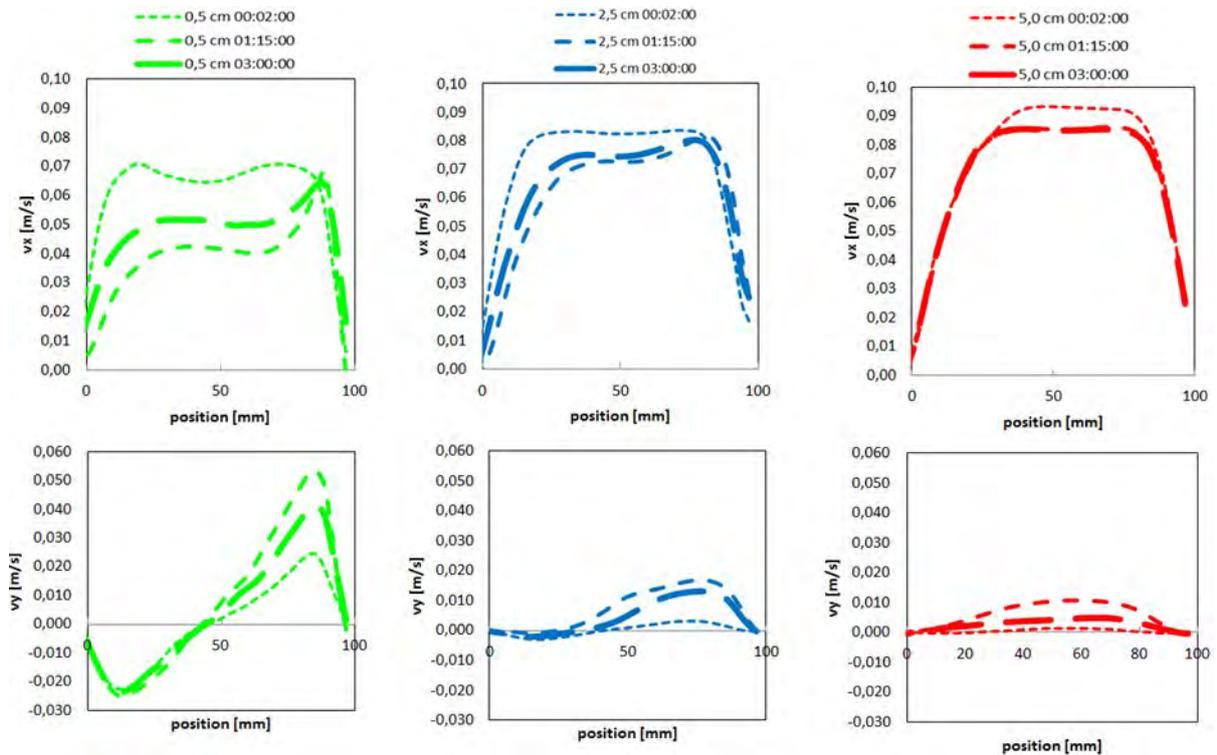


Abbildung 30: Geschwindigkeitsprofile vor einem oleophilen Filter in den Abständen **0,5cm (links)**, **2,5cm (Mitte)**, **5,0cm (rechts)** vor dem Filter gemessen. Jeweils nach 2min im Teststand: ungesättigter Filter (links), nach 1h 15min: teilweise gesättigter Filter, nach 3h: gesättigter Filter, jeweils vx-Komponente (oben) und vy-Komponente (unten)

Der in AP 2 aufgebaute Versuchsstand wird genutzt, um die lokale Anströmgeschwindigkeit des Filtermediums zu untersuchen. Dazu wird ein scannendes Lichtschnittverfahren eingesetzt (Abb. 2), um über die optischen Zugänge des Versuchsstands mittels PIV die Anströmung zum Filter zu vermessen. Mit Hilfe dieser Messtechnik kann der zeitliche Verlauf der Geschwindigkeitsverteilung vor dem Filter, über die komplette Filterhöhe (Position 0 mm unten, Position 100 mm oben am Filter) in einer Ebene (Kanalmitte, orthogonal zum Filter) vermessen werden. In Abb. 30 sind die vx- (in Strömungsrichtung) und vy-Komponenten (vertikal zur Strömungsrichtung) aufgetragen. Die größte Änderung vom ungesättigten zum gesättigten Fall ist bei den Strömungsprofilen, die im Abstand 0,5 cm vor dem Filter gemessen wurden zu sehen. Kurz vor dem Filter wird das Strömungsprofil umverteilt. Die vx-Komponente zeigt hier insgesamt kleiner Geschwindigkeiten, dafür sind die vy-Geschwindigkeiten größer als im Abstand von 5,0 cm vor dem Filter.

1.8 Arbeitspaket 8: Messungen des Sättigungsgrades und der Strömungsverhältnisse am Filter (ZBT/ IUTA)

1.8.1 Arbeiten des ZBT:

Mit dem Verfahren zur Vermessung der Durchtrittsgeschwindigkeitsverteilung wurden am ZBT verschiedene Filter vermessen. Beispielhaft sind in Abbildung 31 die Geschwindigkeitsprofile der vx-Komponente eines oleophilen Filters zu sehen. Zeitgleich zu jedem rot markiertem Differenzdruckwert der Differenzdruckkurve (Abb. 31, rechts) wurde ein Geschwindigkeitsprofil kurz vor dem Filter gemessen. Die Strömungsprofile für die wenig gesättigten Fälle (2 min bis 1h) sind blockförmig. Da der Vordruck bei diesem System konstant ist ändern sich die Geschwindigkeiten bei höherem Druckverlust minimal. Ab dem Sättigungsfall (1:15h) ist ein Sprung in der Differenzdruckkurve und auch im Strömungsprofil zu sehen. Insgesamt nimmt die vx-Geschwindigkeit ab, im oberen Bereich des Filters ist das Profil allerdings zu größeren Geschwindigkeiten verschoben. Dies deutet auf höhere Sättigung im unteren Bereich des Filters und Durchbruch der Strömung im oberen Bereich hin.

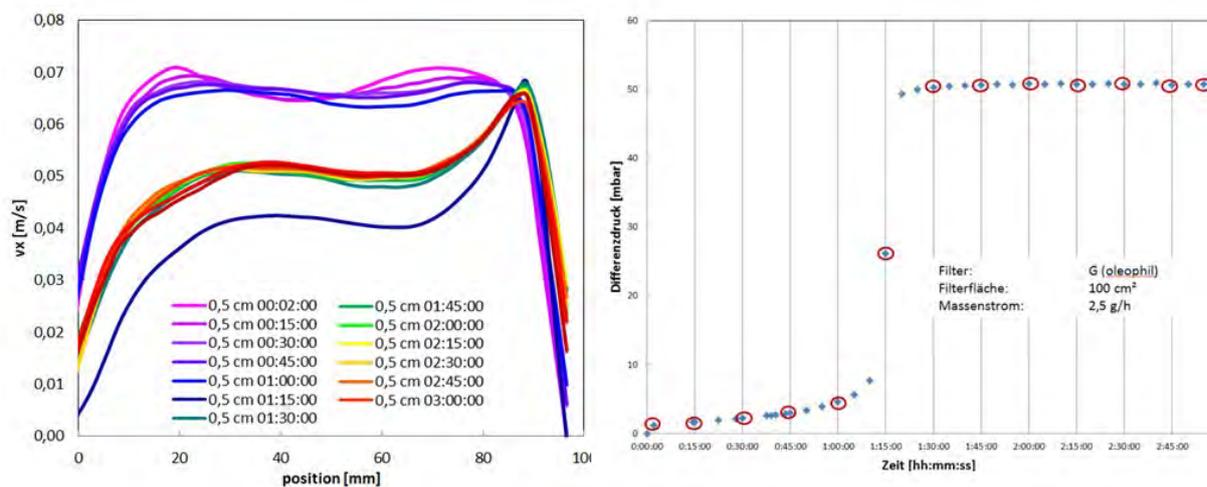


Abbildung 31: (links) Geschwindigkeitsprofile der vx-Komponente von einem oleophilen Filter bei verschiedenen Sättigungszuständen des Filters (rechts) Zugehöriger Differenzdruck, zeitgleich zu jeder rot markierten Differenzdruckmessung wurde ein Geschwindigkeitsprofil gemessen.

Oleophobe Filter zeigen ähnliche Charakteristik der Strömungsprofile. Der Sprung des Druckverlustanstiegs und die Verschiebung der Strömungsprofile zu größeren Geschwindigkeiten im oberen Bereich der Filter setzt allerdings schon bei weniger als der Hälfte der Massenbelastung an Öl ein. Nur bei Untersuchungen der Filter mit zusätzlicher Drainageschicht zeigte sich eine Änderung der Charakteristik: Das Strömungsprofil ist sowohl unten als auch oben am Filter zu höheren Strömungsgeschwindigkeiten verschoben. Demnach werden Filter mit Drainagemedium homogener gesättigt.

1.8.2 Arbeiten des IUTA:

Ein bis fünf-lagige, oleophobe bzw. -phile Filtermedienstapel wurden jeweils bis zum Erreichen eines annähernd konstanten Differenzdrucks mit Shell Corena Ölaerosol beaufschlagt. Dieser Zeitpunkt stellt im beobachteten Zeitfenster die Sättigung des Medienstapels dar. Eine abströmseitige Drainage des Öls beginnt. Durch Wiegen der Medien vor Einbau und nach Versuchsende wurde die durchschnittliche Sättigung der einzelnen Medien und durch Ausstanzen von Roden an Punkten entlang der Senkrechten zusätzlich die lokale Sättigung bestimmt. Unter den verwendeten Versuchsbedingungen ($v_{an}=0,2 \text{ m s}^{-1}$) wurde eine maximale Sättigung zwischen 30 bis 40 % erreicht, die gut mit ähnlichen Untersuchungen aus der Literatur [8] übereinstimmte. Der Verlauf der Sättigung in Abhängigkeit vom Filtermedium war allerdings stark von dessen Benetzungsverhalten und strukturellen Dichte abhängig. Selbst Medien der gleichen Benetzungskategorie zeigten noch deutlich unterschiedliche Verläufe. Erste im Projekt durchgeführte Berechnungen des Sättigungsverhaltens von oleophilen Filtermedien deuten auf die Ausbildung einer gleichmäßigen Sättigung über das gesamte Medium hin. Eine theoretische Betrachtung offenbart keinen physikalisch-mechanistischen Grund der gegen dieses Ergebnis spricht. Tatsächlich waren die experimentellen Ergebnisse aber von einer homogenen, gleichmäßigen Sättigung über alle Filterlagen weit entfernt. Dies lässt sich nur dadurch erklären, dass die Ausbildung einer homogenen Sättigung ein sehr langsamer Prozess ist, der im untersuchten Zeitfenster noch nicht abgeschlossen war. Eine Publikation von Kolb et al. [9] spricht von einem Kriechphänomen, das zu einem langsamen Anstieg der Sättigung insbesondere bei oleophoben Medien führt und die dargestellte Erklärung unterstützt.

1.8.2.1 Untersuchungen zur Sättigung der Filtermedien

Die Sättigung ist als der Prozentsatz des freien Volumens eines Filtermediums definiert, der mit Flüssigkeit (Öl) gefüllt ist:

$$S = \frac{V_{\text{Öl}}}{V_{\text{frei}}} = \frac{\frac{m_{\text{Öl}}}{\rho_{\text{Öl}}}}{V_{\text{Filter}} - V_{\text{Glas}}} = \frac{(m_s - m_{tr})}{V_{\text{Filter}} - \frac{m_{tr}}{\rho_{\text{Glas}}}} \quad (11)$$

(*S*: Sättigung, $V_{\text{Öl}}$: Öl gefülltes Volumen, V_{frei} : ölfreies Volumen, V_{Filter} : Gesamtvolumen, V_{Glas} : Glasfaservolumen, $\rho_{\text{Öl}}$: Dichte des Öls, ρ_{Glas} : Dichte Glas, $m_{\text{Öl}}$: Masse des Öls, m_s : Masse des gesättigten Mediums, m_{tr} : Trockenmasse des Mediums)

Betrachtet man die Gesamtsättigung der bei konstantem Volumenstrom getesteten Medien, so fällt auf, dass diese mit dem Druckverlust (Δp_0) im öl-freien Zustand zusammenhängen. Teilt man die Medien aus Tabelle 6 in dichte ($\Delta p_0 > 5 \text{ mbar}$) und weniger dichte Medien ($\Delta p_0 < 5 \text{ mbar}$) ein, so haben erstere eine geringere Sättigung von ca. 30% und letztere eine um ca. 10 % höhere um 40%. Ein höherer Luftwiderstand verursacht ein höheres Δp_0 . Da die Packungsdichte (Tabelle 3) der reinen Glasfasermedien aber recht ähnlich ist, werden die Unterschiede in Δp_0 durch Variationen in der Faserdurchmesser-Verteilung verursacht. Dichtere Medien sollten einen höheren Anteil an feinen Fasern besitzen. Diese Erwartung wird durch die REM-Untersuchung bestätigt. Eine Bestimmung der Durchmesser-Verteilung war allerdings aufgrund der Länge der Fasern und der Dicke der Medien nicht möglich.

Tabelle 6: Gesamtsättigung eines getesteten Mediums, sowie Δp_0 (60 cm^2 , $Q=4,01 \text{ m}^3/\text{h}$)

Medium	Gesamtsättigung, 1-lagig bei $Q = 4,01 \text{ m}^3/\text{h}$	Druckverlust (trocken) (Δp_0) bei $Q = 4,01 \text{ m}^3/\text{h}$ [mbar]
A	~ 35%	3,4
E	~ 33%	3,2
F	~ 43%	2,0
G	~ 43%	3,5
DF1	~ 36%	3,6
DF2	~ 31%	5,1
DF3	~ 36%	10,5
DF4	~ 27%	14,6
DF5	~ 46%	3,9
DF6	~ 40%	2,5
163V	~ 45%	2,1
164V	~ 37%	2,3

Neben der Abhängigkeit der Sättigung von der Dichte des Mediums hat der anliegende Volumenstrom mit einer damit einhergehenden Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit einen deutlichen Einfluss auf den Ölgehalt. Höhere Anströmgeschwindigkeiten führen zu einer Verringerung des Ölgehalts im Filter (Abbildung 32, oben). Im beobachteten Bereich gibt es keinen wesentlichen Einfluss des Massenflusses auf die Sättigung. Diese Beobachtung bestätigt die Ergebnisse von Kolb et al. aus dem Jahre 2017 [9], der ebenfalls eine Abhängigkeit der Sättigung von der Anströmgeschwindigkeit gefunden hat. Gleichzeitig beschreibt er eine annähernde Unabhängigkeit der sich einstellenden Differenzdrücke von der Anströmgeschwindigkeit. Weder der Druckanstieg in der Kanalphase noch der starke Druckanstieg während der Filmbildung auf der Abströmseite sollen von der Anströmgeschwindigkeit beeinflusst werden. Dieser Befund deckt sich größtenteils mit unseren Daten. Während der Sprunganteil weitgehend unverändert bleibt, ist eine Abhängigkeit der Differenzdruckkurve von der Anströmgeschwindigkeit während der Kanalphase allerdings nicht ganz auszuschließen, s. Abbildung 32, wie die Verteilung der Differenzdrücke ($\Delta p_{(\text{Kanal})} - \Delta p_0$) bei unterschiedlichen Massenflüssen zeigt.

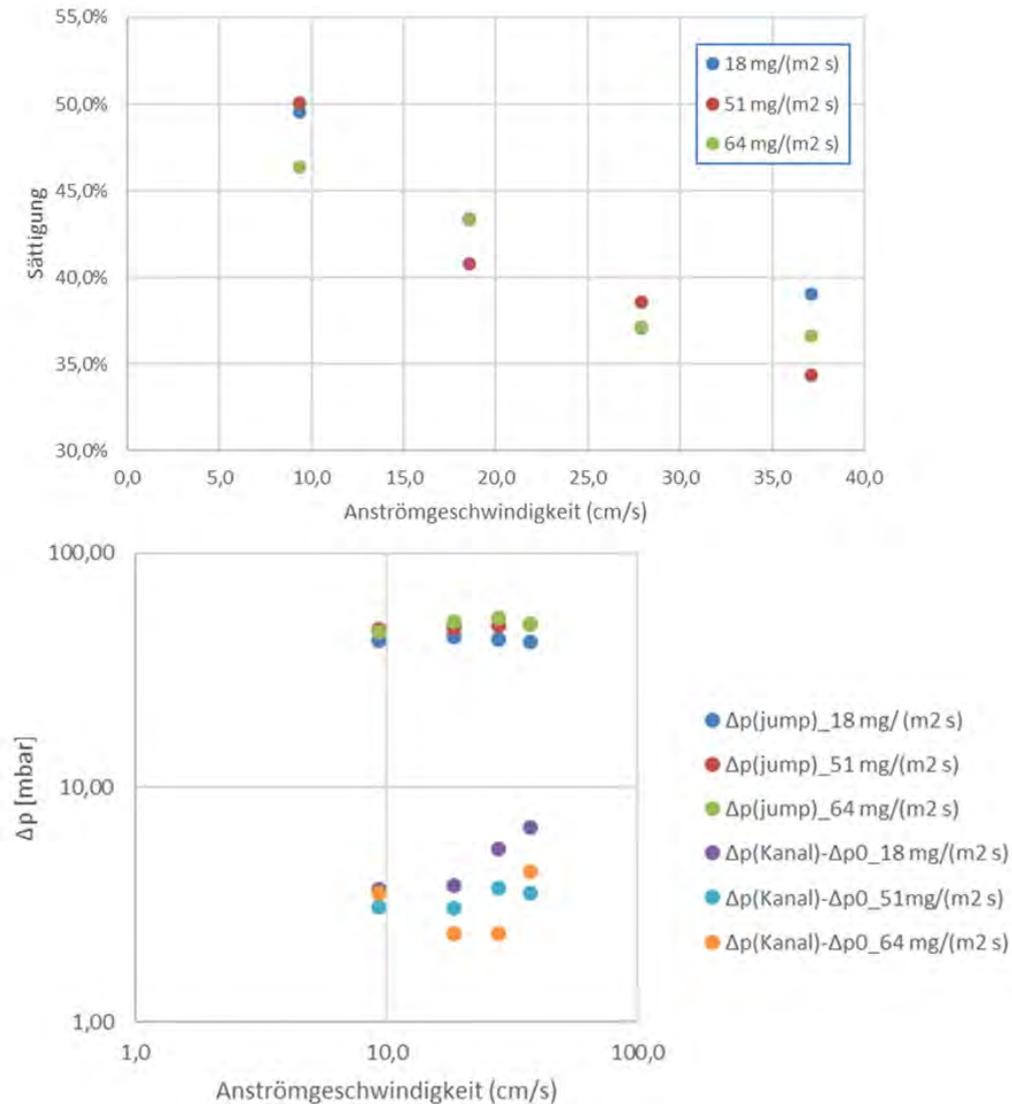


Abb. 32: (oben) Sättigung von Medium G bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten und drei verschiedenen Massenflüssen, (unten) Differenzdruck in der Kanal- und Filmbildungsphase bei Medium G bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten und drei unterschiedlichen Massenflüssen

Wie Abbildung 32 verdeutlicht, nimmt die Sättigung des Filtermediums mit steigender Anströmgeschwindigkeit ab. Eine größere Kraft wirkt auf eingetragenes Öl, dieses kann sich schlechter im Gewebe einlagern, die Sättigung sinkt.

Die lokale Sättigung der Filtermedien wurde an Einzelmedien und an Medienstapeln bestimmt. Dazu wurden Ronden definierter Größe aus dem eingesetzten Filtermaterial gestanzt, deren Masse bestimmt, diese dann mit Hexan vom Öl befreit, getrocknet und das Leergewicht ermittelt. Die Sättigung wurde nach Formel (11) bestimmt.

Da die Glasfasermedien immer mit zwei unterschiedlichen Phasen, Öl und Luft, durchströmt werden, kann der Raum um die Glasfasern nur zu einem gewissen Prozentsatz mit Öl gefüllt sein. Bei den Untersuchungen, stellte sich beim Eintritt in den quasi-stationären Zustand ein Sättigungsprofil über den jeweiligen Medienstapel ein, das primär von den Oberflächeneigenschaften des Mediums abhing. Anders als Kampa et. al. [8] wurde keine

eindeutige Unterteilung in einen oleophoben und einen oleophilen Typ gefunden (Abbildung 34). Desweiteren zeigen Berechnungen des Projektpartners TU Dortmund an oleophilen Medien, dass die gefundenen Verteilungsprofile eine Momentaufnahme sind bzw. durch den Grenzbereich zwischen den einzelnen Medienlagen wesentlich beeinflusst werden. Die Untersuchungen mit gefärbtem Öl in Kapitel 1.4.3.2. deuten ebenfalls darauf hin, dass die Grenzfläche zwischen zwei Medien im Stapel ein Hindernis darstellt, dass zu einer Umverteilung des Öls führt und dadurch die lokale Sättigung mitbeeinflusst wird. Andererseits wird die lokale Sättigung in Längsrichtung entlang eines Mediums im Falle der kurzen Halterung auf der Länge von 10 cm nicht beeinflusst. Ronden aus unterschiedlicher Höhe zeigen identische Sättigung (Abbildung 33 A).

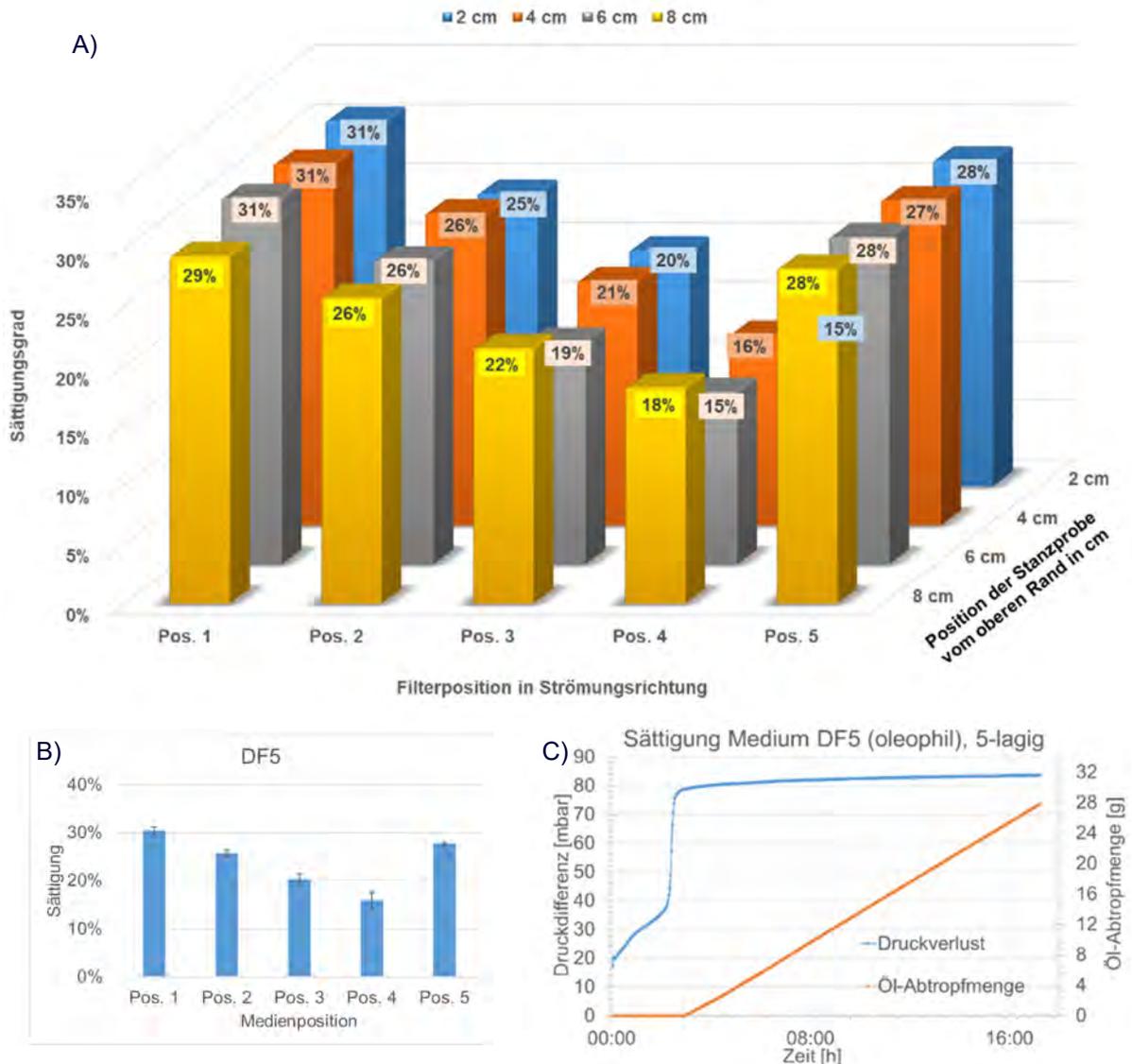


Abb. 33: A) Sättigungsexperiment an Medium DF5 (oleophil), 5-lagig; B) gemittelt über ein Filter - DF5; C) Entwicklung des Differenzdrucks über 16 h

Daher kann bei der Betrachtung der Unterschiede im Sättigungsprofil der Medienstapel der jeweilige Mittelwert des Einzelmediums an Pos. x herangezogen werden. Unter identischen Bedingungen durchgeführte Bestimmungen des Sättigungsprofils zeigen für die oleophoben Medien DF1, DF3 und F deutlich unterschiedliches Sättigungsverhalten (Abbildung 34). Gleichzeitig zeigen diese Medien ein unterschiedliches Durchdringungsverhalten für Öl. Während F anfangs wenige, große ovale Bereiche ausbildet, die eine deutlich höhere Sättigung als die Umgebung aufweisen, bildet sich bei DF1 ein Muster stärker gesättigter Bereiche aus, die untereinander verbunden sind. Bei DF3 dringt das Öl tröpfchenweise durch viele kleinere Poren durch das Medium. Erst beim Abstellen des Volumenstroms findet eine verstärkte Sättigung mit Öl um diese Durchdringungspunkte statt (Abbildung 7). Dieses Verhalten ist von Öl, das sich beim Abschalten noch auf der Oberfläche befindet, abhängig. DF3 zeigt eine höhere Sättigung auf dem ersten rohgasseitigen Medium, dann eine deutlich geringere bei den inneren Medien und durch das beschriebene Verhalten eine erneut höhere Sättigung beim äußersten Medium. DF3 zeigt das nach Kampa et al [8] typische Verhalten für oleophobe Medien. DF1, das anströmseitig einen ähnlich hohen Kontaktwinkel wie DF3 besitzt, abströmseitig mit einem Benetzungswinkel von 71° aber weniger oleophob als dieses ist (125°), zeigt dagegen ein deutlich abweichendes Verhalten mit einer nur anströmseitig erhöhten Sättigung.

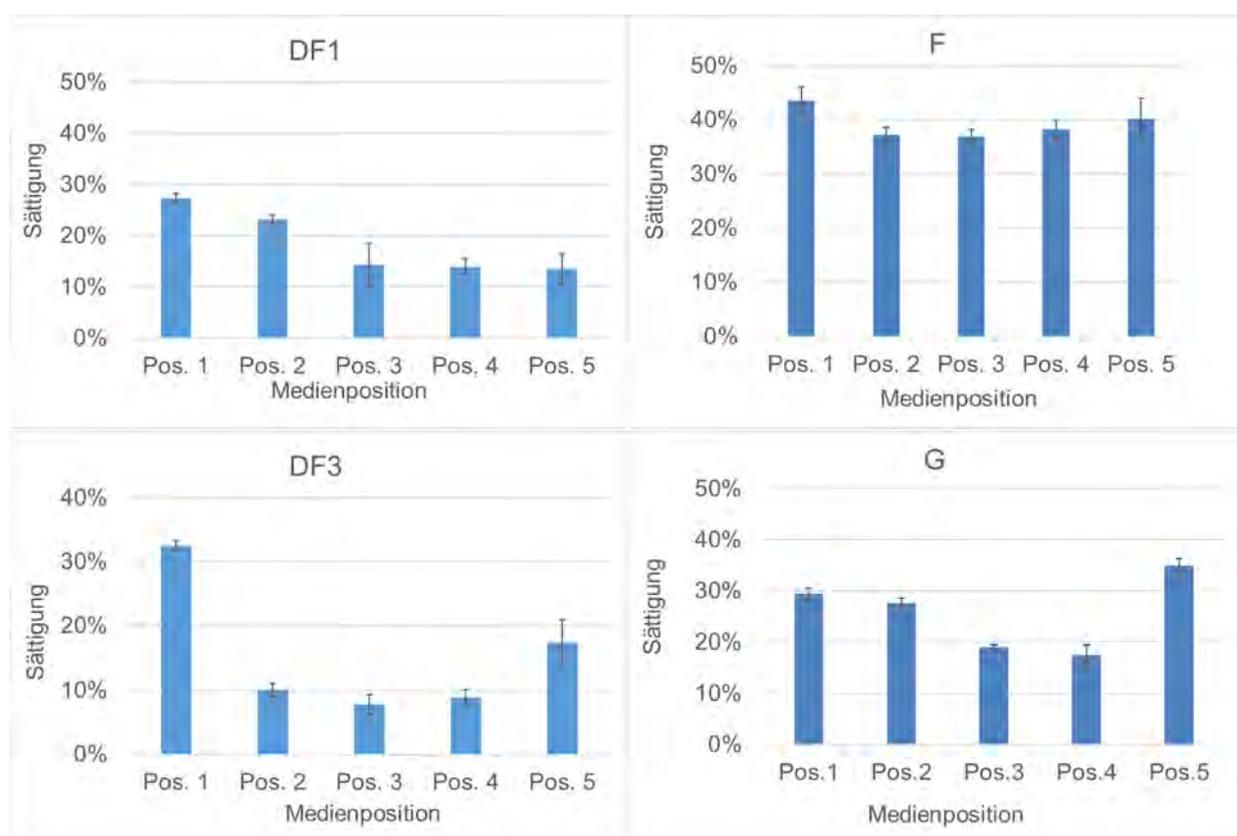


Abb. 34: Sättigungsprofile 5-lagiger Medienstapel nach dem Eintritt in den quasi-stationären Zustand der Ölbeladung: oleophob:DF1, DF3, F; oleophil: G (Pos.1 nach 5: Rohgas nach Reingas)

Insgesamt zeigt die Untersuchung zur lokalen Sättigung am fünf-lagigem Stapel keine Abhängigkeit von der Mediendichte wie das bei der Gesamtsättigung am einlagigen Filtermedium der Fall war. Dies unterstützt die Vermutung, dass die Grenzfläche zwischen den Medien einen großen Einfluss auf das Experiment ausübt.

1.8.2.2 Einfluss der Gravitation auf die Sättigung und Drainage

Unter Verwendung des langen Filtermedienhalters wurden Sättigungsexperimente an Medium G und E wiederholt (Abbildung 35).

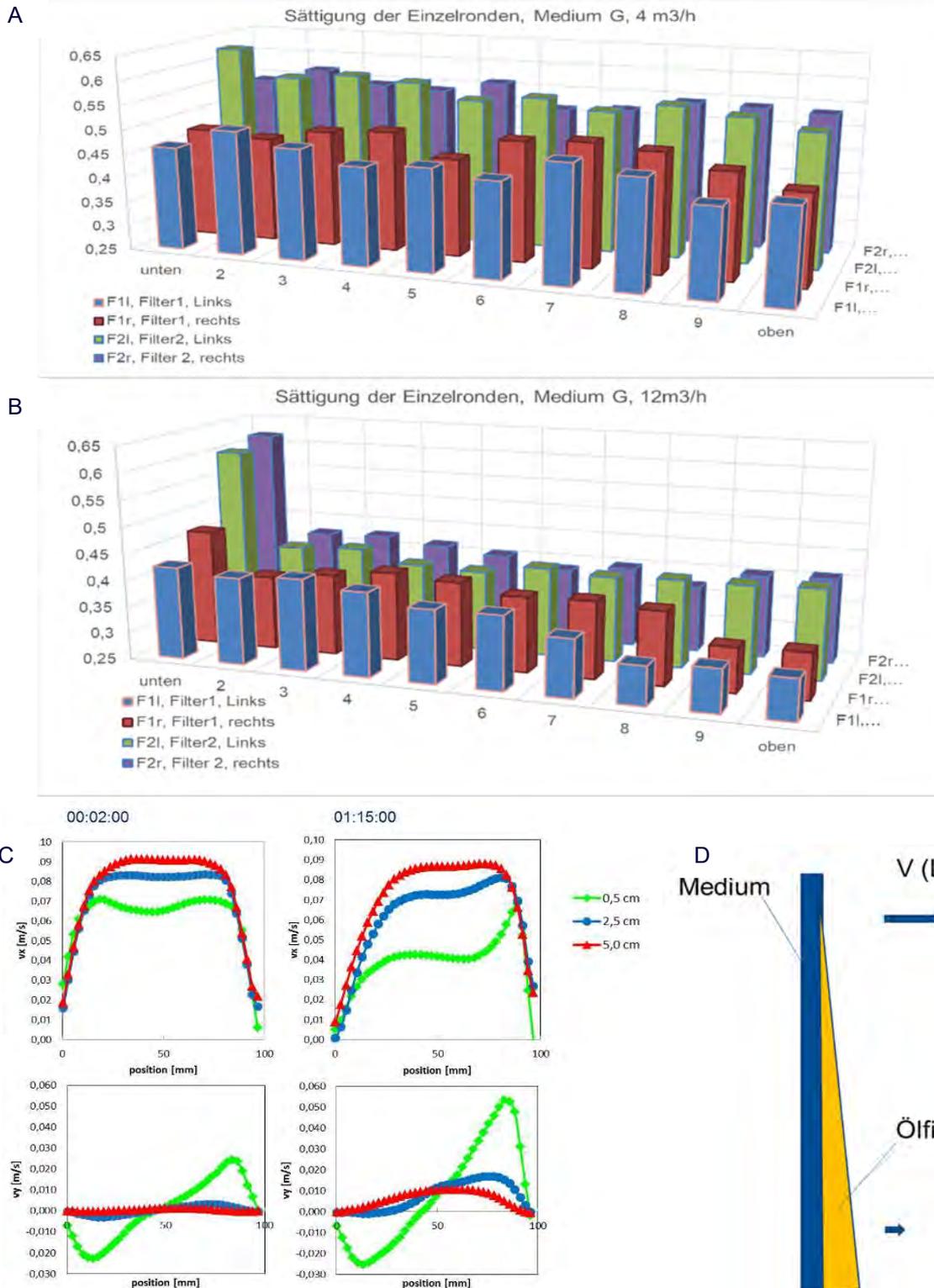


Abb. 35: Sättigung von Medium G (2-lagig (F1 (Rohgas) und F2(Reingas)), 2 Ronden pro Höhenbereich (l und r) bei einem Volumenstrom von A) 4m³/h und B) 12m³/h; C) zeigt ein mit PIV (ZBT) aufgenommenes Strömungsprofil von Ölaerosolpartikeln vor dem Filter bei zwei unterschiedlichen Sättigungszuständen; D) Schematische Darstellung des drainierenden Öls und des Luftstroms bei hoher Anströmgeschwindigkeit

Anders als mit dem kurzen Halter sollte hier eher ein Einfluss der Bauhöhe auf die lokale Sättigung des Medienstapels beobachtet werden können. Ein Volumenstrom von 12 m³/h resultiert in der gleichen Anströmgeschwindigkeit wie 4 m³/h am kurzen Filterhalter. Ein Volumenstrom von 4 m³/h führt am langen Filterhalter dagegen zu einer geringeren Anströmgeschwindigkeit. Bei dieser stellt sich, wie erwartet, eine höhere lokale Sättigung beim oleophilen Medium G ein. Insbesondere das abströmseitige Medium ist aufgrund der dortigen

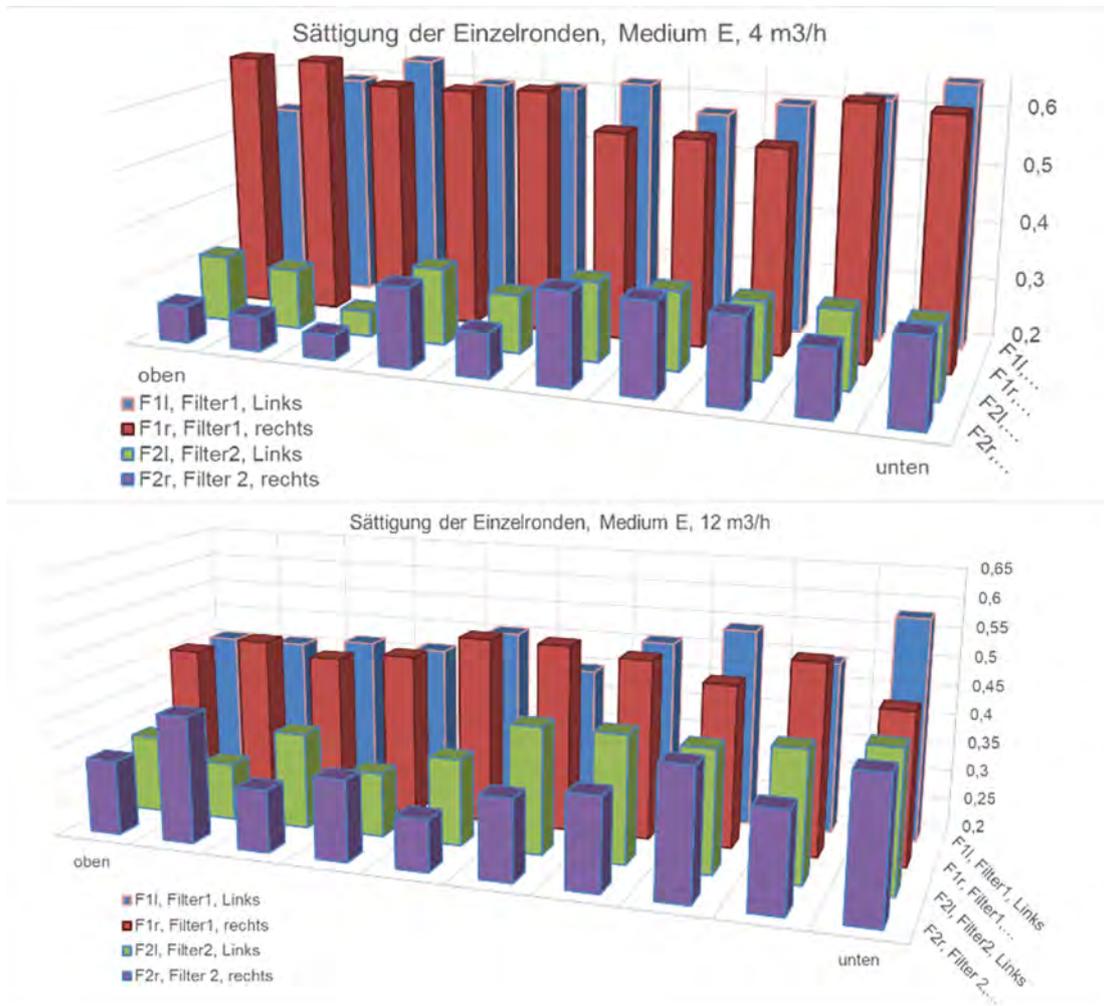


Abb. 36: Sättigungsexperiment an Medium E (2-lagig(F1(Rohgas) und F2 (Reingas)), 2 Ronden pro Höhenbereich (l und r)) bei zwei verschiedenen Volumenströmen, oben 4 m³/h, unten 12 m³/h

Filmbildung durch das drainierende Öl stärker mit Öl gefüllt. Insgesamt ist in der lokalen Ölverteilung bei diesem Test keine Tendenz in der Verteilung entlang der Länge des Mediums zu erkennen. Anders stellt sich die Situation bei der höheren Anströmgeschwindigkeit dar. Hier liegen beide Medien in ihrer Sättigung näher zusammen. Diese spricht für einen dünneren Drainagefilm auf dem äußeren Medium, was zu der geringeren Ölbeladung (Tabelle 7) passt. Für Medium E stellen sich ähnliche, allerdings inverse Verhältnisse ein. Da es sich um ein oleophobes Medium handelt, ist aufgrund der Filmbildung auf der Anströmseite, das erste Medium bei geringer Anströmgeschwindigkeit stärker gesättigt als das zweite. Bei Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit passt sich die Sättigung beider Medien erneut aneinander an. Vom Projektpartner ZBT wurden mittels Particle Image Velocity (PIV) Untersuchungen zur Bewegungsgeschwindigkeit der Partikel in der Nähe der Filteroberfläche durchgeführt. Hierbei

wurde entlang der Drainagerichtung bzw. x-Richtung die Geschwindigkeit der Aerosoltröpfchen untersucht (Abb. 35 C)) und eine Höhenabhängigkeit entdeckt. Diese lässt sich durch die in Abb. 35 D) dargestellten Verhältnisse erklären. Geht man von einem dickeren Öldrainagefilm im unteren Teil des Filters aus, so sollte sich hier ein höherer Gegendruck einstellen, der wiederum zu einer Reduktion der Luftströmung in diesem Bereich führt. Eine geringere Luftströmung bedeutet geringeren Öltransport und höhere Sättigung. Umgekehrt sollte eine höhere, lokale Anströmgeschwindigkeit im oberen Teil auch zu einer geringeren Sättigung führen. Die im PIV beobachteten Geschwindigkeiten zeigen keine homogene Zunahme entgegen der Drainagerichtung, sondern im oberen Drittel ein Maximum nach einer Plateauphase. Betrachtet man das Sättigungsprofil von Medium G nach dem Test im langen Filterhalter so findet sich hier eine Abnahme der Sättigung im anströmseitigen Medium an den Positionen 8 und 9 im oberen Drittel (Abb. 35 B)). Ähnliches aber weniger ausgeprägt findet sich auch bei den Tests mit Medium E, hier aber im zweiten, abströmseitigen Medium. Das jeweils andere Medium zeigt dieses Verhalten kaum (E) oder nicht (G). Eine Erklärung warum nur ein Medium eine Beeinflussung zeigt, konnte bisher nicht eindeutig ermittelt werden. Vermutlich hängt dieses Verhalten mit der Filmbildung auf den Medien zusammen. Während bei E eine anströmseitige Filmbildung erwartet wird, kommt es hier anscheinend zu einem geringen Querfluss entlang der Gravitationsrichtung, so dass nach Ende des Experiments geringfügig höherer Ölmengen in Form einer erhöhten Sättigung im unteren Teil des Filtermediums gefunden werden. Während beim abströmseitigen Medium G kein Effekt erkennbar ist, da dieser erst dann auftreten kann, wenn die Ölbeladung einen gewissen Grenzwert überschreitet. Vor dessen Überschreitung hängt die Dicke des sich ausbildenden Drainagefilms primär von der Viskosität und Oberflächenspannung des austretenden Öls ab und ist homogen. Nach Andan [7] soll sich das Dickenprofil des abströmseitigen Films nach Erreichen des Steady-States nicht mehr verändern. Die Dicke soll in Drainagerichtung zunehmen. Es ist geplant durch eine direkte Bestimmung der Dicke des Drainagefilms hier Klarheit zu schaffen.

Tabelle 7: Öl-Vernebelungsrate bei den Versuchen mit langem Filterhalter

Beladung bei	4 m ³ /h	12 m ³ /h
Medium G	1,4 g/h	1,3 g/h
Medium E	1,4 g/h	1,3 g/h

1.8.2.3 Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der Sättigung

Zur genaueren zeitlichen Entwicklung der Sättigung wurden Experimente mit Medium G durchgeführt, bei denen die Versuchszeit so gewählt wurde, dass die Beladung noch nicht abgeschlossen war. In Tabelle 8 ist der zeitliche Verlauf bis Ende der Kanalphase und das Resultat nach Ende der Kanalphase für ein einlagiges Medium angegeben. Bei Experiment 4, Ende der Kanalphase, liegt bereits eine 24%ige Sättigung vor. Der Großteil des bis zur Endsättigung noch hinzukommenden Öls wird durch den bei Versuche aufgesogenen Drainagefilm erzeugt. Damit lässt sich grob die Masse des Drainagefilms mit 0,7 g bestimmen.

Tabelle 8: Teilbelastung von Medium G ($v_{an} = 0,2 \text{ m/s}$)

	Sättigung des Mediums	Ölmassenstrom	Ölmassenfluss	Ölmasse im Filter	Versuchszeit	
		[g/h]	[mg/m ² s]	[g]	[h]	
Experiment 1	6%	0,7	34	0,25	0,34	
Experiment 2	13%	1,2	53	0,52	0,69	
Experiment 3	17%	0,9	41	0,88	1,00	
Experiment 4	24%	1,1	52	1,00	1,35	Ende Kanalphase
Steady-State (1-lagig)	42%	1,3	62	1,73	15,84	Mit Drainagefilm

1.9 Arbeitspaket 9: Ermittlung von Korrelationen zu Durchfluss und Druckwiderstand: Erarbeitung von entsprechenden Modellen für klassische CFD-Verfahren (Makroskala) (LSM)

Wie einleitend im Arbeitspaket 5 erwähnt, wurde ein Euler-Euler Verfahren zur Modellierung und zweidimensionalen Berechnung der makroskopischen Eigenschaften eines mehrphasig durchströmten Filters in Ansys CFX verwendet. Beim Euler-Euler Verfahren werden die verschiedenen fluiden Phasen als ein einziges, sich durchdringendes Kontinuum betrachtet. Da das von einer Phase besetzte Volumen nicht von einer anderen Phase besetzt werden kann, wird der Volumenanteil α eingeführt. Diese Volumenanteile werden in Raum und Zeit als kontinuierliche Funktionen angenommen, wobei die Summe der Anteile immer eins ist. Die Erhaltungsgleichungen werden für jede Phase aufgestellt.

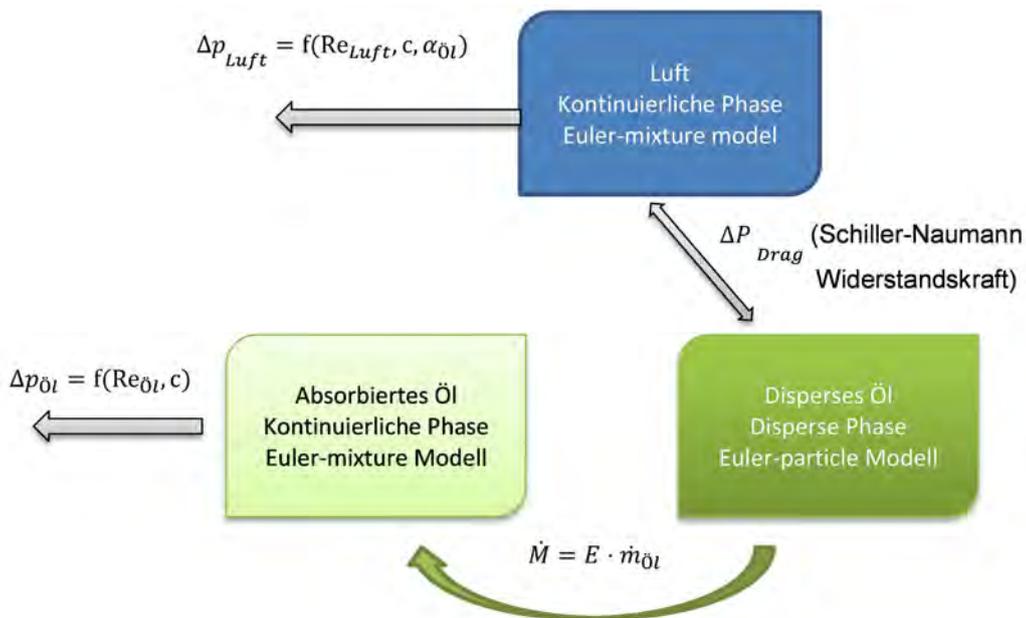


Abb. 37: Modellübersicht

Dadurch ergibt sich ein Gleichungssystem, wobei die Gleichungen der einzelnen Phasen jeweils eine ähnliche Struktur aufweisen. In der Simulation werden drei Phasen verwendet: Luft (kontinuierliche Phase), Ölpartikel (disperse Phase) und absorbiertes Öl (kontinuierliche Phase). Die Luft und Ölpartikel betreten den Filter durch die Eintrittsfläche und strömen durch den Filter. Die auf den Fasern abgeschiedenen Ölpartikel werden als Massentransfer vom dispersen zum absorbierten Öl modelliert.

Ansys CFX löst die Kontinuitätsgleichung (Gl.1) und die Navier-Stokes Gleichung (Gl.2) für jede vorliegende Phase unter Berücksichtigung des Volumenanteils α_i (Gl.4), wobei i die jeweilige Phase bezeichnet. In dieser Untersuchung wird das Problem skaliert behandelt. Als charakteristische Größen werden die Eintrittsgeschwindigkeit der Luft u_0 und die makroskopische Dicke des Filters L verwendet:

$$\nabla \cdot (\alpha_i Re_i \vec{v}^*) = \dot{M}, \quad (1)$$

$$Re_i(\alpha_i(\vec{v}^* \cdot \nabla^*) \cdot \vec{v}^*) = -\nabla^* p^* \alpha_i + \Delta^* \vec{v}^* \alpha_i + \vec{S}^*, \quad (2)$$

$$(x^*, y^*, z^*) = \frac{(x, y, z)}{L}, \quad \vec{v}^* = \frac{(u, v, w)}{u_0}, \quad p^* = \frac{p L}{\mu_{Luft} u_0}, \quad (3)$$

$$Re_i = \frac{\rho_i u_0 L}{\mu_{Luft}}, \quad \vec{S}^* = -\frac{\nabla p^* \vec{v}^*}{d_f^2 / L^2}.$$

$$\Sigma \alpha_i = 1 \quad (4)$$

Eine zweidimensionale Simulation eines makroskopischen Filtermediums wird durchgeführt. Das gesamte Berechnungsgebiet wird als poröses Medium definiert (Filter mit durchgekreuzter Fläche in Abb. 38), mit der Porosität $\varepsilon=0,946$. Diese entspricht der des im Experiment verwendeten Filters G. Außerhalb des Filters gilt $\varepsilon=1$. Im Filter wirkt auf die Phasen Luft und absorbiertes Öl die in Arbeitspaket 5 eingeführte Impulsenke \vec{S}^* . Ein Gemisch aus Luft und dispersem Öl betritt am Eingang (inlet) das Berechnungsgebiet ($\alpha_{Luft} = 0,9995, \alpha_{\text{Öl}} = 0,0005$), was einer deutlich größeren Ölbeladung als im Experiment ($\alpha_{\text{Öl}} \approx 10^{-7}$) entspricht. Aufgrund beschränkter numerischer Genauigkeit kann eine Ölbeladung von ($\alpha_{\text{Öl}} \approx 10^{-7}$) nicht verwendet werden. Die Ölbeladung wurde durch Anpassung der Endsättigung an die experimentellen Werte bestimmt.

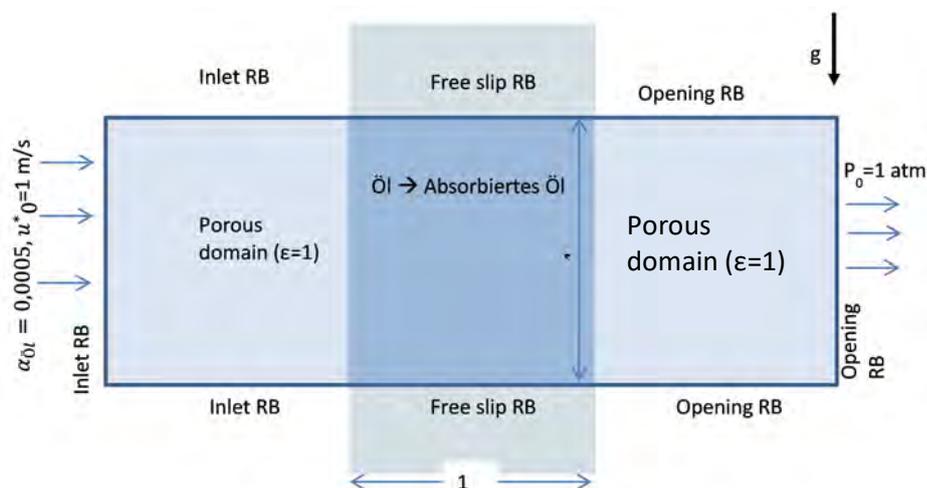


Abb. 38: Domain und Randbedingungen

1.9.1 Ergebnisse des stationären Zustandes

Zunächst wird der Druckverlust des Filters ohne Ölbeladung für verschiedene Luftgeschwindigkeiten simuliert und mit experimentellen Ergebnissen des IUTA in Abb. 39 gegenübergestellt. Die Simulationsergebnisse stimmen gut mit den experimentell ermittelten Werten überein, wobei die Abweichungen mit größeren Geschwindigkeiten steigen.

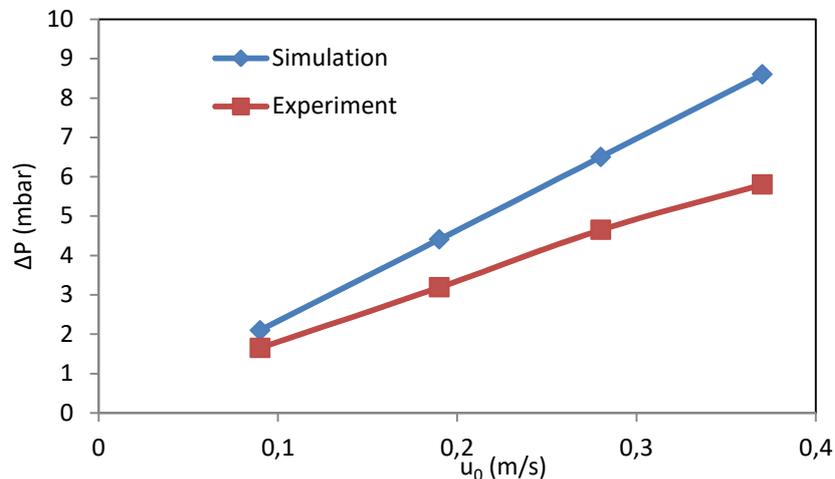


Abb. 39: Druckverlust in Abhängigkeit von u_0

Anschließend werden Simulationen zur Ermittlung des stationären Zustandes durchgeführt, bei denen die einströmende Luft mit Öl beladen ist. Das Verhalten des gesamten Filters bei ölbeladener Luft wird für ein Beispiel diskutiert. Die Luft strömt mit einer Geschwindigkeit von $u_0 = 0,09$ m/s mit einem Ölvolumenanteil von 0,05 % im Inlet ein. Die Dicke des Filters beträgt $L = 0,6$ mm. In Abb. 40 ist der Volumenanteil des im Filter absorbierten Öls dargestellt. Der Volumenanteil des absorbierten Öls steigt entlang der Filterdicke. Nach Verlassen des Filters fließt das Öl aufgrund der Gewichtskraft nach unten. Durch das Euler-Euler Verfahren wird der Volumenanteil des Öls außerhalb des Filters verschmiert, was zu einem dickeren Ölfilm am Filterausgang mit einem Volumenanteil $\alpha_{\text{öl}} < 1$ führt.

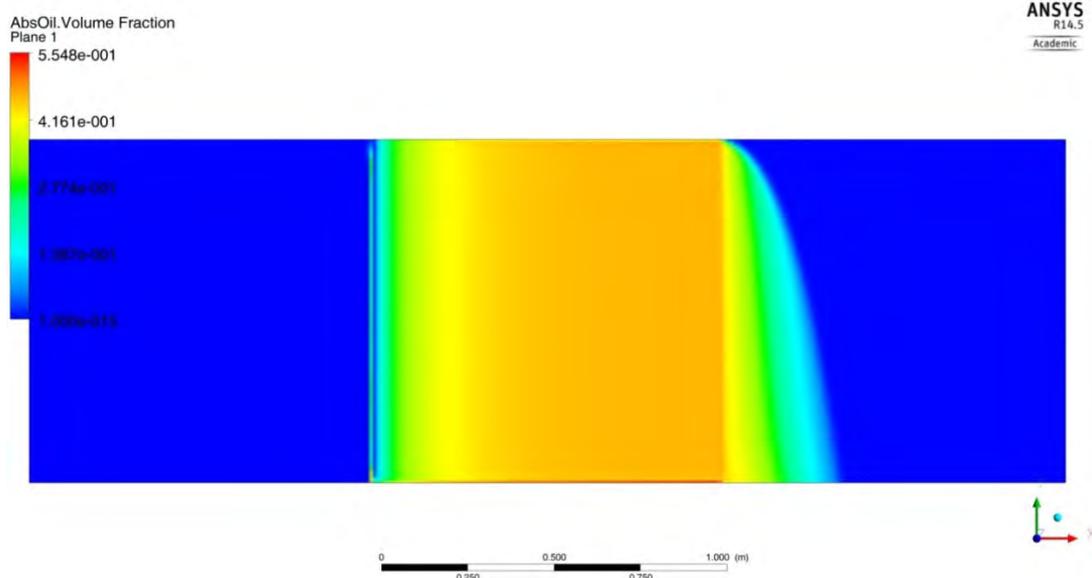


Abbildung 40: Volumenanteil des absorbierten Öls

Der berechnete entdimensionierte Druckverlust Δp_{ges}^* ist in Abb. 41 dargestellt und zeigt im Filter einen linearen Druckabfall. Abb. 42 und Abb. 43 zeigen den Volumenanteil des dispersen und absorbierten Öls über die Filterlänge. Das dispers vorliegende Öl wird im Filter vollständig absorbiert. Der Volumenanteil des dispersen Öls sinkt exponentiell und der Anteil des absorbierten Öls steigt gegenläufig exponentiell an.

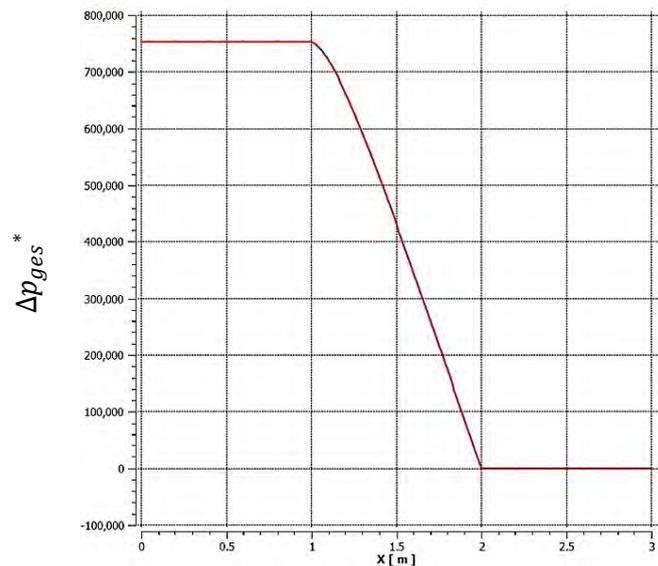


Abb. 41: Entdimensionierter Druckverlust Δp_{ges}^* entlang des Filters

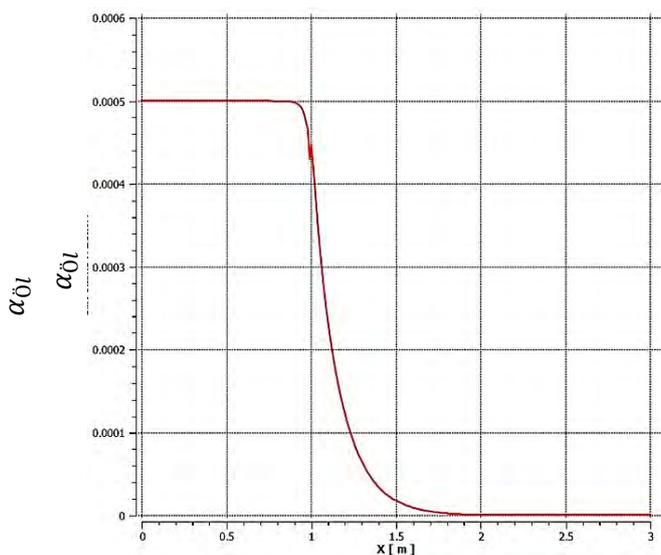


Abb. 42: Volumenanteil des dispersen Öls entlang des Filters

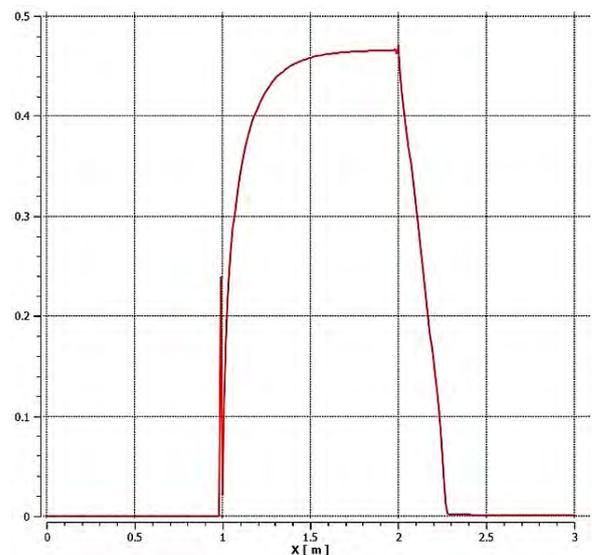


Abb. 43: Volumenanteil des absorbierten Öls entlang des Filters

Um das numerische Modell zu validieren, werden verschiedene Parametervariationen durchgeführt. Experimentelle Ergebnisse der Sättigung des Filters in Abhängigkeit der Ölbeladung werden in Abb. 44 für verschiedene Einströmgeschwindigkeiten u_0 dargestellt. Der zugehörige gesamte Druckabfall Δp_{ges} ist in Abb. 45 dargestellt. Anhand Abb. 44 ergibt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Sättigung und der Beladung $\alpha_{öl}$ oder der Einströmgeschwindigkeit u_0 . Abb. 45 zeigt einen klaren Trend, wonach eine Erhöhung der

Beladung $\alpha_{\text{öl}}$ oder der Einströmgeschwindigkeit u_0 zu einem größeren Gesamtdruckverlust Δp_{ges} führt.

Ähnliche Parameterstudien wurden auch in Simulationen auf der Makroskala durchgeführt. In Abb. 46 werden die berechneten Ergebnisse der Sättigung des Filters mit Öl in Abhängigkeit der Ölbeladung $\alpha_{\text{öl}}$ dargestellt. Mit einem Anstieg der Ölbeladung $\alpha_{\text{öl}}$ steigt auch die Sättigung des Filters S mit Öl, was auch in den Experimenten zu erwarten gewesen wäre. Abb. 47 zeigt den Druckverlust Δp_{ges} in Abhängigkeit der Ölbeladung im Eingangsstrom $\alpha_{\text{öl}}$. Es ergibt sich ein ähnlicher Trend wie in den Experimenten.

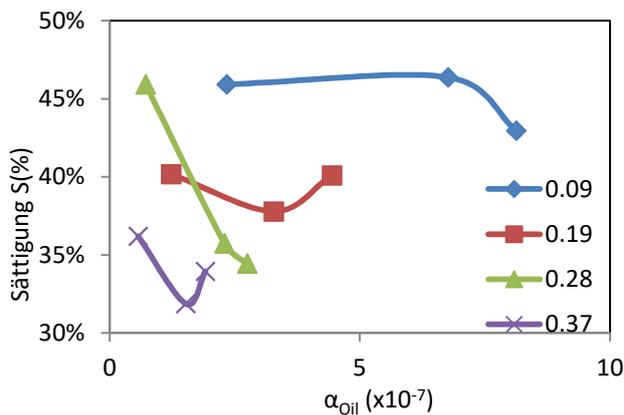


Abb. 44: Sättigung S vs Ölbeladung

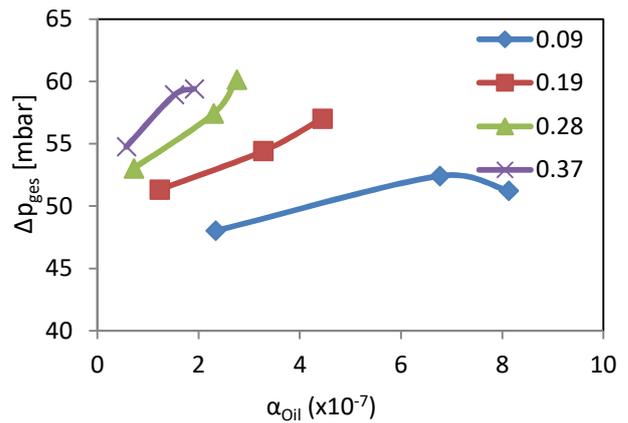


Abb. 45: Δp_{ges} vs Ölbeladung

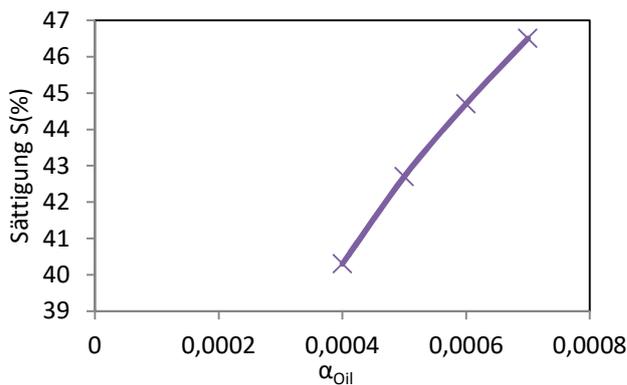


Abb. 46: Sättigung S vs Ölbeladung $\alpha_{\text{öl}}$

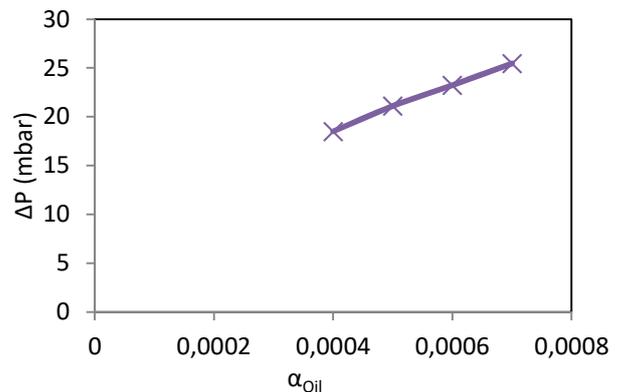


Abb. 47: Δp_{ges} vs Ölbeladung $\alpha_{\text{öl}}$

1.9.2 Ergebnisse des transienten Verlaufes

In diesem Abschnitt wird auf die transienten Vorgänge im Filter detailliert eingegangen. Experimente, die den zeitlichen Verlauf untersuchen, legen die Existenz dreier Abschnitte nahe: Eine anfängliche Sättigung (I), ein schneller Anstieg des Druckverlustes (II) dem sich der stationäre Zustand anschließt (III). Dieses Verhalten wird mit transienten Simulationen untersucht.

Abb. 48 zeigt den entdimensionierten Druckverlust Δp_{ges}^* in Abhängigkeit der entdimensionierten Zeit t^* . Auch anhand der Simulationsergebnisse lässt sich das transiente Verhalten des Druckverlustes Δp_{ges} in drei Abschnitte einteilen. Abb. 49 zeigt die zeitliche Entwicklung des Abscheidegrades E_{ges} und der Sättigung im Filter. Der Abscheidegrad E_{ges} beginnt bei dem Wert 0,7 und erhöht sich mit steigender Sättigung auf 0,9999.

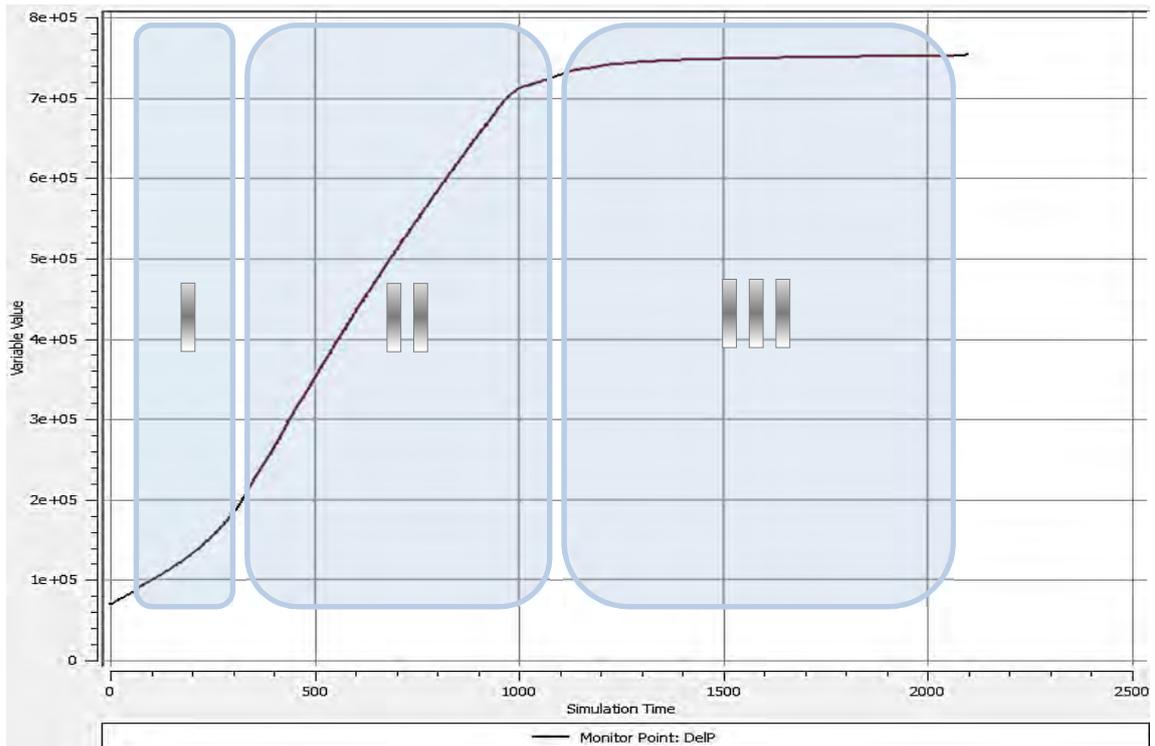


Abbildung 48: Entdimensionierter Druckverlust im Filter Δp_{ges}^* in Abhängigkeit von der entdimensionierten Zeit t^*

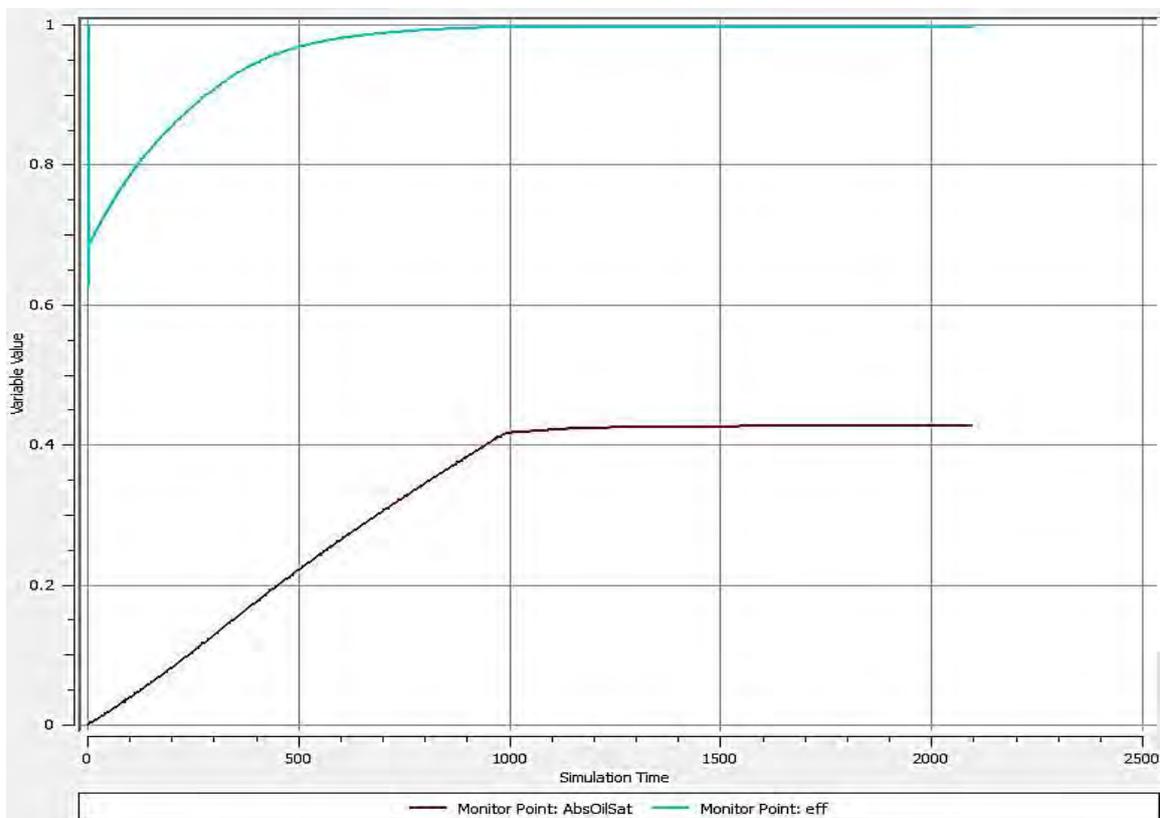


Abbildung 49: Abscheidegrad E_{ges} und Sättigung in Abhängigkeit von der entdimensionierten Zeit t^*

1.10 Arbeitspaket 10: Vermessung von Test-Filterstrukturen unter Realbedingungen im Filterteststand zur Ermittlung von Standzeiten, Druckverlusten, etc. (IUTA)

In Absprache mit den Projektpartnern wurde bei der Charakterisierung der Filter der Schwerpunkt auf die oleophilen Medien gelegt, da diese aus Sicht der Fluidodynamik den leichter zu beschreibenden Fall darstellen. Trotzdem wurde auch das Verhalten der weniger oleophilen Medien im Prüfstand unter Öllast untersucht. Während bei einlagigem Einbau die oleophilen Medien ein gleichmäßiges Drainieren des Öls nach Durchtritt durch das Medium und im Farbstoffdurchdringungstest eine allmähliche und eher gleichmäßige Farbvertiefung mit fortschreitender Testdauer zeigten, erfolgte die Drainage bei den oleophoben Medien anfangs stark punktuell und teilweise in Tropfen. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen bildete sich ein Muster mit stark gesättigten Bereichen aus, die sich langsam ausdehnen.

1.10.1 Einfluss von Volumenstromunterbrechungen auf die Sättigung

Bei Koaleszenzfiltermedien wird auch in der Sättigung und damit nach Erreichen eines Gleichgewichts zwischen eingetragendem Öl und abfließendem Öl eine zeitliche Veränderung des Differenzdrucks beobachtet, die insbesondere bei oleophoben Medien eine nicht zu vernachlässigende Größe sein kann. Dieses Phänomen, das Kolb et.al. [9] als „Creepage“ bezeichnet, wird im folgenden Kapitel näher untersucht.

Führt man Beladungsexperimente mit Glasfasermedien durch, deaktiviert den Volumenstrom nach Erreichen des „Steady-States“ und reaktiviert ihn anschließend wieder, so stellt sich heraus, dass der sich einstellende Differenzdruck verschieden vom ursprünglichen ist. Dabei hat insbesondere die erste Unterbrechung eine vergleichsweise große Differenzdruckzunahme zur Folge. Die Höhe der Zunahme ist von der Menge in Kontakt stehenden Öls, von der Länge der Unterbrechung und insbesondere von den Eigenschaften des Glasfasermediums abhängig. Der Einfluss des in Kontakt stehenden Öls beeinflusst hauptsächlich oleophile Medien. Da dieses Öl durch die Kapillarkräfte aufgesogen wird und beim erneuten Aktivieren des Luftstroms teilweise im Vlies verbleibt erhöht sich dadurch der Strömungswiderstand. Experimente mit einem vollständig gesättigten, oleophilen Medium bestätigten dies. Auch hier stellte sich ein deutlich höherer Sättigungsdifferenzdruck ein als bei einem Medium, das vom trockenen Zustand bis zur Sättigung mit Öl beaufschlagt wurde (Abbildung 50).

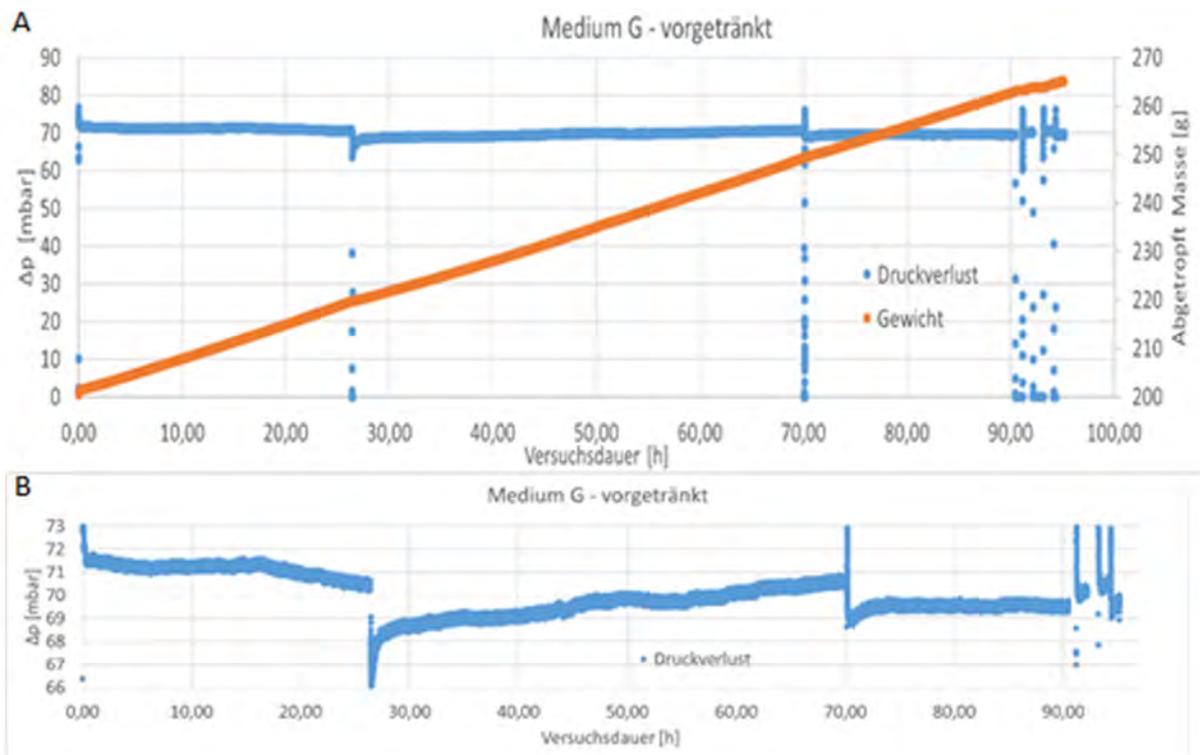


Abbildung 50: Zu Beginn vollständig durch tauchen gesättigtes Medium G im Betrieb: A:blau: Differenzdruck, rot: Abtropfende Ölmasse; B:Vergrößerte Differenzdruckkurve

Der Einfluss der Pausenlänge und –anzahl beeinflusst den Differenzdruck insbesondere bei dichten oleophoben Medien wie DF3. Sobald der Volumenstrom bei DF3 abgestellt wurde, kam es zu einer deutlichen Differenzdruckzunahme im nächsten Aktivierungsfenster. Während bei allen anderen getesteten Medien nur nach der ersten Volumenstromdeaktivierung eine starke Differenzdruckzunahme zu beobachten war, trat bei DF3 ein entsprechend hoher Sprung auch bei den nächsten beiden Deaktivierungen wie auch nach einer langen Unterbrechung erneut auf (Abbildung 51). Auch DF4 zeigt eine erneute starke Zunahme des Differenzdrucks nach einer langen Unterbrechung und in gegenüber DF3 abgeschwächter Form eine Zunahme des Differenzdrucksprungs nach mehreren Unterbrechungen (s. DF4, 1-lagig, Wdh.).

Nach Abstellen des Volumenstroms sind die vorherrschenden Kräfte, die für die Ölverteilung im Filtermedium verantwortlich sind, die Kapillarkräfte und abstoßende bzw. anziehende Wechselwirkungen mit den Oberflächen. Diese sorgen für eine Umverteilung des Öls. Es ist zu erwarten, dass in einem weniger dichten Medium dieser Prozess schneller abläuft als in einem dichten sofern es sich um ein oleophobes Medium handelt, während bei den oleophilen Medien umgekehrte Verhältnisse auftreten sollten.

Tatsächlich verhalten sich die weniger dichten Medien, unabhängig ob oleophob oder oleophil, in Bezug auf die Veränderung des Differenzdrucksprungs ähnlich. Die dichten Medien DF3 und DF4 zeigen untereinander einen ähnlichen Verlauf, der sich aber gegenüber dem der weniger dichten unterscheidet. Es scheint also zwei grundsätzlich unterschiedliche Verhaltenstypen zu geben. Allerdings zeigt, anders als erwartet, DF4 einen sehr geringen Anstieg pro Unterbrechung im Vergleich zu DF3. Mögliche Ursachen sind vermutlich die Oberflächeneigenschaften von DF3 oder auch die geringere Sättigung von DF4. Diese überraschenden Ergebnisse sind Ansatzpunkte für weitere, zukünftige Forschungsaktivitäten.

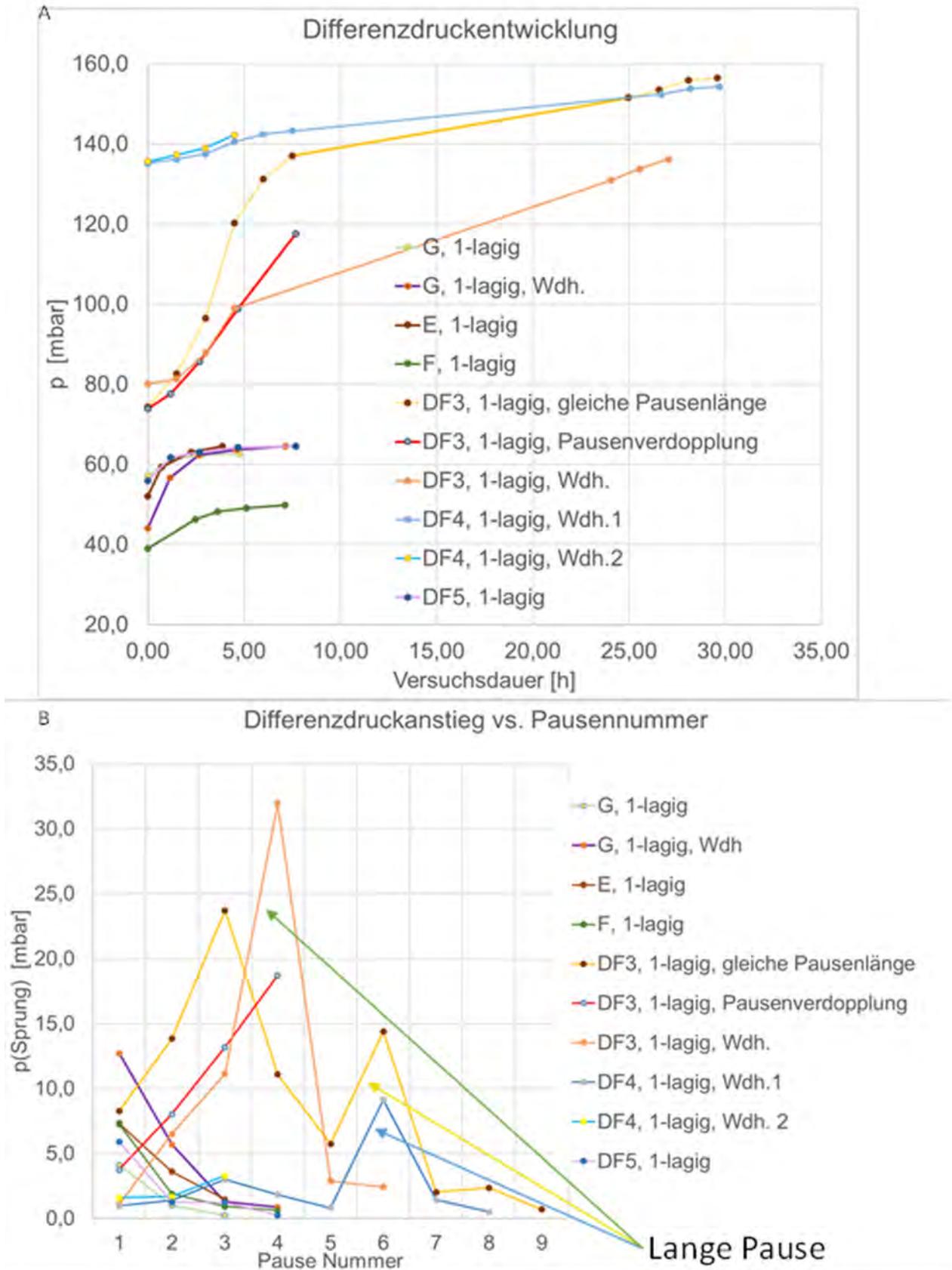


Abbildung 51: Differenzdruckentwicklung bei Volumenstromunterbrechung: A) neuer Differenzdruck nach Unterbrechung; B) Differenzdrucksprung nach Reaktivierung des Volumenstroms

Arbeitspaket 11: Implementierung der gefundenen Korrelationen und Modelle in kommerziellen Strömungslöser und Simulation kompletter Filterstrukturen (IUTA)

1.11.1 Numerische Berechnung der Geschwindigkeits- und Druckverlustfelder plissierter Filtermedien für unterschiedliche Parametervariationen

1.11.1.1 Geometrie der plissierten Filtermedien

Druckluftfilter bestehen zum einen aus dem Druckluftfiltergehäuse und der Filterpatrone, die üblicherweise eine zylindrische Form hat. Die Filterpatrone selbst besteht aus dem plissierten Filtermedium, einem Drainagemedium, sowie diversen zylinderförmigen Lochblechen zur mechanischen Stabilisierung. Die Strömung im Gehäuse ist sehr asymmetrisch (Einströmung in das Gehäuse, 90° Umlenkung in die Filterpatrone, radiale Durchströmung der Filtermedien und Stützlochbleche, Umlenkung zum Auslass). Daher wird für eine systematische Untersuchung des Einflusses der Faltenanzahl bzw. der Permeabilität des Filtermediums auf Geschwindigkeit und Druckverlust nur das plissierte Filtermedium betrachtet.

Für die numerischen Berechnungen wurde eine Druckluftpatrone mit einer Bauhöhe von 40 mm gewählt. Der Betriebsvolumenstrom wurde mit 6,25 m³/h bei einem Druck von 8 bar festgelegt. Die Druckluft hat eine Dichte von 9,6 kg/m³ und eine Viskosität von 1,83·10⁻⁵ kg/(m·s). Der Innendurchmesser des Plissees beträgt 30 mm und der Außendurchmesser 42 mm, somit ergibt sich eine Plisseehöhe von 6 mm (s. Abbildung 52).

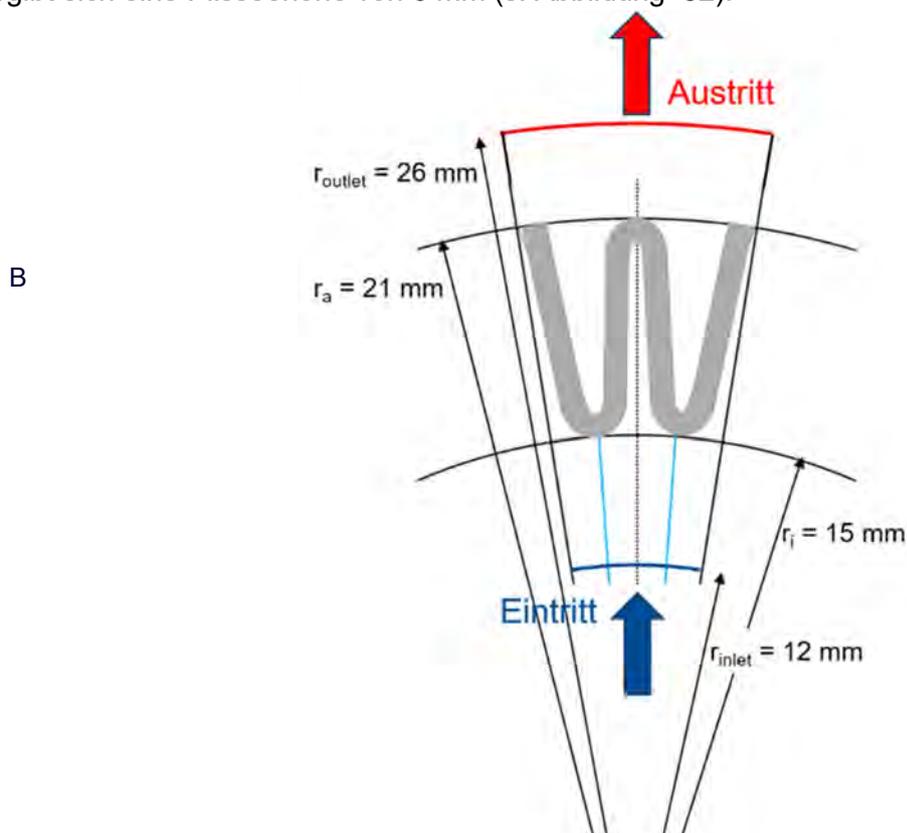


Abbildung 52: Geometrische Abmessungen der betrachteten Faltenstruktur

Die Berechnungen erfolgten aus Symmetriegründen nur für eine Falte. Hierzu wurde für die Faltenanzahl von 32, 40 und 50 jeweils ein zweidimensionales Gittermodell erstellt. Die Dicke des Filtermedium betrug in allen drei Fällen 1 mm. Es wurden zwei unterschiedliche

Permeabilitäten des Filtermediums betrachtet. Die erste Permeabilität des Filtermediums von $2,21 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ entspricht einem vom Medium hervorgerufenen Druckverlust von ca. 40 mbar bei einer Taschenanzahl von 40 und dem o. a. Betriebsvolumenstrom. Die höhere Permeabilität von $1,77 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ entspricht einem vom Medium hervorgerufenen Druckverlust von ca. 5 mbar bei ansonsten gleichen Randbedingungen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnungen mit den zwei Permeabilitäten jeweils für die drei Faltenanzahlen 32, 40 und 50 dargestellt.

1.11.1.2 Ergebnisse der numerischen Berechnungen

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die berechneten Geschwindigkeiten und Drücke des plissierten Filtermediums im betrachteten Rechengebiet (Abbildung 52). Die Permeabilität des Filtermediums wurde mit $2,21 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ festgelegt.

Abbildung 53 zeigt die Ergebnisse für die Faltenanzahl von 32. Im linken Konturplot ist die Geschwindigkeit im Bereich von 0 bis 2,5 m/s aufgetragen. Die Strömungsrichtung ist in den Abbildungen von unten nach oben gerichtet. Die maximale Geschwindigkeit beträgt ca. 1 m/s auf der Anströmseite der Falte (hellgrüner Farbbereich).

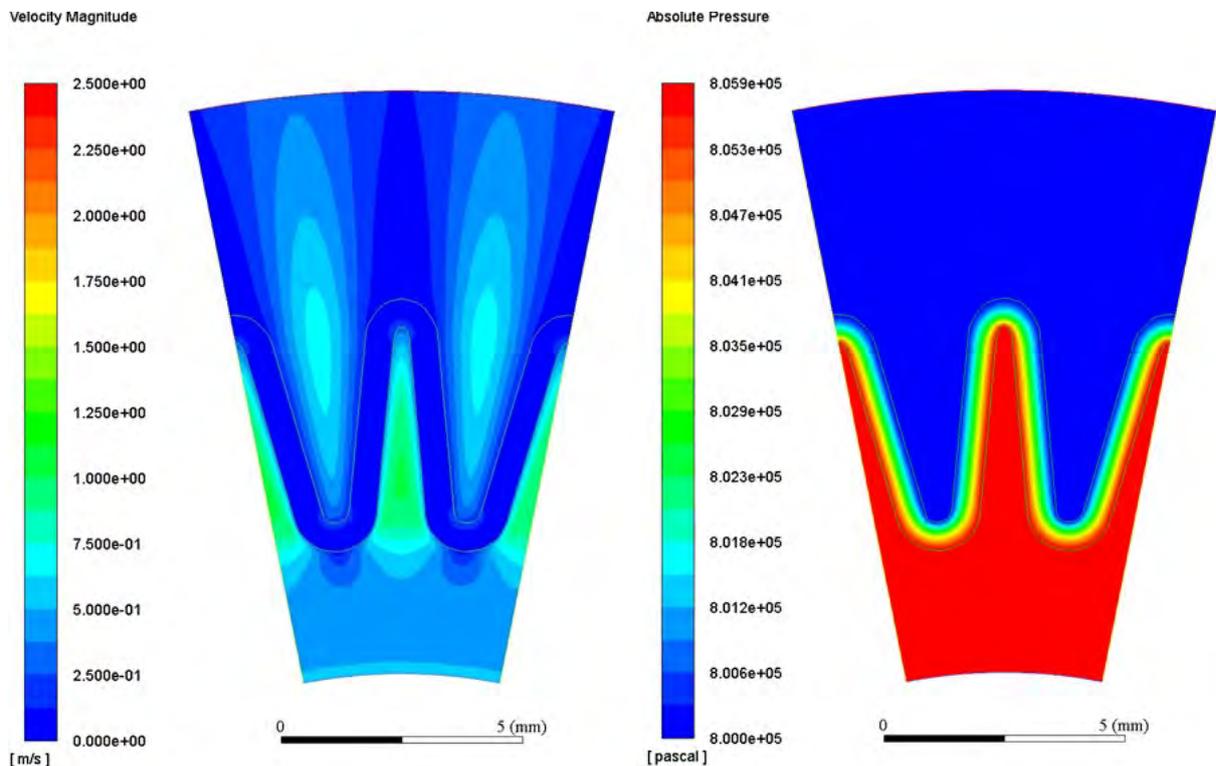


Abbildung 53: Konturplots der Geschwindigkeit und des Druckes (Faltenanzahl 32)

Im rechten Diagramm ist die Druckverteilung im Rechengebiet in Pascal aufgetragen. Der maximal auftretende Druck beträgt $8,059 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ am Eintritt (roter Farbbereich).

Analog zur vorhergehenden Abbildung zeigt Abbildung 54 die berechneten Geschwindigkeiten und Drücke für eine Faltenzahl von 40. In der linken Grafik ist zu erkennen, dass die maximale Geschwindigkeit mit ca. 1,3 m/s (dunkelgrüner Farbbereich) etwas höher ist als bei der Faltenanzahl von 30. Der Druck ist mit $8,049 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ niedriger als bei der Variation mit der niedrigeren Faltenanzahl.

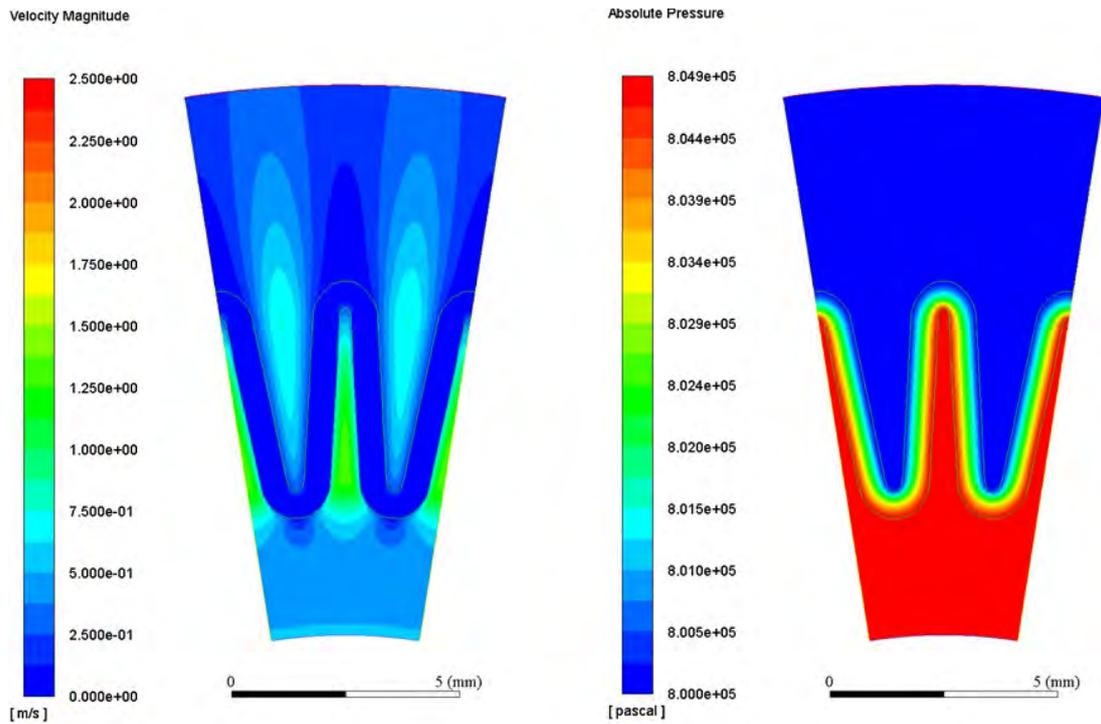


Abbildung 54: Konturplots der Geschwindigkeit und des Druckes (Faltenanzahl 40)

Abbildung 55 stellt die Ergebnisse für die Berechnungen mit einer Faltenanzahl von 50 dar. Die maximale Geschwindigkeit beträgt 2,4 m/s (roter Farbbereich) und der maximale Druck $8,041 \cdot 10^5$ Pa.

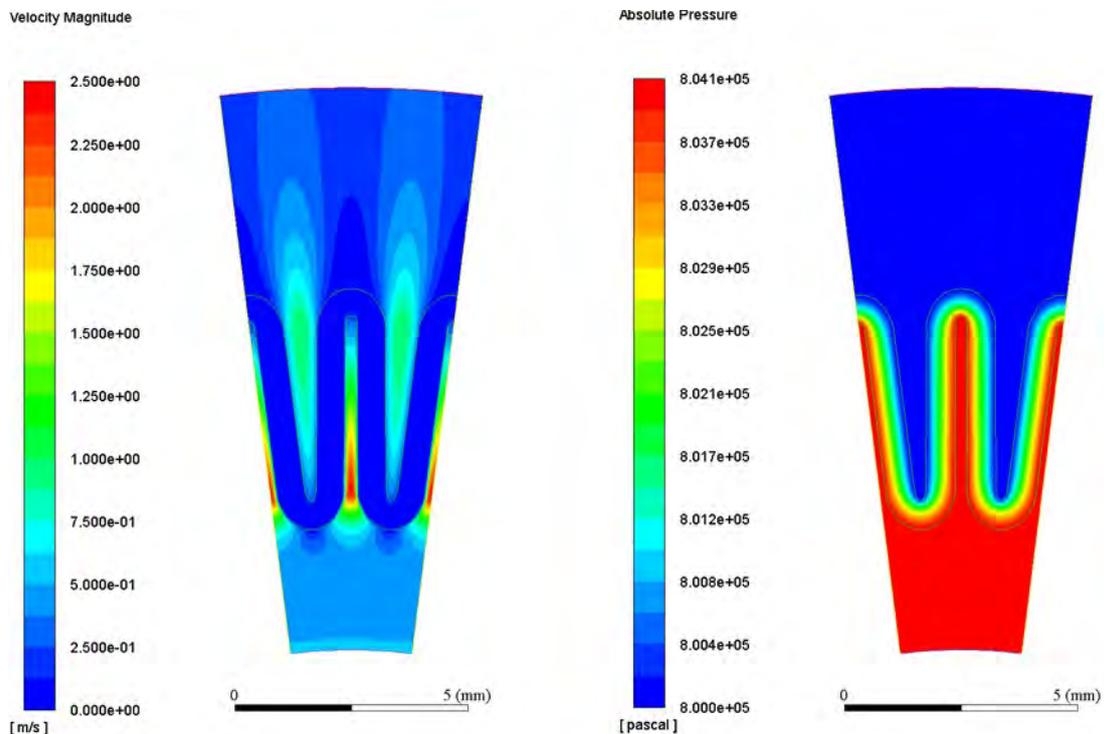


Abbildung 55: Konturplots der Geschwindigkeit und des Druckes (Faltenanzahl 50)

In Abbildung 55 sind die Konturplots der Geschwindigkeiten für die unterschiedlichen Faltenanzahlen nebeneinander dargestellt. Der prinzipielle Geschwindigkeitsverlauf ist bei allen

drei Varianten gleich. Man erkennt deutlich, dass in den engeren Gassen bei höheren Faltenanzahlen auf der Anströmseite deutlich größere Geschwindigkeiten vorliegen.

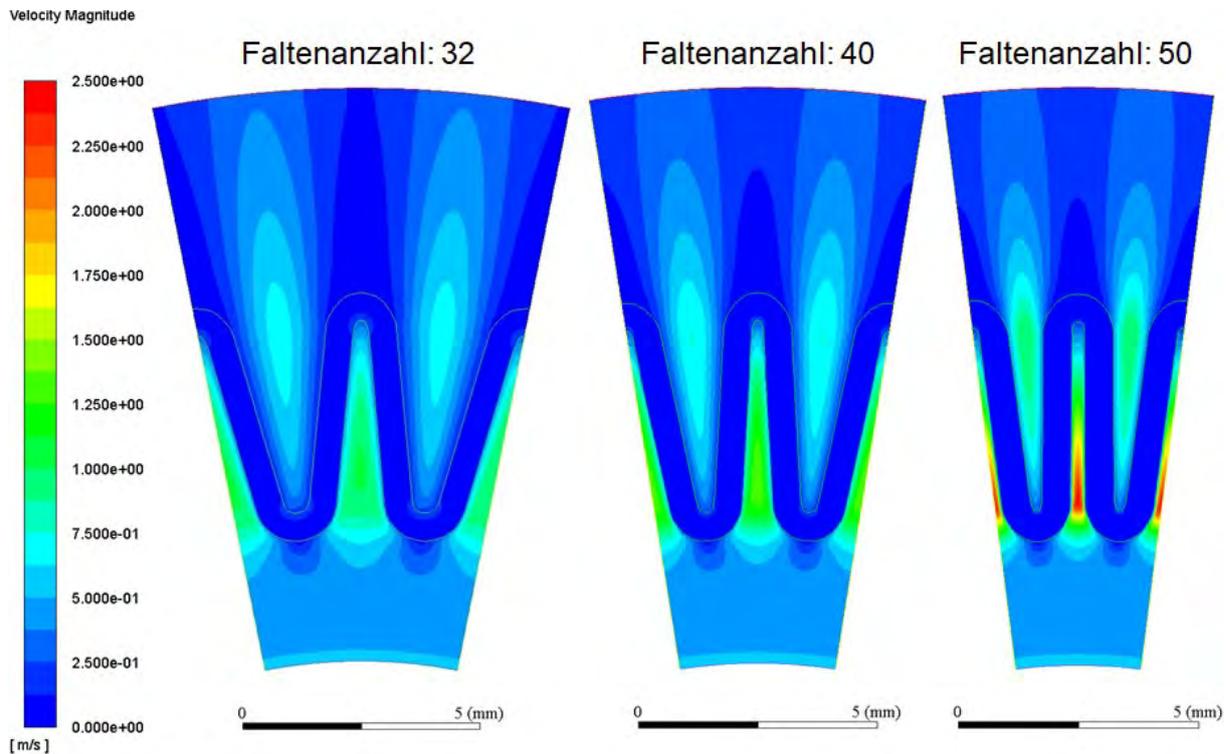


Abb. 56: Konturplots der Geschwindigkeit (Faltenanzahl 32, 40 und 50) bei Permeabilität $2,21 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$

Den durch das plissierte Filtermedium bewirkten Druckverlust kann man aufteilen in einen Anteil, der vom Medium, und in einen Anteil, der durch das Plissee (Faltenspitze, Gasse) hervorgerufen wird.

Für eine Permeabilität des Filtermediums von $2,21 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ sind in Tabelle 9 neben den einzelnen Druckverlustanteilen die Filterfläche und die Filtermedienanströmgeschwindigkeiten für die unterschiedlichen Faltenanzahlen aufgeführt.

Tabelle 9: Druckverlust bei einer Medienpermeabilität von $2,21 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$

Faltenanzahl [-]	Filterfläche [cm ²]	Filtermedienanströmgeschwindigkeit [cm/s]	Druckverlust (Medium) [Pa]	Druckverlust (Geometrie) [Pa]	Druckverlust (gesamt) [Pa]
32	172	10,00	4.977	878	5.855
40	211	8,23	4.095	787	4.882
50	261	6,69	3.329	806	4.135

Die Druckverlustanteile aus Tabelle 9 sind in Abbildung 56 grafisch dargestellt. Der Druckverlust ist über der Faltenanzahl aufgetragen. Man erkennt, dass bei der hier betrachteten Permeabilität der Druckverlustanteil des Mediums den maßgebenden Anteil am Gesamtdruckverlust hat.

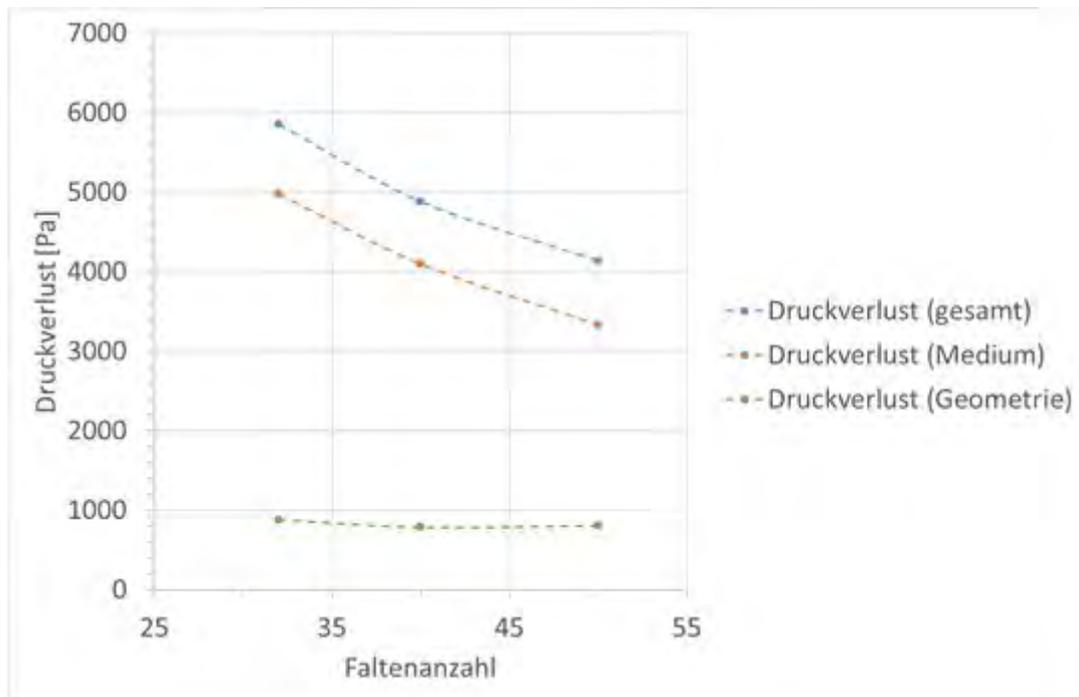


Abb. 57 Druckverlust als Funktion der Faltenanzahl (Permeabilität: $2,21 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$)

Für die Berechnungen mit einer Permeabilität des Filtermediums von $1,77 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ sind die Ergebnisse in Tabelle 10 und in Abbildung 57 dargestellt. Bei gleicher Filterfläche und gleicher Filtermedienanströmgeschwindigkeiten befinden sich die Druckverluste auf einem deutlich niedrigeren Niveau.

Tabelle 10: Druckverlust bei einer Medienpermeabilität von $1,77 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$

Faltenanzahl	Filterfläche	Filtermedienanströmgeschwindigkeit	Druckverlust (Medium)	Druckverlust (Geometrie)	Druckverlust (gesamt)
[-]	[cm ²]	[cm/s]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
32	172	10,00	622	116	738
40	211	8,23	512	111	623
50	261	6,69	416	143	559

Auch hier bestimmt der Druckverlust des Mediums maßgeblich den Gesamtdruckverlust, Abbildung 58.

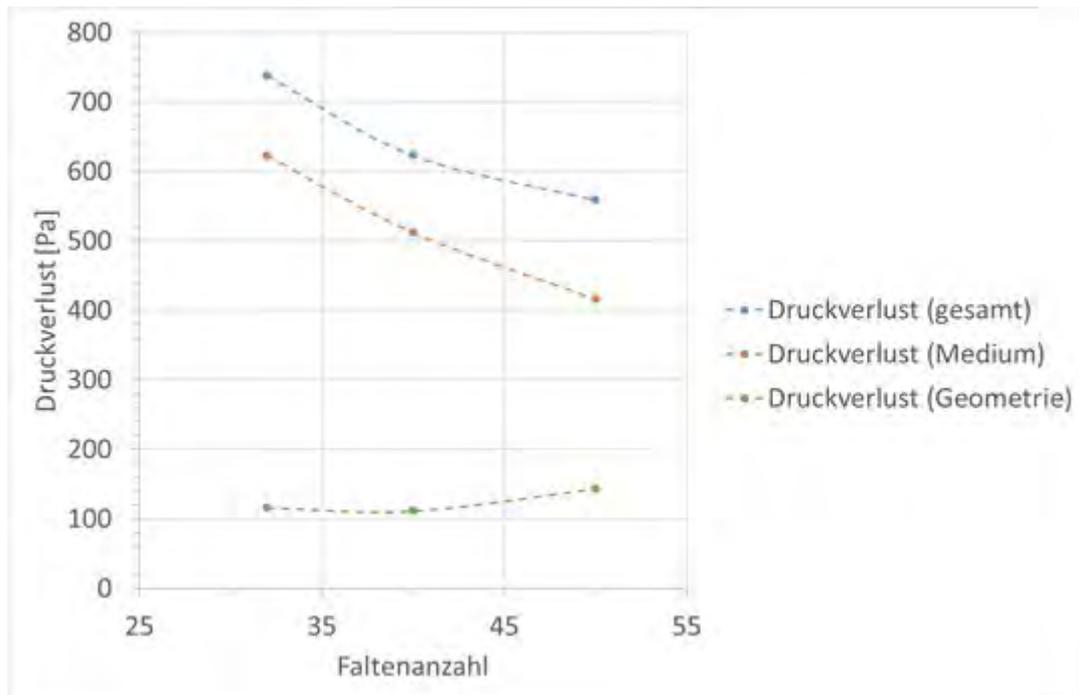


Abb. 58: Druckverlust als Funktion der Faltenanzahl (Permeabilität: $1,77 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$)

1.11.1.3 Abschnittsweise Änderung der Permeabilität in der Falte

Für weitere Berechnungen wird angenommen, dass durch die Verdichtung der Fasern in den Spitzen die Permeabilität dort nur noch 10 % des ursprünglichen Wertes beträgt. Die angenommenen Permeabilitäten sind in Abb. 59 zu sehen.

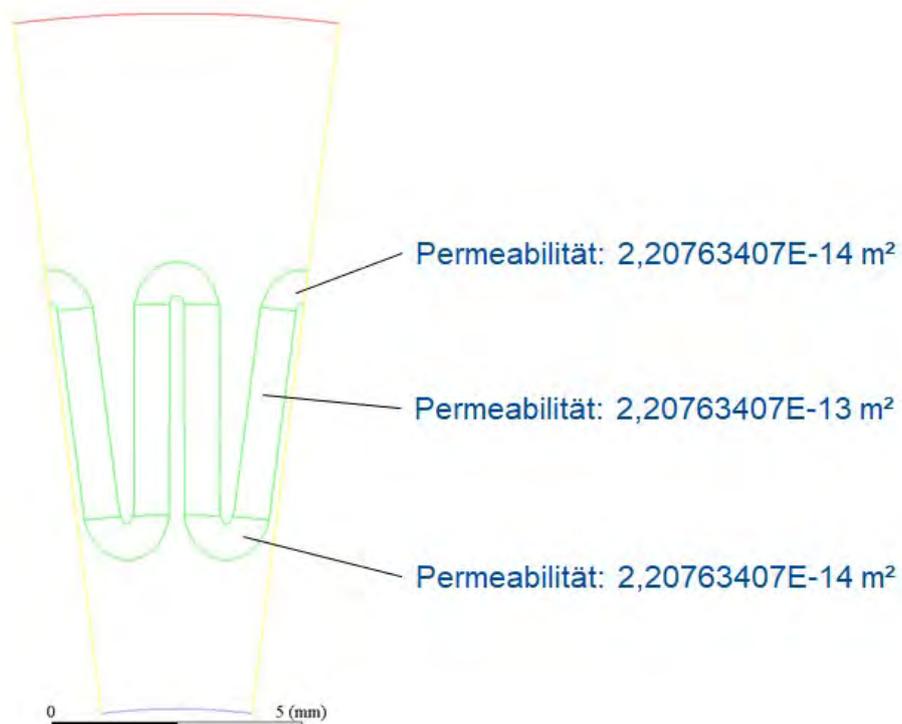


Abb. 59: Variation der Permeabilität in der betrachteten Faltenstruktur

Es ergeben sich für die unterschiedlichen Faltenanzahlen die in Abbildung 60 dargestellten Konturplots für die Geschwindigkeiten. Im Vergleich zu Abbildung 56 erkennt man, dass jeweils im Anströmbereich höhere Geschwindigkeiten auftreten. Bei der Faltenanzahl von 50 beträgt sie jetzt 2,75 m/s.

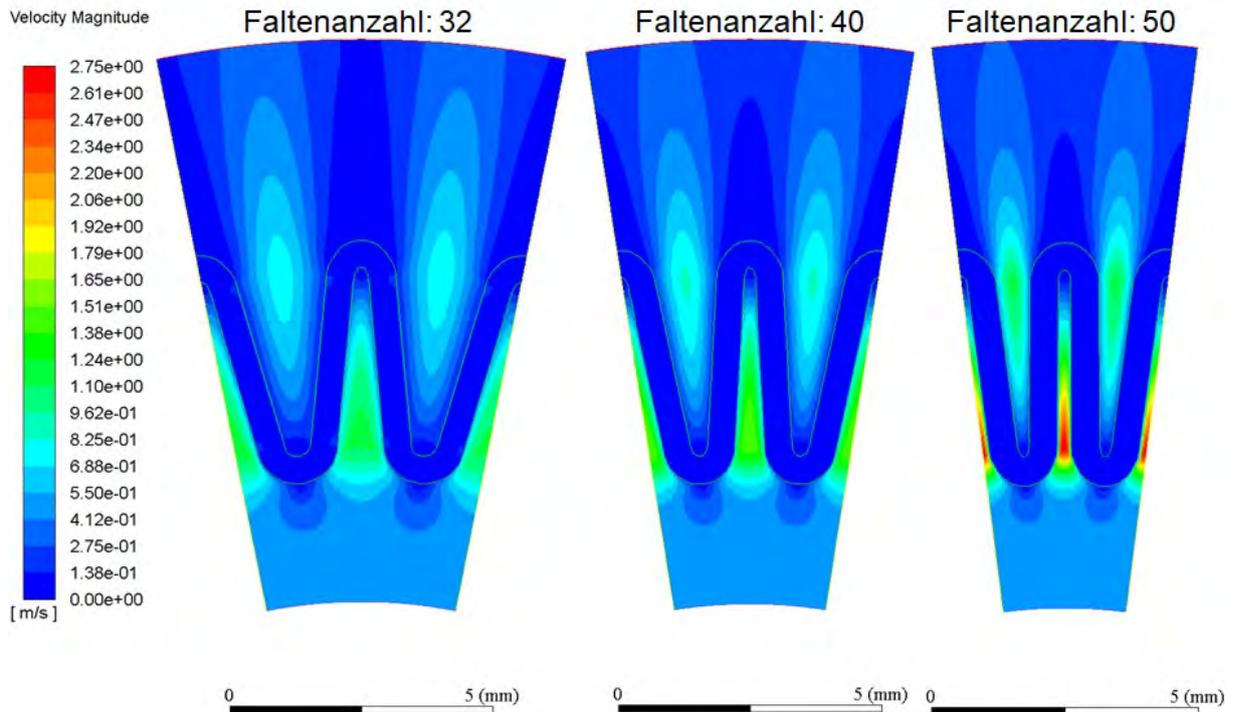


Abb. 60: Konturplots der Geschwindigkeit (Faltenanzahl 32, 40 und 50) bei ungleichmäßiger Permeabilität

Auf Grund der höheren Geschwindigkeiten ergeben sich auch höhere Druckverluste. Die Druckverlustanteile sind in Tabelle 11 für die unterschiedlichen Faltenanzahlen aufgeführt.

Tabelle 11: Druckverlust bei ungleichmäßiger Medienpermeabilität

Faltenanzahl [-]	Filterfläche [cm ²]	Filtermedienanströmgeschwindigkeit [cm/s]	Druckverlust (Medium) [Pa]	Druckverlust (Geometrie) [Pa]	Druckverlust (gesamt) [Pa]
32	172	13,45	6.669	947	7.616
40	211	10,96	5.446	846	6.292
50	261	8,80	4.381	874	5.255

Der Druckverlustanteil des Mediums hat den überwiegenden Anteil am Gesamtdruckverlust (Abbildung 60).

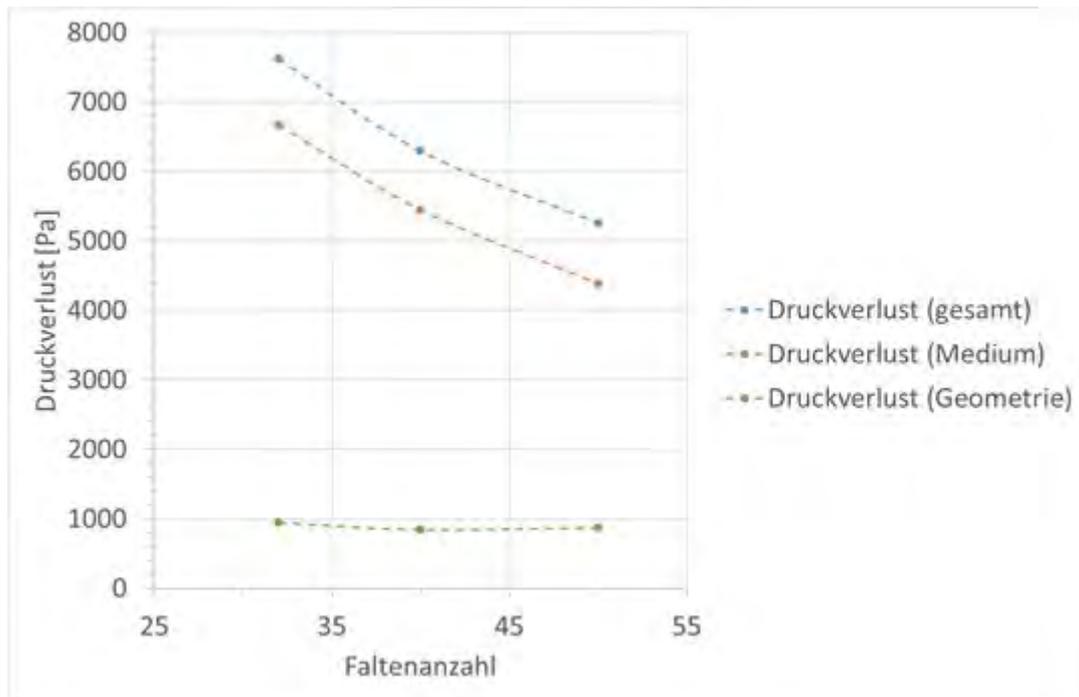


Abbildung 61: Druckverlust als Funktion der Faltenanzahl (ungleichmäßige Permeabilität)

1.12 Arbeitspaket 12: Entwicklung eines Werkzeugs zur Optimierung von Druckluftfiltern und Erstellen von Auslegungsrichtlinien für die Auswahl von Filtermaterialien und der Konstruktion von Filtern. (IUTA)

Die Strömungssimulation durch ein komplettes Druckluftfiltergehäuse inklusive Druckluftfilterpatrone ist abgeschlossen. Allerdings sind die erwarteten lokal unterschiedlichen Permeabilitäten dabei noch nicht berücksichtigt.

Da es seitens des Projektpartners TUDo zu Verzögerungen in der Fertigstellung des Multiskalenmodells kam und insbesondere der Einfluss des Drainagefilms auf die Differenzdruckentwicklung erst gegen Ende des Projektes erfolgte, konnte dieses Arbeitspaket nicht in der geplanten Art und Weise abgeschlossen werden. Stattdessen wurde ein 2D-Makroskalenmodell plissierter Filter ohne Gehäuse, wie in Kapitel 1.11 beschrieben, unter Anwendung unterschiedlicher Permeabilität simuliert. Außerdem stellten sich die untersuchten Mehrphasentransportphänomene als sehr komplex heraus, so dass eine Überführung aller Ergebnisse in ein Auslegungswerkzeug zur Konstruktion von Filtern nicht in der Projektlaufzeit durchgeführt werden konnte.

2. Verwendung der Zuwendung

Die konkrete Angabe der Personenmonate, Nutzung von Geräten bzw. Leistungen Dritter erfolgt wie nachfolgend dargestellt nach dem Finanzierungsplan.

2.1 Personalausgaben (Einzelansatz A des Finanzierungsplans):

- Forschungsstelle 1 (ZBT): Für die Arbeiten im Rahmen des Projekts wurden im Berichtszeitraum von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (HPA-A) insgesamt 25,9 PM aufgewendet.

- Forschungsstelle 2 (TU Dortmund): Für die Arbeiten im Rahmen des Projekts wurden im Berichtszeitraum von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (HPA-A) insgesamt 26 PM aufgewendet.
- Forschungsstelle 3 (IUTA): Für die Arbeiten im Rahmen des Projekts wurden im Berichtszeitraum von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (HPA-A) insgesamt 28,55 PM aufgewendet.

2.2 Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):

- Im Rahmen des Projekts werden keine zusätzlich Geräte benötigt. Alle benötigten Apparaturen stehen an den Forschungsstellen zur Verfügung.

2.3 Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):

- Innerhalb der Projektlaufzeit sind keine Projektmittel für Leistungen Dritter aufgewendet worden.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die innerhalb des Berichtszeitraums geleisteten Arbeiten der drei Forschungsstellen entsprechen trotz rückwirkender Bewilligung des Projekts und entsprechender Verzögerung des Projektstarts weitestgehend den Plänen des Forschungsantrags und waren für die Durchführung des Vorhabens notwendig.

4. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU

Der wissenschaftlich-technische Nutzen der erzielten und zuvor vorgestellten Forschungsergebnisse besteht in der Weiterentwicklung theoretischer Modelle zur Vorhersage des Abscheidegrads von Einzelfasern. Hiermit können Vorhersage der Nettoabscheidung von Ölpartikeln gemacht werden.

An den Beispielen eines Druckluftfiltergehäuses inklusive Druckluftfilterpatronen und eines 2D-Makroskalenmodells plissierter Filter unter Parametervariation wurden die Weiterentwicklungen angewandt. Die Ergebnisse liefern die Grundlage für weitere aufbauende Projekte und bilden die Basis für ein Auslegungswerkzeug zur Konstruktion von Filtern.

Durch die durchgeführten Untersuchungen konnte außerdem das Verständnis der Mehrphasenströmung in Koaleszenzfiltern unterschiedlicher Oberflächengüte vertieft werden.

Erste Ansätze zu einer alternativen, auf Zentrifugation basierenden Charakterisierungsmethode von Faservliesen gegenüber Ölen konnten erarbeitet werden.

Diese stellt ein experimentelles Auslegungswerkzeug dar und basiert auf der (innerhalb des Projektes) modifizierten Hassler-Methode. Damit ist es möglich, schon im Vorfeld der Filterkonstruktion eine gezielte Medienauswahl für die geplante Anwendung, hier Koaleszenzfiltration, gegenüber bestimmten, vorgegebenen Ölen bzw. Ölkategorien zu treffen. Durch den Einsatz der Zentrifugation lässt sich schnell und insbesondere kostengünstig eine Auswahl der geeigneten Medien treffen. Diese können anschließend mit dem innerhalb des Projektes weiterentwickelten Medienprüfstand unter realitätsnäheren Bedingungen auf die geforderte Eignung auch bei Dauerbeaufschlagung getestet werden. Die Installation der Methoden ist insbesondere auch für KMU wirtschaftlich, da die Anschaffungskosten auf unterhalb 10.000 € geschätzt werden und für die Durchführung der Tests keine akademische Ausbildung erforderlich ist.

Von den erzielten Ergebnissen profitieren besonders KMU aus den verschiedensten Bereichen der Filtertechnik z.B. Koaleszenzfiltertechnik im Reinlufttechnik-Bereich, Filtertechnik in Tankbelüftungsanlagen, Getriebeentlüftungfiltertechnik, aber auch der Brennstoffzellentechnik und der chemischen Verfahrenstechnik, außerdem Firmen aus dem Bereich der CFD-Software-Entwicklung bzw. Dienstleister im Bereich der numerischen Strömungssimulation.

5. Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1: Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH
Carl-Benz-Str. 201
47057 Duisburg
Leiter: Prof. Dr. A. Heinzl
Projektleiterin: Dipl.-Phys. Nadine van der Schoot

Forschungsstelle 2: Technische Universität Dortmund
Strömungsmechanik
Emil-Figge-Str. 68
44221 Dortmund
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Peter Ehrhard
Projektleiter: Msc. Jayotpaul Chaudhuri

Forschungsstelle 3: Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA)
Bliersheimer Str. 58-60
47229 Duisburg
Wiss. Leiter: Prof. Dr.-Ing. D. Bathen
Geschäftsführung: Dr.-Ing. Haep, J. Schiemann
Projektleiter: Dr.-Ing. W. Mölter-Siemens /
Dr. rer. nat. M. Wittmar

6. Förderhinweis und Danksagung

Das in diesem Schlussbericht geschilderte Forschungsvorhaben Nr. 19109N der Forschungsvereinigung IUTA wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages gefördert. Ein besonderer Dank gilt den Firmen, die dem Projekt unterstützend zur Seite gestanden haben: Boll & Kirch Filterbau, Donaldson Filtration Deutschland, Mann & Hummel, LaVision und AVL Deutschland.

7. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

7.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum
Information und Beratung interessierter Unternehmen	Direkter Know-How-Transfer zu Unternehmen, vornehmlich kmU; Information zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Gezieltes Ansprechen und Information von interessierten Unternehmen außerhalb und innerhalb des PA	fortlaufend
Akademische Lehrveranstaltungen	Information von Studierenden über aktuelle Forschungsergebnisse vor ihrem Eintritt ins Berufsleben	Akademische Lehre: Prof. Heinzel, PD Dr.-Ing. Schmidt, Dr.-Ing. Haep (alle Univ. Duisburg-Essen), Prof. Ehrhard (TU Dortmund)	fortlaufend, ab WS 2016/2017
Information von Verbänden	Know-How-Transfer an interessierte Firmen durch Verbände: Processnet, VDMA Fachverband „Kompressoren, Druckluft und Vakuumtechnik“, Filtration Society, IVAM, IKAM	Gezieltes Informieren der Repräsentanten der Verbände zum Stand der Arbeiten; Übersenden von Projektübersichten	fortlaufend
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Kontinuierliche Diskussion von Ausrichtung, Stand der Arbeiten und Detailergebnissen durch die Mitglieder des PA	Vorstellung des Projektes und der Ziele; Diskussion der geplanten Arbeiten; Vorstellung erster Resultate und Festlegung des weiteren Vorgehens; Abschlusspräsentation der Ergebnisse Übersenden von Projektinfos	Februar 2017, März 2018, Dezember 2018
Hannover-Messe	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Informationsmaterial zum Projekt auf dem Messestand des ZBT	April 2017, 2018, 2019
Workshop „AiF-Brennstoffzellen Allianz“	Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Information von interessierten Firmen (bes. kmU) zum Projekt	Poster zu den laufenden Projektarbeiten	Juni 2017, Juni 2018
Innovationstag Mittelstand (BMW, AiF)	Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Information von interessierten Firmen zum Projekt, vor allem KMU	Poster bzw. Informationsmaterial zu den laufenden Projektarbeiten	Juli 2017, Juni 2018
Palas ATS-Seminar	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Fachvortrag / Poster zu den Entwicklungszielen und Ergebnissen des Projektes	September 2016, September 2017
Multiphase Flow Workshop, HZDR Dresden	Ergebnistransfer; Austausch mit Fachpublikum	Poster, Chaudhuri, J., Ehrhard P., HZDR Dresden ‘Increasing efficiency of compressed air filter’	2016
Multiphase flow Konferenz	Ergebnistransfer; Austausch mit Fachpublikum	Poster, Chaudhuri, J., Ehrhard P., HZDR Dresden ‘Coalescing filtration process’	November 2017
Multiphase flow Konferenz	Ergebnistransfer; Austausch mit Fachpublikum	Poster, Chaudhuri, J., Ehrhard P., HZDR Dresden ‘Pressure drop in randomly oriented fibrous filters’	November 2018
GAMM, Munich	Ergebnistransfer; Austausch mit Fachpublikum	Poster, Chaudhuri, J., Ehrhard P., HZDR Dresden ‘Numerical Investigation of Coalescing Filtration Process’	2018
GAMM, Wien	Ergebnistransfer; Austausch mit Fachpublikum	Poster, Chaudhuri, J., Ehrhard P., HZDR Dresden ‘Flow through randomly-oriented fibrous filters’	2019
9. Filtrationstag	Öltransport in Koaleszenzfiltern für die Druckluftaufbereitung	Fachvortrag, Mölter-Siemens, W. Duisburg, Germany Fachvortrag, Wittmar, M. Duisburg, Germany	09.11.2017 13.11.2018
Palas Air Filtration Seminar	Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Austausch mit Fachpublikum	Filtration of compressed air – a review, Fachvortrag, Mölter-Siemens, W.; Karlsruhe, Germany	21.-22.11.2017
Palas Air Filtration Seminar	Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Austausch mit Fachpublikum	Effects of aging on filter efficiency, Fachvortrag, Asbach, C., Todea, A.M., Lindermann, J., Däuber, E., Schumacher, S.; Karlsruhe, Germany	21.-22.11.2017
Wissenschaftliche Publikationen	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Chaudhuri, Jayotpaul, and Peter Ehrhard. "Numerical Investigation of Coalescing Filtration Process." PAMM 18.1 (2018): e201800230	2018
Wissenschaftliche Publikationen	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Chaudhuri, Jayotpaul, et al. "Pressure drop in fibrous filters." European Journal of Mechanics-B/Fluids 76 (2019): 115-121	2019

7.2 Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum
Veröffentlichung von Projektinformationen	Informationen der Öffentlichkeit	Internetseiten und Jahresberichte der Forschungsvereinigung und der Forschungsstellen	Juni / Juli bzw. Ende 2019
Wissenschaftliche Publikationen	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Numerical investigation of aerosol deposition on single fibers, PAMM	2018
Wissenschaftliche Publikationen	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Pressure Drop in Fibrous filter-Representative Domain size and Effect of Fibre Orientation, JFM	2019
Wissenschaftliche Vorträge	Informationen eines breiten Fachpublikums und Firmen aus den Bereichen Messtechnik und Brennstoffzelle	jährl. Fachtagung der deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie	Sept. 2019
Palas ATS-Seminar	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Fachvortrag / Poster zu den Entwicklungszielen und Ergebnissen des Projektes	September 2019
Wissenschaftliche Publikationen	Information eines breiten Fachpublikums zu Zielen und Ergebnissen des Projektes	Dissertation Jayotpaul Chaudhuri: Numerical Investigation of Coalescing Filtration Process, 2020	2020

7.3 Einschätzung der Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Die in der obigen Tabelle aufgeführten Maßnahmen dienen der Verbreitung der Ergebnisse sowohl in wissenschaftlichen Bereichen als auch innerhalb der Wirtschaft. Dies geschah während der Projektlaufzeit vor allem über die Veröffentlichung der Ergebnisse auf verschiedenen Workshops und Tagungen. Die Vorträge der Ergebnisse bei den oben aufgeführten Veranstaltungen sowie Einbindung der Ergebnisse in den Tagungsbänden der besuchten Veranstaltungen trägt dazu bei, die erzielten Erkenntnisse einem breiten Fachpublikum zugänglich zu machen. Im Anschluss an das Projekt sind ebenso weitere Publikationen der aktuellen Ergebnisse geplant (siehe Kapitel 7.2). Die Internetseiten der Forschungsstellen informieren über Projektergebnisse und zudem wird der Schlussbericht des Projektes auf der Plattform der Forschungsvereinigung IUTA öffentlich zugänglich gemacht. Das Transferkonzept kann wie geplant umgesetzt werden.

8. Literatur

- [1] Happel, John (1959): Viscous flow relative to arrays of cylinders. *AIChE Journal* 5 (2), pp. 174–177. DOI: 10.1002/aic.690050211.
 - [2] Kuwabara, Sinzi (1959): The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in a viscous flow at small Reynolds numbers. *Journal of the Physical Society of Japan* 14 (4), pp. 527–532.
 - [3] Shi, Wenyue (2017): Modeling and simulation of aerosol capture on fibrous filters. Master thesis. Technical University of Dortmund.
 - [4] Khadra, Khodor; Angot, Philippe; Parneix, Sacha; Caltagirone, Jean-Paul (2000): Fictitious domain approach for numerical modelling of Navier–Stokes equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 34 (8), pp. 651–684.
 - [5] Chaudhuri, J., Baukelmann, A., Boettcher, K., & Ehrhard, P. (2019): Pressure drop in fibrous filters. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 76, 115-121.
 - [6] Kasper, G. O. M. J., Preining, O., & Matteson, M. J. (1978). Penetration of a multistage diffusion battery at various temperatures. *Journal of Aerosol Science*, 9(4), 331-338.
 - [7] Andan, S. (2010). Modeling of drainage in coalescence filtration. Akron
 - [8] Kampa, D., Wurster, S., Buzengeiger, J., Meyer, J., Kasper, G. (2014). Pressure drop and liquid transport through coalescence filter media used for oil mist filtration. *International Journal of Multiphase Flow*, 58, S. 313–324.
 - [9] Kolb, H., Meyer, J., & Kasper, G. (2017). Flow velocity dependence of the pressure drop of oil mist. *Chemical Engineering Science*, 166, S. 107-114.
- Hassler, G. L., & Brunner, E. (1945). Measurement of capillary pressures in small core samples. American institut of mining and metallurgical engineers - Technical Publication No. 1817, S. 1-10.