



# 1

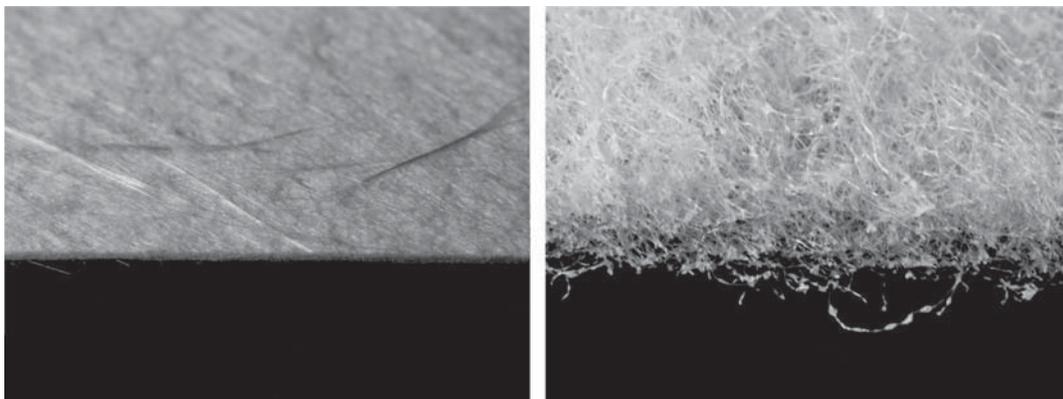
## Motivation und Überblick

### 1.1 Motivation, Zielsetzung und Strategie der Arbeit

Ölnebel, also Aerosole mit Öltröpfchen auf submikroner Größenskala, treten in zahlreichen Anwendungen auf und sind dort in der Regel unerwünscht. Ein prominentes Anwendungsbeispiel ist die Kurbelgehäuseentlüftung bei Verbrennungsmotoren [Krause95]. In der automotiven Kurbelgehäuseentlüftung werden große Tropfen meist durch Impaktion an Prallplatten oder durch Zentrifugalabscheider vorabgeschieden, während die verbleibenden kleinen Tröpfchen mit Hilfe von Zyklonen aus dem Gasstrom entfernt werden [Durst02, Sauter01]. Bei Schwerlastmotoren hingegen kommen filternde Abscheider wie Betten oder Wirrwarrvliese, welche aus synthetischen oder metallischen Fasern bestehen, zum Einsatz. Vergleichbar grob strukturierte Abscheider dienen auch der Abscheidung von Kühlschmierstoffen bei spanenden Bearbeitungsverfahren [Leith96b, Piacitelli01].

Ein weiterer Anwendungsbereich der Ölnebelabscheidung ist der der ölgeschmierten Schraubenkompressoren, welcher der Motivation die-

ser Arbeit zugrunde liegt. In die Schrauben zur Luftverdichtung wird etwa 5 kg Öl pro kg Luft zum Kühlen, zum Dichten des Volumens zwischen den Schrauben und zur Schmierung eingespritzt. Infolge der bei der Rotation der Schrauben auftretenden Scherkräfte wird dieses Öl in feinste Tröpfchen dispergiert. Typischerweise wird nach einer Vorabscheidung durch eine zyklonartige Einströmung oder durch ein Prallblech der Ölgehalt auf etwa 1-10 g Öl pro Normkubikmeter Ansaugluft reduziert. Hieran schließt sich meist ein zweistufiges Filtersystem an, welches die Ölkonzentration um etwa drei Größenordnungen je Filterstufe reduziert. Das erste Filter befindet sich im Druckbehälter des Kompressors. Nach dem Kühler des Verdichters kann sich noch ein weiteres, dem Kompressor nachgeschaltetes Filter zur Ölnebelabscheidung anschließen. Als jeweilige Filter werden vorwiegend auf ein zylindrisches Lochblech gewickelte Elemente aus mehreren Lagen Glasfaserpapier eingesetzt [Belforte12]. Es können für Öl benetzbare oder nicht-benetzbare Glasfasermedien oder Kombinationen davon zum Einsatz kommen. Diese Glasfasermedien sind ungefähr ein bis zwei Größenordnungen feiner strukturiert als die bei der Kurbelgehäuseentlüftung oder bei der Kühlschmierstoffabscheidung verwendeten Medien (Abb. 1.1). Daraus resultiert eine höhere Abscheidewirkung der Glasfaserpapiere, welche allerdings auch mit einem höheren Durchströmungswiderstand einhergeht. Dieser ist mit einem höheren Druckverlust und somit höheren Betriebskosten verbunden. Generell sind die Hersteller solcher Filterelemente bestrebt, bei einer geforderten Abscheidelei-



**Abbildung 1.1:** Schnitt eines Glasfasermediums (Dicke 0,5 mm, links) und eines offenen Vlieses (Dicke 5 mm, rechts). Die Schnittkante ist jeweils 1,2 cm lang.



stung den Druckverlust, also die Kosten, so niedrig wie möglich zu halten. Zu einer Optimierung des Druckverlustes bedarf es jedoch des Verständnisses, welche Vorgänge sich im Inneren dieser mehrlagigen Filter abspielen und wie sich diese auf den Druckverlust auswirken. Dies ist die zentrale Fragestellung dieser Arbeit.

Da sich Ölnebelfilter nach einer kurzen Beladungsphase für die meiste Zeit ihres Betriebes in einem stationären Zustand befinden, handelt die Arbeit von der Beschreibung der Transportvorgänge und der das Filter charakterisierenden Messgrößen, wie dem Druckverlust, in diesem stationären Zustand. Es stellt sich jedoch heraus, dass die Transportvorgänge über die Beladungsphase zugänglich gemacht werden können. Hieraus können dann auch Rückschlüsse auf deren Zusammenspiel im stationären Zustand abgeleitet werden.

Das Auftreten verschiedener physikalischer Effekte auf makroskopischer Skala sowie die unterschiedlichen Systemantworten von benetzbaren und nicht-benetzbaren Medien erfordern die Entwicklung eines stark experimentell gestützten Modells. Um den Einfluss des Filtergehäuses zu eliminieren und um sich nur der Vorgänge innerhalb der Filtermedien selber zu widmen, werden die experimentellen Untersuchungen statt an ganzen Elementen [Mölter-Siemens12] an flachen, einzeln konfigurierbaren Filterlagenpaketen durchgeführt.

Die Beschreibung der experimentellen Messtechnik findet in Kap. 2 statt. Hier wird außerdem auf die Frage nach geeigneten Betriebsbedingungen für die Untersuchungen dieser Arbeit eingegangen, da bei kompressorischen Anwendungen typischerweise 8 bar absolut und 80 °C vorherrschen. Kap. 3 beschäftigt sich mit Phänomenen, bei welchen das Öl in Tropfenform vorliegt. In Kap. 4 werden zwei Modelle eingeführt, welche die über eine Filterlage gemittelte Ölverteilung in Strömungsrichtung ratenbasiert beschreiben. Hier finden sich auch Überlegungen zu den Zeitskalen der Prozesse. Auf den Zusammenhang zwischen Ölverteilung und Druckverlust wird in Kap. 5 eingegangen. Diesem liegt die zentrale Errungenschaft dieser Arbeit, das Kanal-



Film-Modell, zugrunde. Mittels dieses semiquantitativen mechanistischen Modells lässt sich der stationäre Druckverlust von Filterlagenkombinationen vorhersagen.

## 1.2 Überblick über bisherige Untersuchungen

Für unbeladene Luftfilter ist eine Vielzahl an Untersuchungen bekannt [Brown93, Davies73]. Die daraus resultierenden Kenntnisse hinsichtlich Druckverlust und Abscheidegrad können unabhängig davon, ob die abzuscheidenden Partikel fest oder flüssig sind, auf das Filter angewendet werden. Sobald jedoch eine Abscheidung und die damit verbundene Ansammlung abgeschiedener Partikel im Filterinneren stattfindet, unterscheiden sich die Verhaltensweisen der Filter grundlegend.

Bei der Staubabscheidung wurde die Beladungscharakteristik einschlägig untersucht [Hinds97, Stenhouse92]. Die Staubpartikeln verbleiben weitestgehend am Abscheideort und bilden mit zunehmender Beladung kompakte oder dendritenartige Strukturen aus [Kanaoka80, Kasper09, Kasper10, Payatakes76], welche bei noch weiterer Beladung zum Verstopfen des Filters und zu anschließender Kuchenbildung führen [Walsh96a].

Öltröpfchen hingegen koaleszieren zu großen Tropfen [Briscoe91, Eggers99, Rein93, Yarin06]. Das koaleszierte Öl wird unter dem Einfluss der Strömungskräfte und der Gravitation durch das Filter transportiert. Dieser Transport hängt von vielen Eigenschaften wie Medienstruktur, Grenzflächenspannungen, Kontaktwinkel sowie Viskosität ab und ist infolge seiner Komplexität kaum verstanden. Die Transportphänomene beeinflussen jedoch entscheidend den Druckverlust, die Abscheidung und die Sättigung. Zur Ergründung der Transportphänomene können Untersuchungen von Teilaspekten hilfreich sein.

In porösen, undurchströmten Systemen [Dullien91, Schubert82], einschließlich Filtermaterialien [Gillespie59, Marmur97] und Faserarrays [Lukas06, Princen69] war die Flüssigkeitsverteilung Gegenstand von Untersuchungen, welche sich infolge der Kapillarität einstellt. Für das durchströmte Filter finden sich zwei Herangehensweisen.

Bei der einen wird versucht, die komplexen Zusammenhänge zunächst an Einzelfasern zu verstehen. Hierbei werden an erster Stelle die Kräfte und die daraus resultierenden Tropfenformen abhängig von den Grenzflächeneigenschaften beschrieben [Carroll76, McHale01, Neimark99, Quere99, Shin04, Wagner90]. Die auftretenden Kräfte bei der Bewegung einzelner Tropfen entlang der Faser wurden in Abhängigkeit von der Strömung bestimmt [Dawar06, Dawar08, Mullins05, Mullins06a], oder auf direktem Wege mit dem Rasterkraftmikroskop [Mead-Hunter10] gemessen. Diese Beobachtungen lassen sich anwenden, um den Druckverlust von Faserarrays [Kirsch78] zu beschreiben, oder sie dienen als Eingangsgrößen für die numerische Simulation mikroskopischer Filterausschnitte [King11].

Bei der anderen Herangehensweise wird versucht, die Phänomene ausgehend vom Verhalten des ganzen Filters zu ergründen. Hinsichtlich des Druckverlustanstieges mit zunehmender Ölbeladung hat sich für benetzbare Filter eine Beschreibung in vier Phasen etabliert [Contal04]:

- Abscheidung einzelner Tröpfchen. Geringer Anstieg des Druckverlustes bis zu einem Knick [Walsh96b] und geringe Abnahme des Abscheidegrades.
- Koaleszieren von Tropfen und deren Transport durch Strömung und Kapillarität. Weiterer Anstieg des Druckverlustes und starker Abfall des Abscheidegrades.
- Bildung eines Films auf der Oberfläche. Sprung im Druckverlust und Anstieg im Abscheidegrad.
- Drainage des Öls und stationärer Zustand.



Auch wenn diese Beobachtungen als weitgehend bestätigt gelten [Charvet08, Frising05b], werden diese im Rahmen dieser Arbeit in Details revidiert und um wesentliche Aspekte erweitert. Neben dem Druckverlust wurde in der Literatur auch die Ölverteilung im Filter untersucht. Obwohl diese in Strömungsrichtung nicht gleichmäßig ist [Andan08, Raynor00], was ein Indiz für das Auftreten verschiedener Phänomene ist, existieren kapillarbasierte Ansätze zur Beschreibung der mittleren Sättigung [Liew85, Mead-Hunter11, Mullins07a].

Wie eingangs beschrieben, kommen neben den hier verwendeten Glasfasermedien auch ähnlich strukturierte, allerdings weit gröbere Medien oder Drahtgestricke vor. Anleihen aus solchen Studien können nur begrenzt übernommen werden, da bei diesen die Kapillarkräfte geringer sind und die Schwerkraft eine entscheidende Rolle spielt [Boudy00, Bürkholz70, El-Dessouky00, Laminger11b]. In die Klasse der gröber strukturierten Abscheider reihen sich auch Untersuchungen an Füllkörperkolonnen ein [Ellman90, Gianetto92, Nguyen05], welche jedoch häufig auf die Bestimmung der dynamischen und statischen Sättigung abzielen [Spechina77, Stein00].

Ein weiteres eng mit der Ölnebelfiltration verwandtes Gebiet ist die Flüssig-Flüssig-Separation, beispielsweise von Wasser-Öl-Gemischen durch Faserfilter oder Schüttungen. Hierzu wurden in den letzten Siebzigern eine Vielzahl an Studien durchgeführt [Davies69, Hazelett69, Spielmann72a, Sherony71a, Sherony71b, Spielmann72b, Spielmann70, Rosenfeld74, Vinson70]. In diesen wurden sowohl Korrelationen für Abscheidegrad und Sättigung als auch Vorstellungen zum Transport der koaleszierten Flüssigkeit entwickelt. Der Ansatz von koaleszierten und in Strömungsrichtung transportierten Tropfen [Rosenfeld73] sowie von durch Kapillarkräfte getriebenem Transport in einzelnen Poren [Spielmann77] ist dort vertreten. Bei der Flüssig-Flüssig-Trennung herrscht kaum ein Dichteunterschied zwischen Trägerfluid und Partikeln, während dieser bei der Ölnebelfiltration drei Größenordnungen ausmacht. Ferner werden bei der Ölnebelfiltration ein bis zwei Größenordnungen höhere Geschwindigkeiten eingesetzt. Somit können, ver-

bunden mit der Uneinigkeit in den vorhandenen Vorstellungen der Tröpfchenabscheidung aus Flüssigkeiten, keine Resultate der erwähnten Untersuchungen auf die in dieser Arbeit vorherrschenden Bedingungen übernommen werden.

Zur Beschreibung der Ausbreitung von Flüssigkeit in von Luft durchströmten Porenräumen existieren Ansätze auf Mikro- und Makroebene. Die Mikroebene kann im Rahmen der Perkolationstheorie modelliert werden [Essam80], welche häufig zur Beschreibung der Gangliondynamik, also unter anderem Bewegung, Zusammenstoß, Koaleszenz, Auseinanderbrechen, Stranden und Remobilisierung, verwendet wird [Avraam95, Payatakes84]. Hierauf ließen sich quasi-ab-initio Simulationen der Zweiphasenströmung stützen, welche sehr rechenzeitaufwändig sind und deren Übereinstimmung mit realen Transportraten dahingestellt sei, weil nicht alle Realeffekte beschreibbar sind [Dietrich05]. Für die volumengemittelte, makroskopische Beschreibung dient in der Regel das Darcysche Gesetz [Darcy56] als Grundlage für ein gekoppeltes Gleichungssystem. Hierbei sind nicht nur die phänomenologischen Permeabilitäten sondern sogar auch die Form der Gleichungen Diskussionsgegenstand [Rothman90]. Schlussendlich gilt es jede Simulation mit Experimenten zu vergleichen, weshalb in dieser Arbeit experimentelle Untersuchungen an erster Stelle angesiedelt wurden.

Zur Beobachtung des Flüssigkeitstransportes im Porenraum des Filtermediums lägen tomographische Methoden nahe [Agranovski03, Charvet11, Hoferer06, Nguyen05]. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass dynamische Phänomene nur bei deren in-situ-Anwendung zugänglich gemacht werden können, da sich durch eine Strömungsabschaltung das Öl innerhalb von Sekunden umverteilt [Frising05a]. Die notwendige Zeitauflösung gekoppelt mit entsprechenden Anforderungen an die Ortsauflösung sind rein technisch zurzeit nicht realisierbar. Deswegen wurden die Transportphänomene durch Beobachtungen auf Mikro- und Makroebene unter Zuhilfenahme der Messgrößen von Sättigung, Abscheidegrad und Druckverlust ergründet.





# 2

## Experimentelle Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden die experimentellen Methoden und Vorgehensweisen erläutert. Vorab jedoch werden Überlegungen zur geeigneten Wahl der Betriebsbedingungen angestellt (Abschn. 2.1). Diese bilden den Ausgangspunkt für die Entwicklung des Messsystems. Nach einer Übersicht über den experimentellen Aufbau (Abschn. 2.2.1) wird auf die einzelnen Komponenten im Detail eingegangen. Diese umfassen die Erzeugung von Ölnebel (Abschn. 2.2.2), die Anlagensteuerung (Abschn. 2.2.3) und die Messwerterfassung (Abschn. 2.2.4), einschließlich der Messung von Tröpfchengrößenverteilungen (Abschn. 2.2.5). Besonderes Augenmerk bei Ölnebelversuchen liegt auch auf dem Ölwannefilm (Abschn. 2.2.6). An diesen Punkt knüpft die Beschreibung des Aufbaus der Filterkammer (Abschn. 2.2.7) sowie deren Onlinewägung (Abschn. 2.2.8) an. Nach einer Erläuterung der verwendeten Materialien (Abschn. 2.3) werden die notwendigen Schritte zur Durchführung der Versuche beschrieben (Abschn. 2.4). Die experimentelle Methode der Vorsättigung (Abschn. 2.5) rundet dieses Kapitel ab.

## 2.1 Wahl der Versuchsbedingungen

### Druckniveau

In der typischen Anwendung beim Schraubenkompressor werden die in dieser Arbeit untersuchten Ölnebelfilter nach dem Verdichten der Luft eingesetzt. Der Betriebsdruck liegt daher üblicherweise bei etwa 8 bar absolut. Das Durchführen der Experimente bei Umgebungsdruck würde die Messtechnik erheblich vereinfachen. Daher soll untersucht werden, inwiefern sich Aussagen zum Druckverlust bei atmosphärischen Bedingungen auf Überdruck übertragen lassen und umgekehrt. Dazu wurde eine eigene Reihe an Voruntersuchungen durchgeführt, indem ein trockenes Filter mit konstanten Geschwindigkeiten bei Absolutdrücken von 0,5 bis 8 bar durchströmt und der Druckverlust aufgenommen wurde.

Experimentell waren hierzu zwei Versuchsanordnungen nötig, eine für Absolutdrücke zwischen 2 und 8 bar und eine für 0,5 und 1 bar. Für die hohen Drücke gelangt Luft aus dem Druckluftnetz über einen Feindruckregler in einen Tank. Mit dem Feindruckregler lässt sich der Systemdruck im Tank regeln. Dies ist der Druck vor dem Filter, welches sich an den Tank anschließt. Nach dem Filter strömt die Luft über eine Drossel und einen Gasflussmesser in die Umgebung. Die Drossel dient der Einstellung der mittleren Anströmgeschwindigkeit des Filters, welche aus dem Gasfluss errechnet wurde. Als Filterhalterung wurde eine Sintermetallplatte eingesetzt. Für atmosphärischen Druck und Unterdruck kann nicht im Druck- sondern muss im Saugbetrieb gearbeitet werden. Deshalb befindet sich vor dem Tank der Gasflussmesser gefolgt von einer Drossel. Hinter dem Filter ist eine regelbare Pumpe angeordnet.

Es zeigt sich, dass der für eine feste Anströmgeschwindigkeit gemessene Druckverlust einer Filterlage vom Betriebsdruck abhängt (Abb. 2.1). Bei Drücken größer 3 bar verhält sich die Luft wie ein strömen-