

Einfluss ausgewählter Medienstrukturparameter auf das Betriebsverhalten von Ölnebelfiltern

Thomas Penner^{1,*}, Wolfgang Heikamp², Jörg Meyer¹ und Achim Dittler¹

DOI: 10.1002/cite.201900018

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Herrn Prof. Dr. techn. Hans-Jörg Bart zum 65. Geburtstag gewidmet

Die bei der Filtration von Ölnebel maßgeblichen Mechanismen und ihre Auswirkungen auf das Betriebsverhalten der Filter standen in den vergangenen Jahren zunehmend im Fokus der Forschung und sind qualitativ mittlerweile weitgehend verstanden. Bisher ist jedoch wenig Systematisches bekannt über den Zusammenhang zwischen Struktureigenschaften des Filtermediums und den Betriebseigenschaften der Filter. Für die Identifikation filtrationsrelevanter Strukturparameter wurden textile Eigenschaften von Filtermedien mithilfe diverser Methoden charakterisiert. Die charakterisierten Medien wurden in Filtrationsversuchen hinsichtlich ihrer Betriebseigenschaften untersucht und miteinander verglichen.

Schlagwörter: Filtermedien, Koaleszenzfilter, Ölnebefiltration

Eingegangen: 24. Januar 2019; *revidiert:* 07. Mai 2019; *akzeptiert:* 16. Juli 2019

Structural Parameters of Media and their Impact on Operational Behavior of Oil Mist Filters

The relevant mechanisms in oil mist filtration and their impact on operational behavior of the filters have received increasing attention in research over the last few years and are qualitatively well understood by now. However, so far the relationship between structural properties of the filter media and the operational behavior of the filters is relatively unknown. For the identification of filtration-relevant structural parameters, textile properties of different filter media were characterized with various methods. The operational behavior of the characterized filter media was then examined and compared.

Keywords: Coalescence filters, Fibrous filter media, Oil mist filtration

1 Einleitung

Tropfen in Gasen sind ein vielfach beobachtetes Phänomen und führen oft zu unerwünschten Effekten oder zu nicht zulässigen Emissionen. Als Beispiele dafür können genannt werden:

- Druckluftherzeugung in öleingespritzten Kompressoren,
- Kurbelgehäuseentlüftung,
- Emulsionstropfen in mechanischen Bearbeitungsmaschinen und
- verfahrenstechnische Prozesse wie z. B. Destillation.

Beispielhaft soll hier auf zwei Prozesse eingegangen werden:

- 1) Öltropfen in der Druckluftherzeugung durch öleingespritzte Schraubenkompressoren und
- 2) Kurbelgehäuseentlüftung.

Bei der Druckluftherzeugung wird Luft aus der Umgebung angesaugt und durch eine Schraube verdichtet. Um die entstehende Wärme abzuleiten, wird bis zu 5 kg Öl pro 1 kg angesaugter Luft eingespritzt. Dieses Gemisch gelangt in einen Vorabscheider, wo der Gehalt an Öl auf ca. 1 g m^{-3}

reduziert werden kann. Die übrigbleibenden Tropfen haben eine mittlere Größe im Bereich von $0,6 \mu\text{m}$ und kleiner, je nach Temperatur und Druckstufe. Danach durchströmt das Gemisch ein Luftentölelement, das aus verschiedenen Glasfaserlagen aufgebaut ist [1]. Die Konzentration nach dem Element beträgt dann nur noch ca. 3 mg m^{-3} .

In der Kurbelgehäuseentlüftung werden die sogenannten Blow-by-Gase aus dem Kurbelraum herausgeführt, mit einem Ölabscheider gereinigt und in der Regel auf die Reinseite der Motorluftansaugung vor dem Turbolader eingelei-

¹Thomas Penner, Dr.-Ing. Jörg Meyer,
Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittler
thomas.penner@kit.edu

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Straße am Forum 8, 76131 Karlsruhe, Deutschland.

²Wolfgang Heikamp
BinNova Microfiltration GmbH, Dr.-Hermann-Ludewig-Ring 5,
07407 Rudolstadt, Deutschland.

tet [2]. Die Blow-by-Gase enthalten sehr feine Öltröpfen mit einer massegewichteten mittleren Größe von ca. 0,5 bis 1,3 μm je nach Lastzustand und Motorentwicklungsstand (s. Abb. 1). Die nicht abgeschiedenen Öltröpfen führen zu einem Verkoken des Turboladers und somit zu Leistungsverlust. Dies kann sogar zu dessen Totalausfall führen. Ein weiteres Problem ist die Verschmutzung des Luftansaugmassenmessers, der die Abgasnachbehandlung steuert, wodurch unter Umständen mehr Emissionen freigesetzt werden können [3]. Problematisch ist zudem die höhere Aschemasse in der Abgasnachbehandlung, die durch die Verbrennung der Öle im Brennraum entsteht.

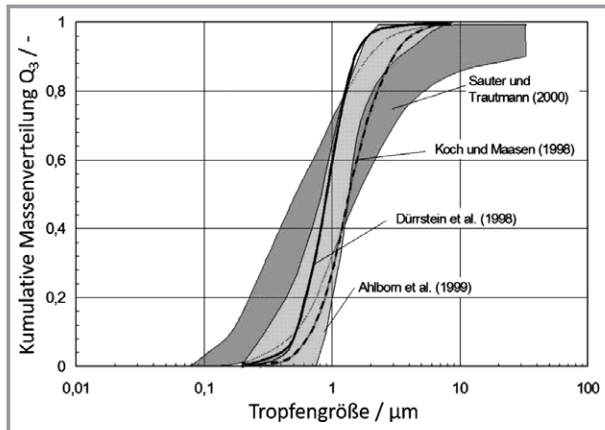


Abbildung 1. Vergleich der Tropfengrößenverteilungen in der Kurbelgehäuseentlüftung [4].

Diese Nachteile einer unzureichenden Tropfenabscheidung machen deutlich, wie wichtig es ist, die richtigen Medien einzusetzen und eine geeignete Auswahl zu treffen. Heute sind die Auswahlkriterien meist beschränkt auf die textilen Daten der Medien und diese sind in der Regel nicht aussagekräftig genug.

2 Materialien und Methoden

2.1 Medien

Alle verwendeten Medien waren nassgelegte Glasfaserfiltermedien aus B-Glas-Mikrofasern mit nominellen Faserdurchmessern zwischen 0,4 und 5 μm , die in diversen industriellen Anwendungen verwendet werden, u. a. der Druckluftaufbereitung, und die sich in ihren Struktur- und Benetzungseigenschaften voneinander unterscheiden. Die Medien und ihre wichtigsten textilen Eigenschaften sind in Tab. 1 aufgelistet. Die Medien Phob 1 und Phob 2 wurden bei der Herstellung mit einem Flourcarbon oleophobisiert.

2.2 Mediencharakterisierung

Für einen Vergleich mit verfügbaren textilen Parametern sowie für eine Identifikation weiterer möglicherweise

Tabelle 1. Verwendete Glasfaserfiltermedien mit textilen Eigenschaften.

Medium	Legendicke [mm]	Porosität [-]	Größte Pore* [μm]	Effizienzklasse [%]
Phil 1	0,65	0,932	36	85
Phil 2	0,6	0,942	38	80
Phil 3	0,75	0,932	56	60
Phob 1	0,5	0,927	22	95
Phob 2	0,8	0,936	43	70

* nach ASTM F316 [5].

betriebsrelevanter Struktureigenschaften erfolgte zusätzlich eine Charakterisierung der Medien mithilfe verschiedener Verfahren. Dazu gehörten die Kapillarflussporometrie, die Analyse von Aufnahmen aus bildgebenden Verfahren und die Charakterisierung der Benetzbarkeit mit Öl nach DIN EN ISO 14419 [6].

2.2.1 Kapillarflussporometrie

Die Kapillarflussporometrie ist ein weitverbreitetes Verfahren zur Bestimmung von Porengrößenverteilungen poröser Medien, das auf der Verdrängung eines Fluids aus den Poren des zu vermessenden Mediums basiert. Dazu wird das Medium zunächst vollständig mit einem benetzenden Fluid gesättigt, das anschließend durch ein zweites Fluid unter steigendem Druck verdrängt wird. Bei einer schrittweisen Erhöhung des Drucks bei gleichzeitiger Messung des Volumenstroms durch das Medium kann so die Anzahl an Poren mit dem zum jeweiligen Druck gehörenden Porendurchmesser, aus denen das Benetzungsfluid verdrängt wurde, bestimmt werden [7].

Für die durchgeführten Messungen mittels Kapillarflussporometrie wurden als Benetzungsfluid Silikonöl (Wacker AK 5 Silikonöl) und als verdrängendes Fluid trockene Druckluft gewählt. Die vermessenen Proben hatten eine kreisförmige Grundfläche mit einem Durchmesser von 14 mm. Nach der Befestigung der trockenen Medien im Probenhalter zu Beginn erfolgte eine schrittweise Erhöhung des Drucks bis 300 mbar bei gleichzeitiger Messung des Volumenstroms. Anschließend wurde das Medium mit 200 μL Silikonöl gesättigt, so dass der Flüssigkeitsspiegel ca. 1 mm über der Probenoberfläche stand. Es folgte anschließend eine langsame Erhöhung des Drucks bis Blasenbildung über der Probenoberfläche sichtbar war (*bubble point*). Der Druck wurde dann weiter inkrementell erhöht und der zugehörige Volumenstrom gemessen, wobei jede Druckstufe 2 min gehalten wurde. Die Porengrößenverteilung konnte dann jeweils aus dem Verhältnis der Volumenströme der Trocken- und Nassmessung berechnet werden.

2.2.2 Bildanalyse

Da bei der Berechnung der Porengrößenverteilungen mithilfe der Kapillarflussporometrie ideale, nicht miteinander verbundene Kapillaren als Poren angenommen werden, was nicht der realen Struktur der Medien entspricht, wurden zur weiteren Charakterisierung zusätzlich REM-Aufnahmen von den anströmseitigen Probenoberflächen zur Bildanalyse angefertigt. Dabei ließen sich nach einer Binärisierung und Segmentierung der Bilder aus den sichtbaren Polygonflächen zwischen den Fasern äquivalente Porendurchmesser unter der Annahme kreisrunder Poren berechnen, um diese mit den aus der Kapillarflussporometrie erhaltenen Porengrößenverteilungen vergleichen zu können (s. Abb. 2).

2.2.3 Benetzbarkeit

Die Charakterisierung der Benetzbarkeit mit Öl erfolgte gemäß dem Vorgehen nach DIN EN ISO 14419:2010 zur Prüfung der Ölbeständigkeit von Textilien mithilfe von Kohlenwasserstoffen. Dabei wurden Tropfen von den in Tab. 2 aufgeführten Kohlenwasserstoffen auf die Medienoberfläche aufgebracht und nach 30 s hinsichtlich einer Benetzung (d. h. ein Eindringen der Flüssigkeit ins Medium) untersucht. Der daraus bestimmte Oleophobiegrad wird angegeben durch die Nummerierung der Prüfflüssigkeit, bei der eine Benetzung des Mediums zu beobachten ist. Wird eine Benetzung nur bei einem Teil der Tropfen

einer Zusammensetzung beobachtet, wird von der Nummerierung 0,5 subtrahiert.

2.3 Filtrationsversuche

Für sämtliche in dieser Arbeit beschriebenen Versuche zur Bestimmung der Betriebseigenschaften der verwendeten Filtermedien wurde eine einzelne, anfänglich trockene Filterlage mit Ölnebel unter definierten Bedingungen beladen. In Anlehnung an die ISO 12500-1 wurden als Prüfbedingungen eine Konzentration von 10 mg m^{-3} Öl und eine Filtrationsgeschwindigkeit von $0,25 \text{ m s}^{-1}$ gewählt, allerdings im Unterschied zur ISO 12500-1 mit einer Durchführung der Versuche bei Umgebungsbedingungen (Umgebungsdruck zwischen 1,009 und 1,015 bar, Temperaturen zwischen 19,5 und 21,5 °C) und jeweils mit einer Alterung der Filter unter erhöhter Konzentration bis zum Erreichen des stationären Zustands, um die Durchführung der Versuche zu beschleunigen.

Ölnebel wurde durch einen bzw. zwei (je nach gewünschter Rohgaskonzentration) Collision-Zerstäuber mit nachgeschalteter Prallplatte zur Abscheidung großer Tropfen aus einem Kompressoröl (dynamische Viskosität $0,122 \text{ Pa s}$, Oberflächenspannung $0,031 \text{ N m}^{-1}$, Dichte $0,9 \text{ g cm}^{-3}$, alle Eigenschaften bei Standardbedingungen) erzeugt. Die Tropfengrößen des so erzeugten Aerosols waren näherungsweise logarithmisch normalverteilt mit einem Modalwert der



Abbildung 2. Von links nach rechts: Originale REM-Aufnahme, binärisiertes Bild, Segmentierung mit erkannten Porenöffnungen.

Tabelle 2. Prüfflüssigkeiten nach DIN EN ISO 14419.

Zusammensetzung	Nummerierung	Dichte [kg m^{-3}]	Oberflächenspannung bei 25 °C [N m^{-1}]
Keine (ohne Weißölanteil)	0	–	–
Weißöl	1	0,84 bis 0,87	0,0315
Volumenanteil Weißöl/ <i>n</i> -Hexadekan 65:35	2	0,82	0,0296
<i>n</i> -Hexadekan	3	0,77	0,0273
<i>n</i> -Tetradekan	4	0,76	0,0264
<i>n</i> -Dodekan	5	0,75	0,0247
<i>n</i> -Dekan	6	0,73	0,0235
<i>n</i> -Oktan	7	0,70	0,0214
<i>n</i> -Heptan	8	0,69	0,0198

Anzahlverteilung von ca. 350 nm und einer Standardabweichung von 1,8. Zur Einstellung des für die Filteranströmgeschwindigkeit von $0,25 \text{ m s}^{-1}$ benötigten Volumenstroms wurde der Ölnebel in einer Mischkammer mit einem partikelfreien, trockenen Luftstrom gemischt und im Anschluss in die Filterkammer geleitet. Durch die Überwachung von Absolutdruck und Temperatur auf der Rohgasseite während der gesamten Versuchszeit ließ sich auch bei Änderung derselben die Filtrationsgeschwindigkeit konstant halten. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 3 schematisch dargestellt.

Die verwendeten Filter bestanden jeweils aus einer einzelnen Lage der in Abschn. 2.1 gelisteten Glasfaserfiltermedien, die mit einem Stützgitter auf der Filterabströmseite in einen Klemmrahmen gespannt (s. Abb. 4) und in die Filterkammer verbaut wurden. Die effektive Filterfläche war eine flache quadratische Fläche mit einer Breite und Höhe von 8 cm. Der Beitrag des Stützgitters zum Gesamtdruckverlust betrug unter 0,1 mbar.

Während des gesamten Versuchsablaufs wurde der Differenzdruck über das Medium und die Menge des rückseitig abfließenden Öls (Drainage) gemessen und aufgezeichnet. Vor jedem Versuch wurde die Tropfengrößenverteilung im Rohgas mit einem SMPS bei einer Ölkonzentration von 10 mg m^{-3} gemessen, anschließend der Versuch gestartet und bei 10 mg m^{-3} Rohgaskonzentration die Tropfengrößenverteilung im Reingas gemessen. Nach dieser Messung wurde die Rohgaskonzentration auf ca. 600 mg m^{-3} erhöht und das Medium mit Öl beladen, bis das Einsetzen der Drainage gemessen werden konnte. Es folgte eine erneute Verringerung der Rohgaskonzentration auf 10 mg m^{-3} und eine weitere Messung der Tropfengrößenverteilung im Reingas. Um Re-Entrainment abschätzen zu können, wurde zusätzlich eine Messung bei abgestellter Aerosolerzeugung durchgeführt. Für sämtliche Medien war die sekundäre Penetration durch Re-Entrainment im submikronen Bereich gegenüber der Primärpenetration anzahlbezogen um

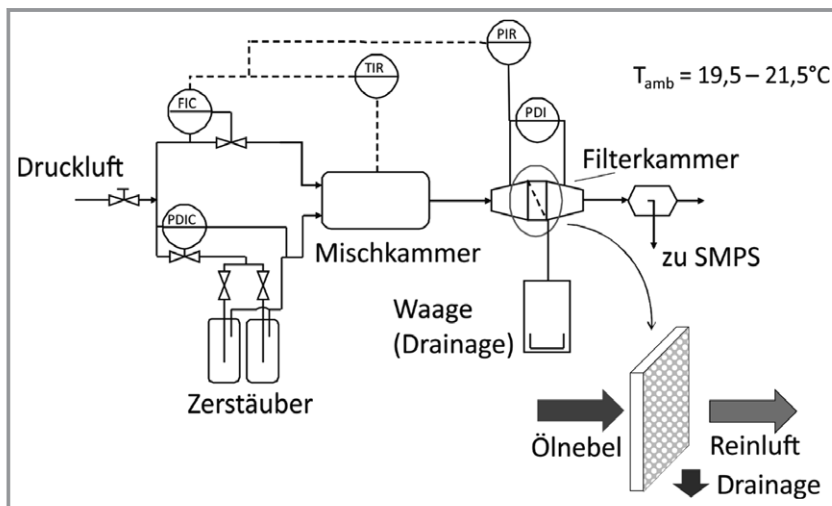


Abbildung 3. Schematischer Aufbau des Filterprüfstands.

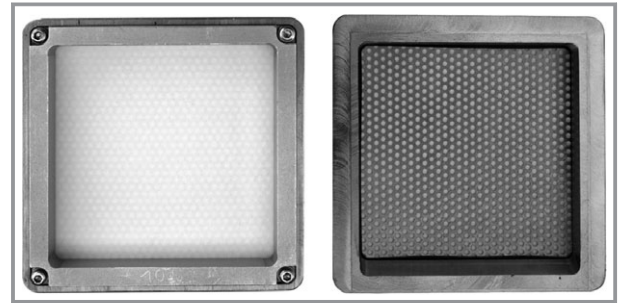


Abbildung 4. Einzellage eines verwendeten Filtermediums im Klemmrahmen. Links: Blick auf Anströmseite; rechts: Blick auf Abströmseite mit Stützgitter.

etwa eine Größenordnung kleiner, allerdings zeigte sich hier keine stabile Größenverteilung. Anschließend wurde der Luftstrom abgestellt, das Filter ausgebaut und die Ölsättigung der Lage durch Wiegen bestimmt. Um den Einfluss des Einspannens der Lage im Klemmrahmen zu eliminieren, wurden die Ränder vor dem Wiegen entfernt. Für jedes Medium wurden drei Versuche durchgeführt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Strukturcharakterisierung

Abb. 5 zeigt die kumulative Verteilung der Porengrößen für die fünf betrachteten Medien, bestimmt mithilfe der Kapillarflussporometrie. Für keines der Medien wurde Poren größer als $40 \mu\text{m}$ Durchmesser ermittelt, die kleinsten messbaren Porendurchmesser lagen bei etwa $2,5 \mu\text{m}$, da bei den für kleinere Durchmesser erforderlichen Drücken die Medien zerstört werden würden. Die mittleren Porendurchmesser betragen zwischen ca. $4 \mu\text{m}$ für das Medium Phob 1 und $15 \mu\text{m}$ für die Medien Phil 3 und Phob 2. Das Medium Phob 1 weist von den untersuchten Medien die feinsten Poren auf, mit einem maximalen Porendurchmesser von $23,5 \mu\text{m}$ (vgl.: $22 \mu\text{m}$ nach ASTM F316) und einem mittleren Porendurchmesser von $3,75 \mu\text{m}$. Die Kurvenverläufe für die Medien Phil 1 und Phil 2 ähneln sich insbesondere im Bereich kleiner Porendurchmesser, jedoch ist der Durchmesser der größten Pore von Phil 2 etwa $2 \mu\text{m}$ größer als die größte Pore von Phil 1. Die Medien Phil 3 und Phob 2 zeigen nahezu identische Kurvenverläufe.

Abb. 6 zeigt die jeweils für die gleichen Medien mittels Bildanalyse aus REM-Aufnahmen bestimmten kumulativen Verteilungen der äquivalenten Porengrößen. Der zunächst auffälligste Unterschied zu den Ergebnissen aus den Messungen mit Kapillarflussporometrie zeigt

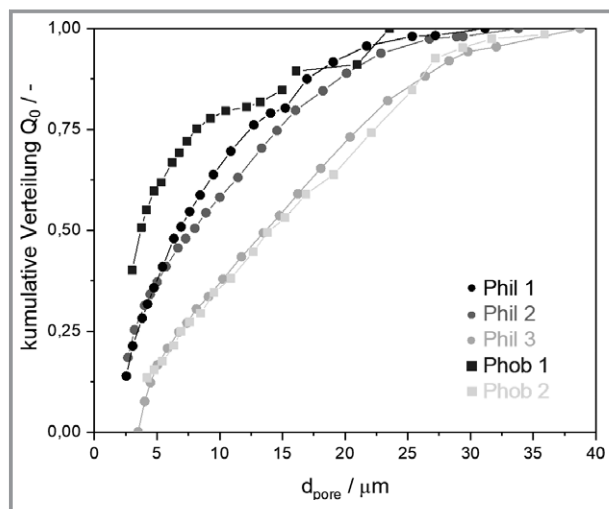


Abbildung 5. Kumulative Porengrößenverteilung für die fünf geprüften Medien, gemessen mittels Kapillarflussporometrie.

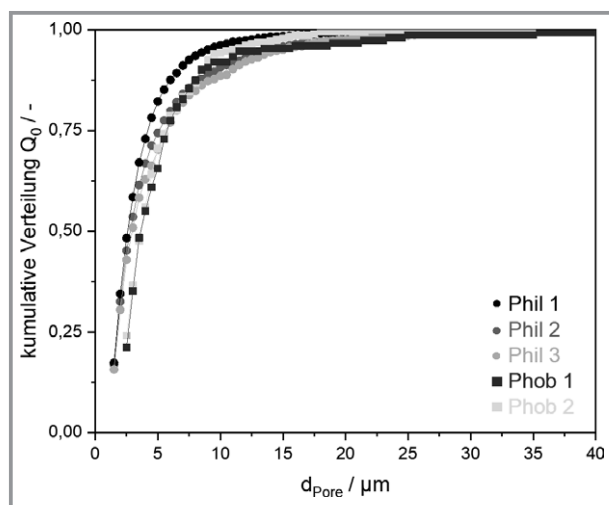


Abbildung 6. Kumulative Porengrößenverteilung für die fünf geprüften Medien, gemessen mittels Bildanalyse.

sich in der Breite der Verteilungen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Medien sind deutlich geringer, die Standardabweichungen der Porendurchmesser für die einzelnen Medien sind niedriger und es wurden für alle Medien sehr wenige Poren mit Durchmessern $> 20 \mu\text{m}$ gemessen. Die mittleren Porendurchmesser liegen zwischen $2,5$ und $5 \mu\text{m}$.

Die deutlichen Unterschiede, die sich durch die beiden Methoden ergeben, sind insbesondere in den Annahmen begründet, die zur Porendurchmesserberechnung bei der Bildanalyse getroffen wurden. Es wurde angenommen, dass die Porenöffnungen den Flächen zwischen sich kreuzenden Fasern entsprechen, wobei der Abstand sich scheinbar kreuzender Fasern in Tiefenrichtung nicht (bzw. nur eingeschränkt, bedingt durch Helligkeitsunterschiede) berücksichtigt werden konnte. Es können zudem lediglich Infor-

mationen über oberflächennahe Fasern und nicht aus dem Medieninneren gewonnen werden.

Die mittels Kapillarflussporometrie ermittelten Porengrößenverteilungen lassen erwarten, dass Phob 1 den höchsten Druckverlust aufgrund des höchsten Anteils kleiner Poren und Phil 3 und Phob 2 den geringsten Druckverlust aufweisen. Nach den Ergebnissen der Bildanalysen wäre Phil 1 das Medium mit dem höchsten und Phob 1 das mit dem geringsten zu erwartenden Druckverlust.

3.2 Benetzbarkeit mit Öl

Tab. 3 listet die Oleophobiegrade nach DIN EN ISO 14419 der geprüften Medien auf. Alle drei oleophilen Medien waren vollständig mit Öl benetzbar. Von den beiden oleophoben Medien war Phob 2 weniger stark oleophob als Phob 1, wobei bei beiden Medien die Anströmseite stärker oleophobisiert war als die Abströmseite.

Tabelle 3. Oleophobizität der verwendeten Medien nach DIN EN ISO 14419.

Medium	Anströmseite	Abströmseite
Phil 1	0	0
Phil 2	0	0
Phil 3	0	0
Phob 1	6	4
Phob 2	4	1,5

Aufgrund der ermittelten Oleophobizitäten ist zu erwarten, dass die Medien Phil 1, Phil 2 und Phil 3 nach dem Film-Kanal-Modell von Kampa et al. [8] anfänglich Ölkanaäle ausbilden und kurz vor dem stationären Zustand einen Ölfilm auf der Filterabströmseite aufbauen. Die Medien Phob 1 und Phob 2 hingegen bilden den Film anfänglich an der Filteranströmseite aus und anschließend die Kanäle, womöglich in unterschiedlicher Ausprägung aufgrund der unterschiedlichen Oleophobizitäten. Die Abfolge dieser Mechanismen sollte sich im Druckverlustverlauf als Drucksprung (Film) bzw. linearer Druckanstieg (Kanal) äußern.

3.3 Filtrationsversuche

In Abb. 7 sind die Verläufe des Druckverlusts über die aufgegebene Ölmasse aufgetragen. Mit etwa 3 mbar haben die Medien Phil 3 und Phob 2 den geringsten Anfangsdruckverlust, Phob 1 mit 9 mbar hingegen den höchsten. Phil 2 mit 4 mbar und Phil 1 mit 4,8 mbar liegen dazwischen. Bei zunehmender Ölbeladung zeigen die oleophilen Medien einen zunächst näherungsweise linearen Druckverlustanstieg, bevor der Druckverlust sprunghaft ansteigt und

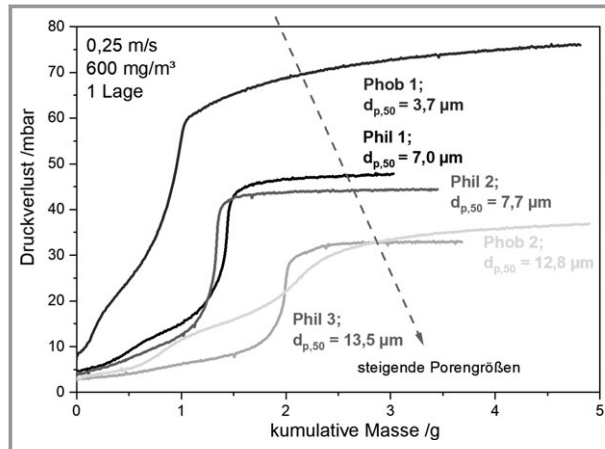


Abbildung 7. Druckverlust jeweils einer Lage der verwendeten Medien über aufgegebenen Ölmasse.

schließlich im stationären Zustand konstant bleibt. Das Medium Phob 1 zeigt zu Beginn der Ölbeladung einen ausgeprägten Drucksprung und geht dann in einen näherungsweise linearen Anstieg des Druckverlusts über. Der weitere Anstieg des Druckverlusts geht bei Erreichen des stationären Zustands gegen 0. Bei dem Medium Phob 2 sind keine derartig scharf abgegrenzten Bereiche des Druckverlustanstiegs zu beobachten. Im stationären Zustand beträgt der Druckverlust der Medien das etwa 8- bis 10-Fache des Anfangsdruckverlusts. Dabei hat wieder Phil 3 den geringsten und Phob 1 den höchsten Druckverlust.

Sowohl Anfangs- als auch Enddruckverlust zeigen eine gute Korrelation zu den mit der Kapillarflussporometrie bestimmten Porengrößenverteilungen der Medien. Die Medien Phil 3 und Phob 2, welche die näherungsweise gleiche Porengrößenverteilung aufweisen, stimmen auch im Anfangsdruckverlust annähernd überein, wobei der Enddruckverlust beim Medium Phob 2 geringfügig höher ist, auch bedingt durch dessen im stationären Zustand höhere Sättigung (s. Tab. 4). Das Medium Phob 1, das von allen Medien die feinste Porenstruktur aufweist, liegt auch im Druckverlust deutlich über den anderen Medien.

Tabelle 4. Sättigung im stationären Zustand der verwendeten Medien.

Medium	Sättigung [-]
Phil 1	0,397
Phil 2	0,398
Phil 3	0,480
Phob 1	0,371
Phob 2	0,653

Der Verlauf der Kurven korreliert mit den Öltransportmechanismen in den Medien, die nach dem Film-Kanal-Modell von Kampa et al. [8] im Wesentlichen aus Kanal-

und Filmbildung bestehen. Die Abfolge der einzelnen Mechanismen bei Ölbeladung hängt von deren Benetzbarkeit ab, was auch in den Versuchsergebnissen sichtbar war. Alle oleophilen Medien weisen zunächst den für die Kanalbildung typischen linearen Druckverlustanstieg auf und erst unmittelbar vor dem stationären Zustand einen von der Filmbildung auf der Filterabströmseite verursachten Drucksprung. Dass die Filmbildung bei oleophoben Medien auf der Anströmseite erfolgt, ist bei dem Druckverlustverlauf des Mediums Phob 1 gut sichtbar. Hier erfolgt der Drucksprung zu Beginn der Ölbeladung und erst danach der Druckanstieg durch Kanalbildung. Allerdings ist der Druckverlustanstieg im Kanalbereich nicht typisch linear ausgeprägt, sondern flacht bei zunehmender Beladung ab. Das ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass nur eine Filterlage mit einer Dicke von 0,8 mm verwendet wurde und die Bildung von Kanälen in Mehrlagensandwiches wesentlich deutlicher ausgeprägt vorliegt und besser abgrenzbar ist. Das Medium Phob 2 weist möglicherweise aufgrund seiner relativ geringen Oleophobizität (s. Tab. 3) keinen derart abgegrenzten Sprung im Druckverlustverlauf durch die Ausbildung eines Films auf. Auch hier flacht die Kurve im Kanalbereich ab.

Nahezu alle Medien zeigen zudem relativ zu Beginn der Beladung (< 1 g kumulative Ölmasse) geringere Zwischenanstiege des Druckverlusts. Ursache hierfür könnte ein Strukturgradient innerhalb der einzelnen Lagen sein, bedingt durch den Herstellungsprozess (Blattbildung auf einem Schrägsieb). Strukturuntersuchungen mittels Mikrocomputertomografie könnten hier weiteren Aufschluss geben.

Abb. 8 zeigt mittels SMPS bestimmte Fraktionsabscheidegrade für die fünf geprüften Medien im Anfangszustand und im stationären Zustand. Die MPPS liegt für alle Medien anfänglich bei etwa 100 nm, mit Ausnahme von Phob 1 mit einer MPPS von ca. 60 nm. Das Medium Phob 1 weist im trockenen Zustand für fast alle Größenklassen den höchsten Abscheidegrad (> 0,8) auf. Phil 1 und Phil 2 zeigen recht ähnliche Verläufe des Abscheidegrades über der Partikelgröße mit einem Abscheidegrad von etwa 0,7 an der MPPS. Die niedrigsten Abscheidegrade weisen die Medien Phil 3 mit 0,4 und Phob 2 mit 0,5 am MPPS auf. Der Unterschied zwischen diesen beiden Medien lässt sich nicht allein auf die gewonnen strukturellen Größen zurückführen und bedarf weiterer Untersuchung.

Bei Betrachtung der Fraktionsabscheidegrade der Medien im stationären Zustand ist deutlich zu erkennen, dass sich der Abscheidegrad insbesondere für Tröpfchen kleiner als 100 nm z.T. deutlich verschlechtert und die MPPS sich hin zu kleineren Tropfen verzieht. Grund hierfür ist zum einen die Verringerung effektiver Filterfläche durch Koaleszenz und Kanalbildung, zum anderen durch die Sättigung der Medien eine geringere effektive Durchströmungsfläche und dadurch höhere interne Geschwindigkeiten, was zu einer Verschlechterung der diffusiven Abscheidung führt. Trägheitsabscheidung hingegen wird durch die höheren Geschwindigkeiten begünstigt, was die

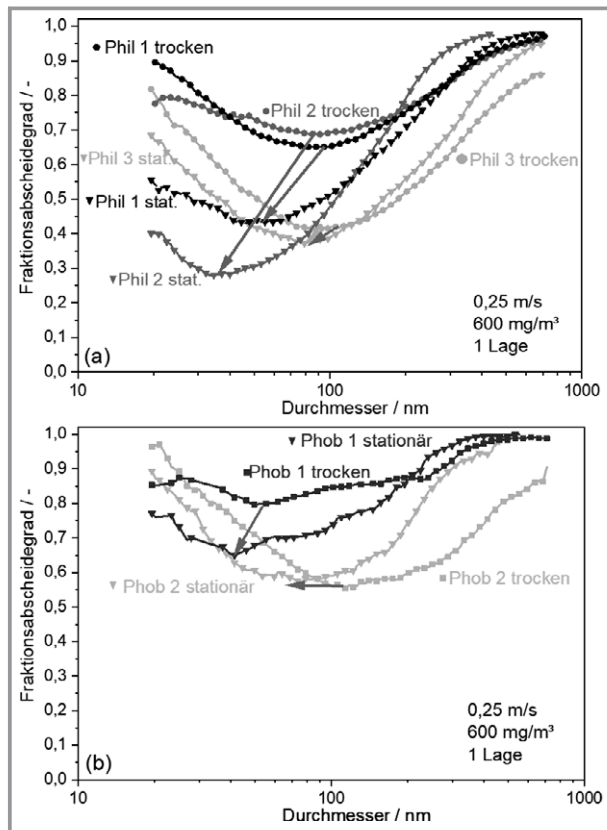


Abbildung 8. Fraktionsabscheidegrade der Filter zu Beginn der Beladung mit Öl und im stationären Zustand für oleophile (a) und oleophobe (b) Medien. Die Verschiebung der MPPS ist jeweils durch einen Pfeil gekennzeichnet.

Abscheidegrade für Tropfen größer 100 nm erhöht. Zusätzlich wirkt der im stationären Zustand ausgebildete Ölfilm als Trägheitsabscheider, wodurch sich die Abscheidung größerer Tröpfchen noch einmal verbessert.

Phil 2 verliert besonders deutlich an Abscheideeffizienz für Tropfen < 100 nm. Da sich die Sättigung im stationären Zustand nicht signifikant höher war als die der anderen Medien, ist anzunehmen, dass bei Phil 2 bei Beladung mit Öl ein besonders hoher Anteil an filtrationsrelevanten Bereichen mit Öl gesättigt wird. Der Fraktionsabscheidegrad von Phob 2 hingegen ändert sich trotz der hohen Sättigung im stationären Zustand weniger signifikant, auch wenn es hier ebenfalls zu einer Verschlechterung des Abscheidegrades für kleine Tröpfchen kommt. Offensichtlich wurden hier weniger filtrationsrelevante Bereiche mit Öl gesättigt. Der Abscheidegrad für Tropfen größer als 200 nm nimmt jedoch wesentlich deutlicher zu als bei den anderen Medien. Da Phob 2 die höchste Sättigung im stationären Zustand aller Medien aufwies, waren die internen Gasgeschwindigkeiten im Medium zu Versuchsende höher als die der anderen Medien und somit spielte die Verbesserung der Trägheitsabscheidung eine größere Rolle.

Die Beiträge von Film und Kanal zur Änderung des Fraktionsabscheidegrades sind bei mehrlagigen Filtersandwiches

besser separierbar und damit eindeutiger interpretierbar [9, 10]. Jedoch wird die Versuchsdauer bei Verwendung von Mehrlagensandwiches teils deutlich erhöht und die Reingaskonzentrationen bei der gewählten Rohgaskonzentration von 10 mg m^{-3} auf ein Maß verringert, bei dem aussagekräftige Messungen mit dem SMPS kaum möglich sind.

3.4 Einfluss des Stützgitters

Um den Einfluss des Stützgitters auf die Öltransportmechanismen abschätzen zu können, wurden zusätzlich ein oleophiles (Phil 1) und ein oleophobes Medium (Phob 2) mit einem weiteren Stützgitter getestet. Bei diesem Stützgitter handelte es sich um ein Steggitter mit vier Stegen, die ca. 10 % der Abströmfläche bedeckten.

Abb. 9 zeigt die Druckverlustverläufe für die Medien Phil 1 (a) und Phob 2 (b) über der aufgegebenen Ölmasse, jeweils mit Lochblech und Steggitter als Stützstruktur. Der Enddruckverlust des Mediums Phil 1 mit dem Steggitter fällt um etwa 4 mbar höher aus als mit dem Lochblech als Stützstruktur, während die Druckverlustverläufe für das Medium Phob 2 nahezu identisch sind. Da das Medium Phil 1 im Kanalbereich für beide Stützstrukturen ebenfalls einen fast identischen Druckverlustverlauf zeigt, ist zu vermuten, dass

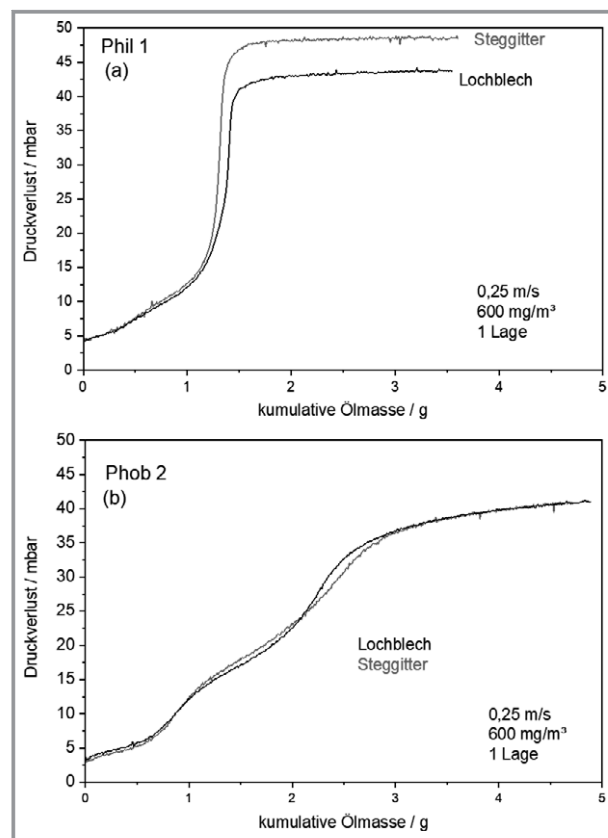


Abbildung 9. Druckverlust jeweils einer Lage der Medien Phil 1 (a) und Phob 2 (b) mit zwei verschiedenen Stützgittern über aufgebener Ölmasse.

die Wahl der Stützstruktur lediglich einen signifikanten Einfluss auf die Filmbildung auf der Filterabströmseite hat und nicht auf die Kanalbildung und Endsättigung.

4 Fazit und Ausblick

Fünf verschiedene Glasfasermedien wurden mithilfe der Kapillarflussporometrie und der Bildanalyse elektronenmikroskopischer Aufnahmen hinsichtlich ihrer Porengrößen analysiert und ihre Betriebseigenschaften in Filtrationsversuchen charakterisiert. Bei der Strukturcharakterisierung zeigte sich beim Vergleich zwischen den Porengrößenverteilungen aus Kapillarflussporometrie und Bildanalyse deutliche qualitative und quantitative Abweichungen. Die Bildanalyse ergab wesentlich engere Verteilungen mit ähnlichen mittleren Porendurchmessern für alle Medien, während die Kapillarflussporometrie breite Verteilungen mit größeren Abweichungen lieferte. In den Filtrationsversuchen zeigte sich bezüglich der Druckverluste eine sehr gute Korrelation mit den Ergebnissen der Kapillarflussporometrie, weshalb diese als Charakterisierungsmethode für Porengrößen der verwendeten Bildanalysemethode vorzuziehen ist. Ein problematischer Aspekt bei der Bildauswertung ist ein mangelnder Informationsgehalt über das Medieninnere sowie die nicht immer eindeutige Lage der Fasern in der Bildtiefe. Hier könnte zukünftig etwa die Anwendung der Mikrocomputertomografie zur Strukturcharakterisierung für einen höheren Informationsgehalt hilfreich sein.

Die Untersuchung der Medien auf ihren Oleophobiegrad nach DIN EN ISO 14419 erlaubt Rückschlüsse über den qualitativen Verlauf des Druckverlusts über der Beladung mit Öl. Oleophile Medien zeigten einen charakteristischen Verlauf der Kurven nach dem Film-Kanal-Modell von Kampa et al. [8] mit einem Kanalbereich zu Beginn und einem Sprung vor dem stationären Zustand, während bei dem untersuchten stark oleophoben Medium der Sprung zu Beginn auftrat und erst dann der Anstieg durch Kanalbildung erfolgte. Das schwach oleophobe Medium zeigte keine derart abgegrenzten Bereiche im Druckverlustverlauf.

Der Abscheidegrad der unbeladenen Medien korrelierte in erster Näherung mit den Porendurchmesserverteilungen. Im stationären Zustand zeigten sich jedoch Unterschiede, die nicht allein mit unterschiedlichen Porendurchmesserverteilungen erklärbar sind. Wichtige weitere Faktoren, die hier eine Rolle spielen könnten, sind Faserdurchmesserverteilungen und Benetzbarkeit der Medien, die entscheidend dafür sein könnten, welche Bereiche des jeweiligen Mediums sich mit Öl sättigen und somit nicht mehr zur Filtration zur Verfügung stehen. Daher sollte die Ölverteilung im Medium auf makro- und mikroskopischer Ebene genauer untersucht werden.

Textile Daten können für eine erste Abschätzung des Betriebsverhaltens insbesondere der unbeladenen Filter zwar genutzt werden, jedoch spielen mit zunehmender Beladung des Mediums mit Öl zusätzlich weitere Faktoren eine Rolle, die zum jetzigen Zeitpunkt erst noch näher untersucht wer-

den müssen. Neben weiteren Strukturdaten der Medien wie Faserzusammensetzung, -orientierung, räumlicher Verteilung, seien hier auch die verwendete Stützstruktur und die Betriebs- und Öleigenschaften genannt.

Wir bedanken uns für die Finanzierung der Forschungsarbeiten im Rahmen einer Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Formelzeichen

d	[μm]	Durchmesser
Q	[-]	Summenverteilung

Indizes

0	anzahlgewichtet
3	volumen-/massengewichtet
P	Pore
P ₅₀	mittlere Pore

Abkürzungen

MPPS	most penetrating particle size
SMPS	scanning mobility particle sizer

Literatur

- [1] G. Belforte, T. Raparelli, A. Trivalla, *Exp. Tech.* **2012**, 38 (2), 35–46. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00806.x>
- [2] H. Sauter, *Analysen und Lösungsansätze für die Entwicklung von innovativen Kurbelgehäuseentlüftungen*, Dissertation, Universität Bayreuth **2004**.
- [3] W. Krause, *Ölabscheidung in der Kurbelgehäuseentlüftung*, Dissertation, Universität Kaiserslautern **1995**.
- [4] H. Sauter, J. Müller, C. Jenkins, *Measurement Technology to Characterize the Aerosol of the Crankcase Ventilation*, Cambridge Particle Meeting, Cambridge, UK, Juni **2014**.
- [5] ASTM F316-03(2011), *Standard Test Methods for Pore Size Characteristics of Membrane Filters by Bubble Point and Mean Flow Pore Test*, ASTM International, West Conshohocken, PA **2011**.
- [6] DIN EN ISO 14419:2010-08, *Textilien – Oleophobie – Prüfung der Ölbeständigkeit mit Hilfe von Kohlenwasserstoffen*, Beuth-Verlag, Berlin **2010**.
- [7] F. Erbe, *Kolloid-Z.* **1933**, 63, 277–285. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01422935>
- [8] D. Kampa, S. Wurster, J. Buzengeiger, J. Meyer, G. Kasper, *Int. J. Multiphase Flow* **2014**, 58, 313–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.10.007>
- [9] H. E. Kolb, A. K. Watzek, V. Zaghini Francesconi, J. Meyer, A. Dittler, G. Kasper, *J. Aerosol Sci.* **2018**, 123, 219–230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.05.013>
- [10] T. Penner, J. Meyer, G. Kasper, A. Dittler, *Sep. Purif. Technol.* **2019**, 211, 697–703. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.10.037>