



forschen.
vernetzen.
anwenden.

Innovationsreport 2025

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF-Forschungsvorhaben 01IF22456N / 22456 N

Fluid-Struktur-Oszillation zur Drainageoptimierung bei der Druckluftfiltration (VibraDrain)

Laufzeit:

01.05.2022 – 31.07.2025

Beteiligte Forschungsstelle(n):

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e. V. (IUTA)
Forschungsabteilung Filtration & Aerosolforschung

Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik
Lehrstuhl Maschinenbau

Schlussbericht vom 19.12.2025

zum IGF-Vorhaben FKZ 01IF22456N

Thema

„Fluid-Struktur Oszillation zur Drainageoptimierung bei der Druckluftfiltration (VibraDrain)“

Berichtszeitraum

01.05.2022 – 31.07.2025

Forschungsvereinigung

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e. V. (IUTA)

Bliersheimer Str. 58-60

D-47229 Duisburg

Forschungseinrichtung(en)

FE 1

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e. V. (IUTA)

Bliersheimer Str. 58-60

D-47229 Duisburg

FE 2:

Bergische Universität Wuppertal

Lehrstuhl Strömungsmechanik

Gaußstraße 20

42119 Wuppertal



Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung und abschließende Bewertung.....	3
2	Gegenüberstellung der geplanten und erzielten Ergebnisse	5
3	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	9
3.1	Charakterisierung von Öltröpfen auf typischen Vliesmedien	10
3.2	Analyse des Verhaltens von einzelnen Öltröpfen bei Vibrationsanregung des Vliesmediums	22
3.3	Analyse des Verhaltens von Öltröpfen bei Strömungsszillation	30
3.4	Untersuchung des Einflusses von Schwingungen auf Ölbeladung und Sättigungsdruck an Filtermedien	37
3.5	Entwicklung eines Funktionsmusters für die Vibrationsanregung und Funktionstests.....	41
4	Verwendung der Zuwendung.....	44
5	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	45
6	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	45
7	Wissenstransfer in die Wirtschaft	46
8	Durchgeführte Transfermaßnahmen.....	47
9	Geplante und durchgeführte spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	48
10	Literaturverzeichnis	48

1 Zusammenfassung und abschließende Bewertung

In diesem Projekt wurden die Effekte einer mechanischen Vibrationsanregung und einer Strömungsinduzierten Vibrationsanregung auf die Mobilisierung von Öltropfen an Filtervliesen untersucht und darauf aufbauend eine technische Maßnahme zur Verbesserung der Mobilisierung von Flüssigkeitsansammlungen auf der Reingasseite eines Filters erarbeitet. Durch das Einbringen einer Vibration kann eine verbesserte Drainage und gegebenenfalls eine Verringerung des Druckverlusts erzielt werden. In einzelnen Tests konnte eine Reduktion des Differenzdrucks von 12 mbar (ca. 11%) durch eine Vibrationsanregung nachgewiesen werden. Abbildung 1 zeigt schematisch die Situation in einem typischen Druckluftfilter hinsichtlich der Flüssigkeitsansammlung und der Strömung mit einer angedeuteten Oszillation der Filtermediums.

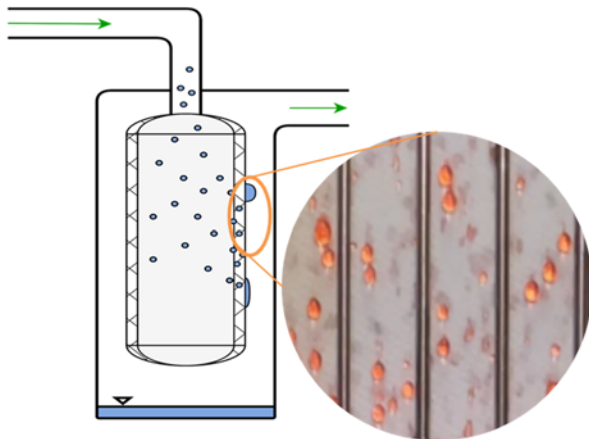


Abbildung 1: schematische Darstellung der Flüssigkeitsansammlung in einem typischen, senkrecht orientierten Druckluftfilter (Filterkerze) mit Bildung großer Tropfen auf der Reingasseite

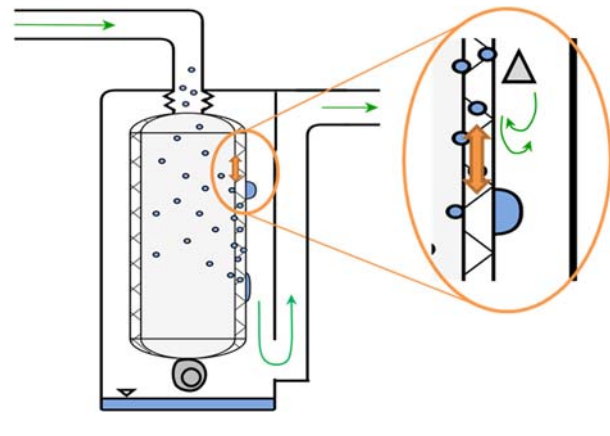


Abbildung 2: schematische Darstellung der aus dem Projekt vorgeschlagenen Modifikationen: a) mechanische Vibrationsanregung in vertikaler Richtung über z.B. Exzenter-Antrieb bei flexibel gelagerter Filterkerze, b) strömungsinduzierte Vibrationsanregung über ringförmig umlaufende Störkörper im Spaltkanal und c) geänderte Strömungsführung in Schwerkraft-Richtung

Abbildung 2 zeigt schematisch die in diesem Projekt entwickelten Empfehlungen hinsichtlich der Einbringung einer Vibrationsanregung sowie weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Drainage und einer dadurch bedingten möglichen Reduktion des Druckverlusts.

Die entwickelten konkreten Empfehlungen sind:

- Eine Vibrationsanregung des Filtermediums sollte bevorzugt in vertikaler Richtung (in Schwerkraftrichtung) erfolgen
- Eine Vibrationsanregung sollte im Bereich der 1. oder 3. Eigenfrequenz derjenigen Tropfengröße liegen, bei der sie sich rein Schwerkraft-getrieben ablösen würden. Die erforderliche Frequenz kann über in der Literatur verfügbare Formeln abgeschätzt werden.
- Eine strömungsinduzierte Oszillation kann überlagert werden, wenn Störkörper wand nah, d.h. in Nähe des Vlieses in den Spalt zwischen Vlies und Gehäuse eingebracht werden, bspw. als dünner umlaufender Draht (spiralförmig).
- Eine Strömungsführung im Spalt zwischen Vlies und Gehäuse entgegen der Schwerkraft ist ungünstig hinsichtlich der Mobilisierung von Tropfen. Daher sollte die Strömungsführung so

geändert werden, dass das Reingas zunächst in Schwerkraftrichtung geführt wird und so Tropfen nach unten treiben kann.

Die Erarbeitung der oben genannten Empfehlungen gelang durch die Kombination von Messverfahren mit numerischen Strömungssimulationen sowie eine enge Verzahnung der Analysen am Einzeltropfen und der Analysen am Filterelement. Die Übertragung von der Detailbetrachtung zur makroskopischen Betrachtung am Filterelement gelingt noch nicht vollständig. Hinsichtlich der erzielten Reduktion des Differenzdrucks durch eine Vibrationsanregung bleiben hier noch Fragen offen. Eine Reduktion des Differenzdrucks um 12 mbar konnte jedoch nachgewiesen werden. Diese Reduktion entspricht etwa 11 % des Differenzdruckniveaus des untersuchten Mediums in Sättigung und überschreitet den angestrebten Wert von 10 %, der im Hinblick auf den Aufwand als Projektziel festgelegt wurde.

Allerdings ist der beobachtete Effekt nicht von Dauer und eine verzögerte Rückkehr auf das alte Differenzdruckniveau wird beobachtet. Des Weiteren wird die beobachtete Intensität nur bei der ersten Anregung in der genannten Stärke gefunden. Jede weitere Anregung hat einen geringeren Effekt. Zwar wird dieser insgesamt mit steigender Länge der Wartezeiten wieder größer, bleibt aber über weite Strecken klein. Durch diese Einschränkungen bei der Zeitstabilität wird eine wirtschaftliche industrielle Umsetzung und Nutzung auf den Einsatz in Kompressoren bei erhöhter Temperatur und unter Verwendung von dort typischerweise auftretenden Schwingungen gesehen.

In einem finalen Schritt wurde ein Funktionsmuster für eine mechanische Anregung entwickelt und erste Tests dieses Funktionsmusters für einen flächigen Filter konnten erfolgreich durchgeführt werden.

Abschließende Bewertung: Das Ziel des Vorhabens wurde in weiten Teilen erreicht. Für eine unmittelbare industrielle Umsetzung ist die bisher beobachtete Dauer des Effektes auf das Differenzdruckniveau jedoch noch zu gering.

2 Gegenüberstellung der geplanten und erzielten Ergebnisse

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens war die Behebung eines erkannten Problems auf Seiten der Wirtschaft: Es sollte in diesem Vorhaben konkret für den Bereich der Druckluftfiltration eine Methode entwickelt werden, mit der es möglich ist, eine Reduktion des Sättigungsniveaus bzw. Verringerung der Sättigung durch eine verbesserte Drainage herbeizuführen.

Dieses Ziel wurde im Wesentlichen erreicht. Die anzuwendende Methode ist eine Einbringung einer Vibrationsanregung, wobei eine mechanische Vibrationsanregung des Filtervlieses einer Strömungsoszillation vorzuziehen ist. Mit dieser Methode kann die Tropfendrainage verbessert und, eine Vielzahl von auftretenden Tropfen vorausgesetzt, eine Verringerung des Sättigungsniveaus (im Rahmen einer zyklischen Anwendung, z.B. eines Reinigungszyklus) erreicht werden. Die Übertragung der Ergebnisse vom kleinen zum großen Maßstab unter dem Aspekt der Ölausbreitung im Filtermedium und der Einflüsse der Befestigung/Anbringung des Filtermediums gelingt noch nicht vollständig. Festzuhalten bleibt aber, dass eine Vibrationsanregung a) zu einer Verbesserung der Tropfendrainage führt und b) auch zu einer Reduktion des Differenzdrucks (in Tests bis zu 12 mbar) führen kann. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein Funktionsmuster einer mechanischen Vibrationsanregung entwickelt, welches mit einem Filter verbunden werden kann. Dabei bleibt der Freiheitsgrad der Vibrationsanregungsrichtung über unterschiedliche Befestigungsmöglichkeiten erhalten. Die erforderlichen Tests bei Variation aller möglichen Einflussparameter (Richtung, Amplitude, Frequenz, Ölbeaufschlagung, Benetzbarkeit, Anregung in oder entgegen der Schwerkraftrichtung, etc.) konnten in der verbliebenen Projektlaufzeit nicht mehr durchgeführt werden.

Um das Gesamtziel zu erreichen, wurden zwei wesentliche Teilziele angestrebt:

- Verbesserung eines bestehenden Verfahrens: Es sollten bei der typischen Druckluftfiltration mittels einer Filterpatrone gezielt Strömungs- bzw. Strukturoszillationen eingesetzt werden, die bei bestimmten Betriebszuständen (Volumenströmen) zu einem entsprechenden Flüssigkeitstransport führen, um so die Möglichkeit zu schaffen, zumindest temporär (z.B. in Form eines Reinigungszyklus) die Drainage zu verbessern
Dieses Ziel wurde im Wesentlichen erreicht. Basierend auf den Erkenntnissen aus Detailanalysen am Einzeltropfen in Kombination mit Untersuchungen am Filterelement am Filterprüfstand konnten Empfehlungen für die Auswahl von Filtermaterialien und zur Auslegung von Einbauten in den Spaltkanal eines Filters auf der Reingasseite für eine gezielte Fluid-Oszillation erarbeitet werden. Darüber hinaus wurde erarbeitet, welche Struktur-Oszillationsrichtung mit welchen Frequenzen für eine Verbesserung sorgt und basierend hierauf ein Funktionsmuster für eine mechanische Anregung entwickelt werden. Ein Test dieses Funktionsmusters für einen flächigen Filter konnte erfolgreich durchgeführt werden.
- Schaffung von Basiswissen: Es sollten Detail-Untersuchungen von Flüssigwasseransammlungen bzw. der Tropfenbewegung unter Einfluss von Strömungs- und/oder Strukturoszillation mit dem Zweck der Entwicklung von (empirischen) Gesetzmäßigkeiten zur Flüssigkeitsbewegung durchgeführt werden. Dieses Ziel wurde vollumfänglich erreicht: es konnte dezidiert der Einfluss auf die Tropfenmobilisierung von a) Benetzungseigenschaften, b) Schwerkrafteinfluss, c) mechanischer Oszillation insbesondere in Hinblick auf Frequenzen und Richtung, d) strömungsinduzierter Oszillation und e) Strömungsführung herausgearbei-

tet werden. Die Untersuchungen lieferten vertiefte Erkenntnisse und einen wesentlichen Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik und werden auf andere Anwendungsfälle übertragbar sein.

In der folgenden Tabelle 1: sind die einzelnen Projektziele und Ergebnisse Punkt für Punkt gegenübergestellt. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte und Maßnahmen, welche für ein Erreichen der Projektziele durchgeführt wurden, ist im anschließenden Kapitel dargestellt.

Nr.	Zielsetzung gemäß Forschungsantrag	Zielsetzung erreicht
AP1	Modifikation des Flachmedienprüfstandes mit Möglichkeiten zur Übertragung von Schwingungen auf das Filtermedium	Wie geplant konnte der Flachmedienhalter so erweitert werden, dass eine direkte Übertragung von Schwingungen auf Gehäuse und Medium möglich wurden. Ursprünglich war nur die Untersuchung einer Methode angedacht. Hieraus wurden im Laufe des Projektes vier unterschiedliche Methoden der Schwingungsübertragung.
AP2	Erweiterung der bestehenden Prüfstände zur Untersuchung von Öltropfen auf typischen Vliesmedien	Wie geplant konnten die bestehenden Prüfstände für die Untersuchung von Öltropfen auf Filtervliesen angepasst werden, so dass die geplanten Arbeiten in AP 3 ermöglicht wurden.
AP3	Charakterisierung von Tropfen auf typischen Vliesmedien	Wie geplant konnte das grundlegende Verhalten von höher viskosen Tropfen auf typischen Vliesmaterialien untersucht und eine Einordnung in den Stand des Wissens erreicht werden.
AP4	Analyse des Verhaltens von einzelnen Öltropfen auf typischen Vliesmedien unter Oszillationsanregung	Wie geplant konnte das Verhalten von höher viskosen Tropfen auf typischen Vliesmaterialien bei mechanischer Vibrationsanregung analysiert werden. Es konnte der Nachweis einer verbesserten Tropfenablösung durch die Einbringung einer Schwingung erbracht und damit der Meilenstein 1 erreicht werden.
AP5	Untersuchungen zur Schwingungsaufprägung auf Gehäuse und Filtermedien	In diesem Arbeitspaket konnte gezeigt werden, dass sich Schwingungen auf Filtermedien übertragen lassen und dort ein Effekt auf den Differenzdruck hervorgerufen werden kann. Es wurde weiter gezeigt, dass bei Schwingungen im Bereich zwischen 20 und 100 Hz und hoher Amplitude der Anregung eine Reduktion des Differenzdrucks von bis zu 12 mbar erzielt werden kann. Es konnte der Nachweis einer Verbesserung der Filtrations- und/oder Drainageeigenschaften durch die Einbringung einer Schwingung erbracht und damit der Meilenstein 2 erreicht werden.
AP6	Aufbau eines Prüfstands zur Erzeugung von Strömungsozillationen mittels Störkörpern	Wie geplant konnte ein einfach modifizierbarer Prüfstand für die Untersuchung von Strömungsozillationen mittels Störkörpern aufgebaut werden.
AP7	Analyse des Verhaltens von Öltropfen auf typischen Vliesmedien bei selbstinduzierter oszillierender Strömung	Wie geplant konnte die Reaktion von höher viskosen Tropfen auf eine Strömungsozillation nachgewiesen und eine forcierte Tropfenablösung demonstriert werden. Es konnte also der Nachweis einer verbesserten Tropfenablösung durch eine selbstinduzierte oszillierende Strömung erbracht und damit der Meilenstein 3 erreicht werden.
AP8	Aufbau eines Prüfstands und Untersuchungen zur Umsetzbarkeit der Anregung von Druckluftfiltern	Als Modell für ein Druckluftfiltergehäuse, Filter und dessen Anregung wurde ein Schüttler konstruiert, mit dessen Hilfe in einem ersten Schritt eine Anregung des Flachmedienfilterhalters erfolgte. Diese Schüttler kann auch für die Aufnahme von Filtergehäusen angepasst werden, Aufgrund von technischen Schwierigkeiten konnte dies aber nicht mehr im Projektverlauf durchgeführt werden.

AP9	Design von Störkörpern bzw. Gehäusemodifikation zur gezielten Strömungsbeeinflussung / Vibrationsanregung	Es konnten Designkonzepte für Störkörper und die lokale Einbringung von Störkörpern erarbeitet werden. Darüber hinaus wurde eine Gehäusemodifikation für eine grundlegend geänderte Strömungsführung erarbeitet.
AP10	Untersuchung zur Vibrationsanregung in realen Filterelementen	<p>Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die mit den Untersuchungen an Einzeltropfen und Flachmedien gewonnen Erkenntnisse am realen Filtergehäuse und Filterelement zu überprüfen und festzustellen, ob eine technische Umsetzung der Schwingungseinbringung möglich ist. Aufgrund der zeitlichen Verzögerungen und des hohen Aufwands bei den Untersuchungen in den AP3-9 sowie von technischen Schwierigkeiten konnten die geplanten Untersuchungen nicht mehr im Projektverlauf durchgeführt werden.</p> <p>Meilenstein 4 (Nachweis einer technischen Umsetzbarkeit mit entsprechendem Funktionsmuster) konnte nur in Ansätzen erreicht werden.</p>

Tabelle 1: Projektziele und Arbeitsschritte

3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

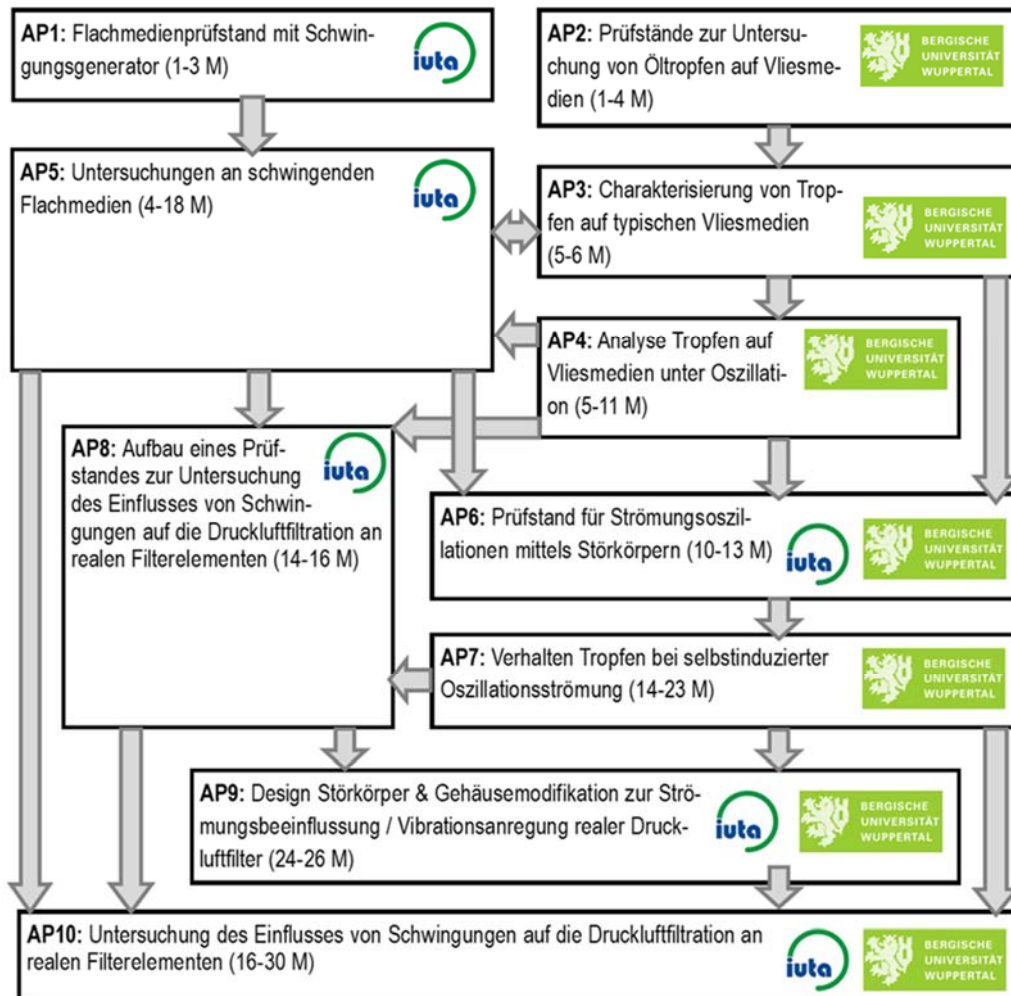


Abbildung 3: Struktur und Lösungsweg des Projektes zur Erreichung des Projektziels

Die durchgeführten Arbeiten erfolgten innerhalb des in Abbildung 3 dargestellten Verlaufsplans und innerhalb der hier gelisteten Arbeitspakete. Zu besserer Lesbarkeit und Übersichtlichkeit wird die Beschreibung der durchgeführten Arbeiten thematisch zusammengefasst und nicht nach einzelnen Arbeitspaketen gegliedert.

3.1 Charakterisierung von Öltropfen auf typischen Vliesmedien



Abbildung 4: fotografische Aufnahme des Ölaustritts (hier rot eingefärbtes Öl) auf der Reingasseite eines Filters

Wird ein Filtermedium im Sättigungsbereich weiter mit Flüssigkeit (Öl) beaufschlagt, so tritt vermehrt Flüssigkeit durch das Medium hindurch, da der maximale Füllgrad unter den herrschenden Betriebsbedingungen erreicht ist. Austretende Flüssigkeit bildet Tropfen und drainiert schließlich auf der Reingasseite, d.h. die Tropfen lösen sich im Wesentlichen schwerkraftgetrieben vom Ort ihres Auftretens und bewegen sich in der Regel über die Oberfläche des Filtermediums. Da die eingebrachte Oszillation (wie in diesem Projekt angestrebt) ähnlich wie eine Reduktion der Viskosität wirkt, kann mit einem schnelleren Abfließen und damit mit einer Verringerung der sich hier ansammelnden Ölmenge gerechnet werden, was auch eine direkte Abnahme des Sättigungsdifferenzdrucks erwarten lässt. Für eine gezielte Oszillationsanregung (über die Anregung der Oberfläche oder über eine oszillierende Strömung) muss für typische Öle auf typischen Filtermedien eine Reihe von Fragen untersucht werden.

- Welche Tropfengrößen treten auf?
- Was hat das Vlies (Oberflächenstruktur/Porosität) für einen Einfluss?
- Welche Viskositätseffekte treten auf?
- Welchen Effekt hat das Tropfenwachstum?
- Welchen Effekt hat die Orientierung der Oberfläche gegenüber Gravitation?
- Kann eine strömungsmechanische Anregung über Störkörper erfolgen?

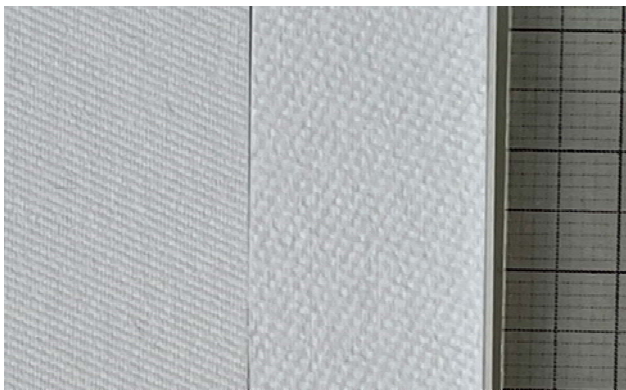
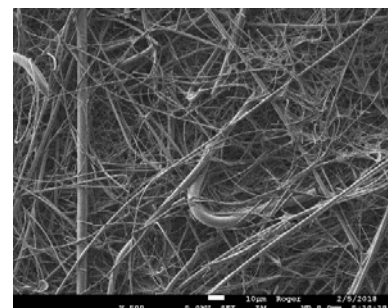
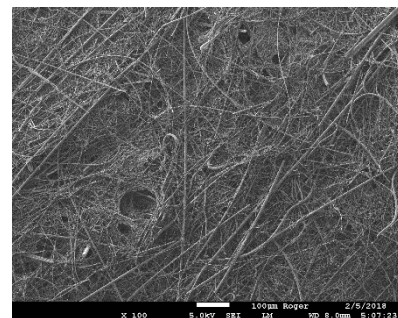


Abbildung 5 (oben): Fotografische Aufnahmen der Makrostruktur der verwendeten Filtermedien DF3 (rechts) und DF4 (links) sowie Maßstab zur Orientierung

Abbildung 6 (rechts): zwei REM-Aufnahmen der verwendeten Filtermedien mit unterschiedlichen Vergrößerungen zeigen die Mikrostruktur der verwendeten Filtermaterialien



In einem ersten Schritt wurden in enger Absprache mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses bestimmte Filtervlies-Materialien und typische Öle für die durchzuführenden Untersuchungen ausgewählt. Als Testmedien wurden zwei typische sogenannte *low resistance HEPA Filter*

Medien aus Borosilikat-Mikrofasern mit einem Acrylharz-Bindemittel mit den Typbezeichnungen DF3 und DF4 ausgewählt. Beide Filtermedien haben einen mittleren Faserdurchmesser von 1-2µm und weisen eine Porosität von 90-99% auf (vergleiche Abbildung 5 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, weitere Informationen zur Charakterisierung finden sich in den Abschlussberichten der IFG-Vorhaben Nr. 19109N und 19919N). DF3 hatte abströmseitig einen um etwa 15° größeren Benetzungswinkel als DF4 und kann damit als geringfügig oleophober bezeichnet werden.

Fluid	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$\nu \left[\frac{mm^2}{s} \right]$	$\sigma \left[\frac{mN}{m} \right]$
Corena	868	134.21	33.975
Ondina	854	41.991	33.504
TS10	833	18.0	29.536
Cali. 2.5	821	3.85	32.196
Wasser	998	1.002	72.750

Ondina	40°C	100°C
$\nu \left[\frac{mm^2}{s} \right]$	18	3.7

Tabelle 2: Fluideigenschaften der verwendeten Öle (zu Vergleichszwecken auch Daten für Wasser)

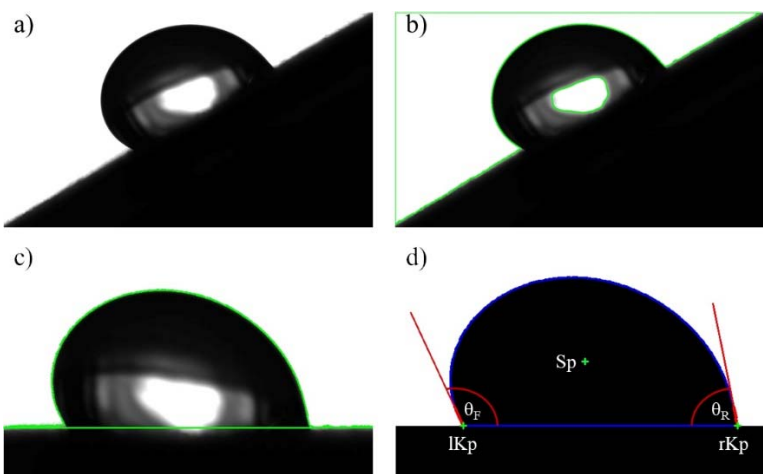
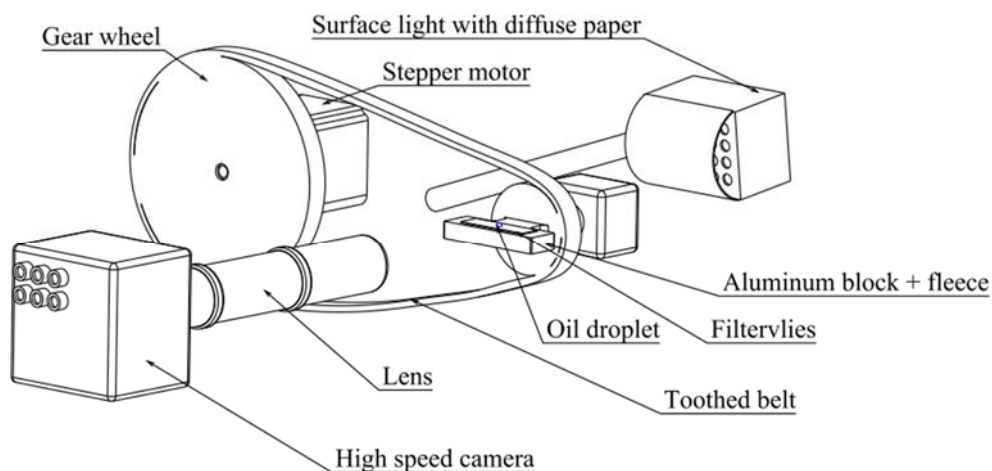


Abbildung 7: Versuchsstand zur Ermittlung der statischen und dynamischen Kontaktwinkel eines Tropfens auf beliebigen Substraten mittels Schattenverfahren (oben) und typisches Tropfenbild mit Darstellung des Effekts der Neigung auf den Tropfen sowie der Konturerkennung und Ermittlung der relevanten Größen (rechts, a-d))

Zusätzlich zeigt die zusätzliche kleine Tabelle in Tabelle 2 die Temperaturabhängigkeit des typischen Öls Ondina. Hier wird deutlich, dass die Viskosität, die ein entscheidender Parameter für die Tropfenausbildung, das Oszillationsverhalten und das Abfließverhalten ist, bei typischen Anwendungstemperaturen von etwa 80°C in den Bereich der niedrigviskosen Öle bei Raumtemperatur abfällt. Dies ist für die Untersuchungen zum Einfluss einer Oszillation wichtig, da hohe Viskositäten Oszillationseffekte fast vollständig dämpfen können. Da die Laboruntersuchungen nicht bei z.B. 80°C durchgeführt werden können, wurden insbesondere auch Untersuchungen mit den niedrigviskosen Ölen durchgeführt, um den Effekt der niedrigen Viskosität bei hohen Temperaturen abbilden zu können.

Mittels eines speziellen Versuchsstands (siehe Abbildung 7 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurden die Benetzungseigenschaften der Öle auf den verwendeten Filtermaterialien untersucht. Bei diesem Versuchsstand kann das Substrat, auf welches ein Tropfen appliziert wird, gezielt geneigt werden (von 0° bis über 90°), um sowohl den statischen Kontaktwinkel, als auch die Kontaktwinkelhysterese bestimmen zu können. Zum Einsatz kommt hier das Schattenverfahren. Dazu wurde eine Bildverarbeitungssoftware programmiert, welche die Tropfenkanten zuverlässig detektiert und Größen-Parameter wie Kontaktlinienlänge, Tropfenhöhe und Kontaktwinkel automatisch ermittelt und in eine Datenbank schreibt (siehe Abbildung 7 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Als erstes Charakteristikum für die Benetzbarkeit kann der statische Kontaktwinkel herangezogen werden, d.h. der Benetzungswinkel, der sich bei einer Neigung von 0° ergibt (Tabelle 3). Entscheidend für die Bewegung eines Tropfens ist aber die Kontaktwinkelhysterese, d.h. der Unterschied zwischen Fortschritt- (θ_F) und Rückschreitwinkel (θ_R), welche sich ergeben, wenn ein Tropfen infolge einer Krafterwirkung (z.B. Gravitation oder aerodynamische Kraft) deformiert wird (vgl. Abbildung 7 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

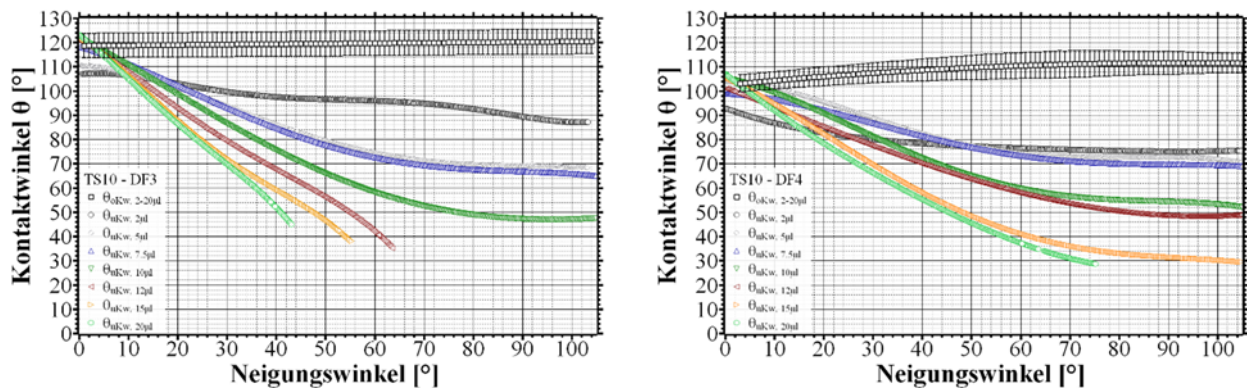


Abbildung 8: Auswertung der Kontaktwinkel für verschiedene Tropfengrößen beispielhaft für das Öl TS10 auf DF3 (links) und DF4 (rechts) in Abhängigkeit vom Neigungswinkel

In Abbildung 8 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist zu erkennen, dass der Fortschrittswinkel sich bei zunehmender Deformation (infolge der Neigung) kaum ändert (schwarze Quadrate), während der Rückschreitwinkel (insbesondere bei großen Tropfenvolumina) zunehmend kleine Winkel annimmt, d.h. die Tropfenkontur sehr spitz zuläuft. Man erkennt zudem, dass kleine Tropfen auch bei Neigungen über 90° noch an dem Filtermedium haften, die Gravitation alleine also nicht ausreicht, um die Tropfen abzulösen. Größere Tropfen (bei DF3 ab 12 µl, bei DF4 ab 20 µl) lösen dagegen ab einer kritischen Neigung schwerkraftgetrieben vom Filtermedium ab.

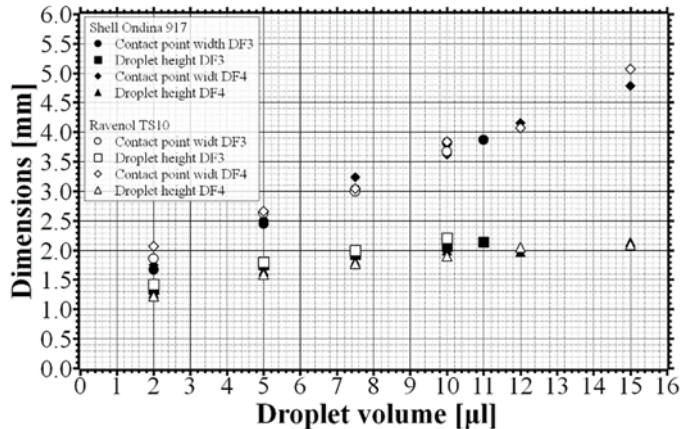


Abbildung 9: Darstellung der Kontaktpunktbreite und der Tropfenhöhe für unterschiedliche Öle in Abhängigkeit vom Tropfenvolumen auf den Filtermedien DF3 und DF4 bei senkrechter Orientierung des Filtermediums

Abbildung 9 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die sich ergebenden Tropfenbreiten und Tropfenhöhen bei senkrechter Orientierung des Filtervlieses für unterschiedliche Tropfenvolumina. Man erkennt, dass für die verwendeten Öle sich sehr ähnliche geometrische Parameter ergeben, d.h. die Viskosität sich auf die Ausformung der (statischen) Tropfen kaum auswirkt.

Dargestellt sind zusammenfassend in Tabelle 3 die Kontaktwinkel, die sich in der Gesamtheit für die verwendeten Öle ergeben. Da die Oberflächenspannungen der Öle sich nur unwesentlich unterscheiden (Tabelle 2), ergeben sich für alle Öle sehr ähnliche statische und dynamische Kontaktwinkel; mögliche Unterschiede liegen innerhalb der Bandbreite der Schwankung aufgrund der Heterogenität der verwendeten Vliese.

Filtermedium	Tropfenvolumen [µl]	Statischer Kontaktwinkel θ (°)	Fortschreitwinkel θ_F (°)	Rückschreitwinkel θ_R (°)
DF3	2 - 5	107,7±3,7	118,9±5,4	78,1±9,2
	7 - 11	113,9±3,8	126,2±4,0	52,1±8,8
	12 - 25	117,2±5,0	-	-
DF4	2 - 5	96,7±4,9	110,5±7,5	80,2±8,6
	7 - 11	100,0±4,5	116,5±5,5	59,6±6,1
	12 - 25	101,3±4,2	117,2±3,1	40,4±7,5

Tabelle 3: Kontaktwinkel für die Filtermedien DF3 und DF4 für die verwendeten Öle in Abhängigkeit vom Tropfenvolumen

In der Gesamtschau lässt sich festhalten, dass beide verwendeten Filtermedien einen oleophoben Charakter aufweisen, das Filtermedium DF4 aber eine bessere Benetzung bezüglich der verwendeten Öle zeigt, was sich in größeren maximalen Tropfenvolumina vor einem schwerkraftgetriebenen Ablösen äußert. Tropfenhöhe und Tropfenbreite sind bei senkrechter Orientierung des Filtermediums von der Art des Öls und des Filtermaterials offenbar wenig beeinflusst.

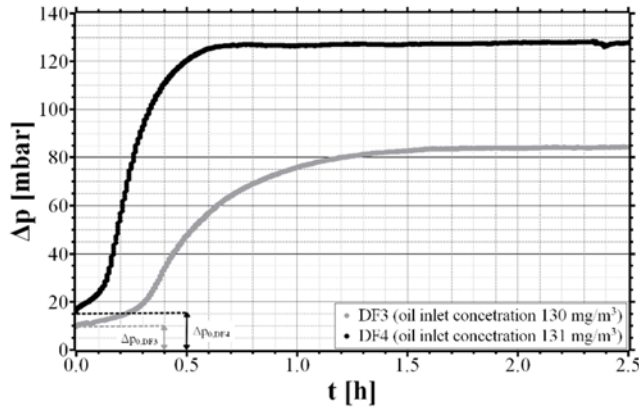


Abbildung 10: Differenzdruck-Verlauf bei Ölbeaufschlagung im Flachmedien-Prüfstand für DF3 (grau) und DF4 (schwarz)

Für Filtermedien DF3 und DF4 wurden weitere Untersuchungen am Flachmedien-Prüfstand durchgeführt, um die charakteristischen Eigenschaften hinsichtlich Sättigungszustand und Drainage für die verwendeten Öle zu analysieren. **Abbildung 10 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt den typischen Verlauf der Differenzdrucks über das Filtermedium bei einer Ölbeaufschlagung von etwa 130 mg/m^3 . Deutlich zu erkennen ist der geringere Differenzdruck bei Erreichen der Sättigung für das DF3- gegenüber dem DF4-Material. Dies kann u.a. mit dem oleophoberen Charakter des DF3-Materials gegenüber DF4 erklärt werden. Ölsammlungen innerhalb des Vlieses führen zu einer Verblockung des freien Querschnitts und damit zu einer Erhöhung der Druckdifferenz. Das Öl haftet bei DF3 in geringerem Maße an den Fasern des Vlieses und sorgt so im Sättigungszustand (d.h. die maximale Ölmenge im Filtermaterial ist erreicht) für einen geringeren Druckverlust.

Über weitere Versuchsreihen am Flachmedienprüfstand wurde mittels Bildaufnahme der Drainage-Tropfenbildung die typische Tropfengröße bei Ablösung der Tropfen vom Vlies ermittelt. Dazu wurde auch hier eine Bildverarbeitungssoftware programmiert, welche die Tropfenkanten zuverlässig detektiert und Größen-Parameter wie Durchmesser und Fläche automatisch ermittelt und in eine Datenbank schreibt (siehe Abbildung 11).

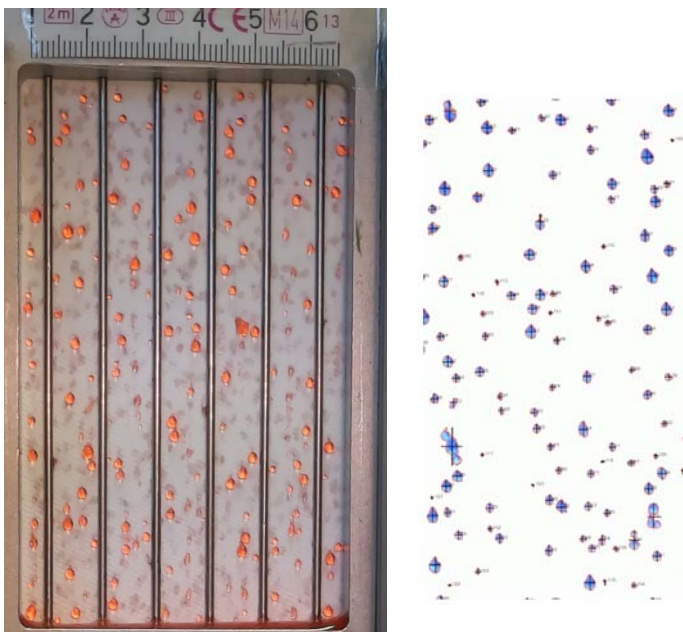


Abbildung 11: Fotografische Abbildung der Tropfenbildung auf der Abströmseite des Flachmedienprüfstands sowie typisches Ergebnis der Bildverarbeitung mit Kantendetektion (rot) und Durchmesser-Bestimmung (schwarze Kreuze)

Das Ergebnis einer solchen Analyse ist beispielhaft in Abbildung 12 gezeigt. Man erkennt im zeitlichen Verlauf die zunächst steigende Anzahl von detektierten Tropfen, sowie die daraufhin schwankende Anzahl der sichtbaren Tropfen infolge der Tropfenablösung. Mit dem Wert der Tropfenanzahl korreliert die mittlere Tropfenfläche sowie die Tropfenbreite und -länge. Die Tropfen sind infolge der schwerkraftbedingten Deformation länger als breit, was mit den Ergebnissen für den Einzeltropfen (s.o.) übereinstimmt. Im Abgleich mit den vorherigen Ergebnissen für den Einzeltropfen kann nun aus den geometrischen Parametern auf das Tropfenvolumen geschlossen werden. Die Tropfenlänge (braune Kurve) entspricht der am Einzeltropfen vermessenen Kontaktlinienlänge. Der Vergleich ergibt eine mittlere Tropfengröße von etwa 5 μl . Dadurch, dass stetig größere Tropfen ablösen und neue Tropfen entstehen, ist die hier ermittelte Tropfengröße zu kleinen Werten hin verschoben. Eine genauere Analyse der maximalen, detektierten Tropfengrößen ergibt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen für die kritische Tropfengröße aus dem Neigeversuch, d.h. die maximale Tropfengröße (vor dem schwerkraftgetriebenen Ablösen) liegt bei 15-20 μl .

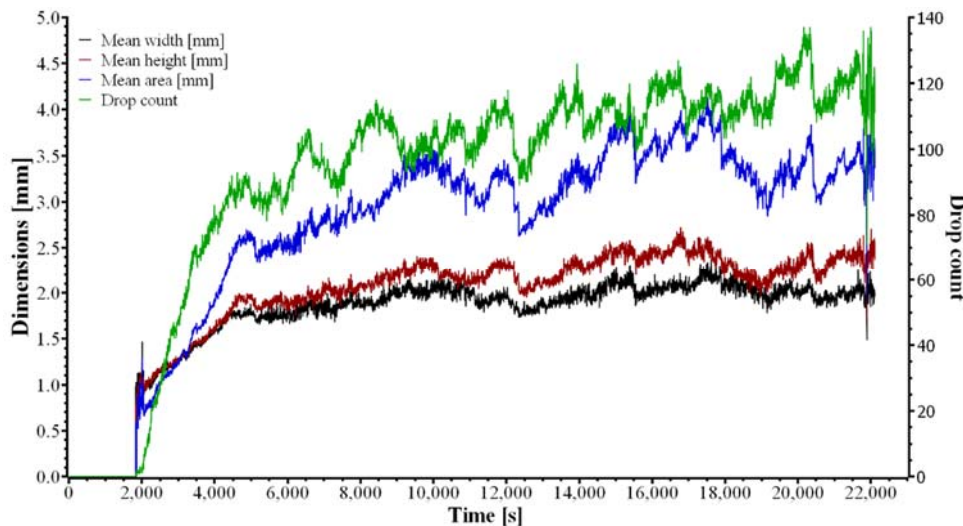


Abbildung 12: typisches Ergebnis der Tropfenanalyse am Flachmedienprüfstand zeigt den Verlauf der Tropfenanzahl (grün), der mittleren Tropfenfläche (blau) sowie der mittleren Tropfenbreite (schwarz und braun)

Im Gegensatz zu den aufgesetzten Tropfen in den Versuchen zu Abbildung 7 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis Abbildung 9 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** tritt der Tropfen in der Realität aus dem Filtervlies aus. Daher war erforderlich, einen Versuchsstand aufzubauen, mit dem gezielt Einzeltropfen erzeugt werden können, welche aus dem Filtermaterial austreten und nicht als aufgesetzte Tropfen vorliegen. Dieser Versuchsaufbau ist in Abbildung 13 gezeigt.

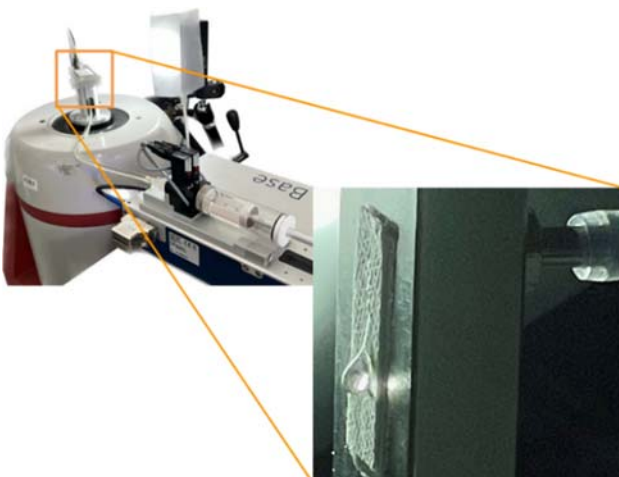
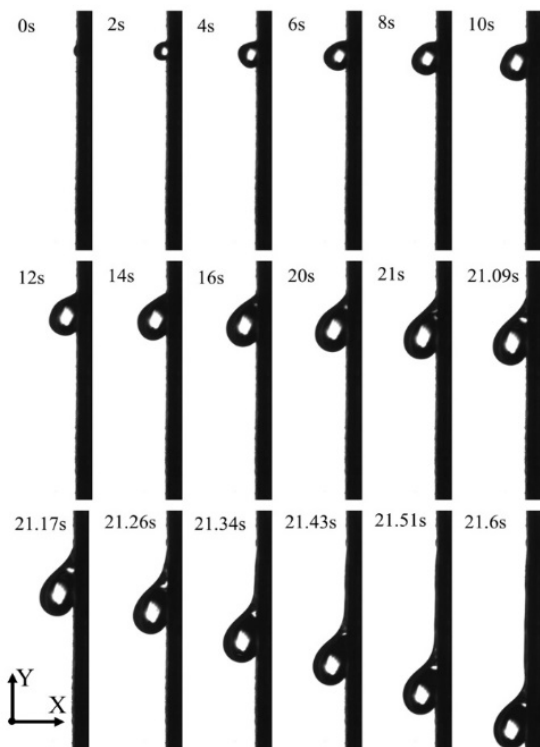
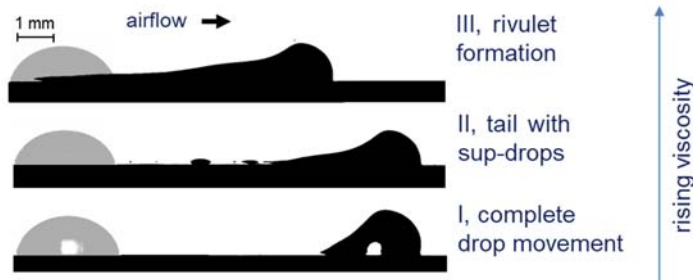


Abbildung 13: Versuchsaufbau zur Analyse des Tropfenverhaltens bei Anwachsen aus dem Filtermaterial

Das Filtervlies ist auf einem Aluminiumblock befestigt, der über eine feine Bohrung verfügt. Über diese Bohrung wird über eine Präzisions-spritzenpumpe Öl mit einem gezielt einstellbaren Volumenstrom dem Vlies zugeführt. Schließlich tritt das Öl auf der der Bohrung abgewandten Seite als Tropfen aus und wächst aufgrund des eingestellten Volumenstroms weiter an. Bei Erreichen des kritischen Volumens überwiegen dann die Volumenkräfte (hier zunächst nur die Schwerkraft) über die Adhäsionskraft und der Tropfen löst ab und läuft das Vlies entlang. In Abbildung 13 ist zu erkennen, dass der Tropfen sich bereits losgelöst hat und eine feine Schleppe aus Öl hinterlässt. Diese Schleppenbildung wurde bereits in Voruntersuchungen der FE2 (Lehrstuhl Strömungsmechanik, Bergische Universität Wuppertal) festgestellt und ist ein Effekt der relativ hohen Viskosität der verwendeten Öle. In Vorarbeiten der FE2 wurde eine Klassifizierung der Fließtopologie von Tropfen vorgenommen (vgl. Abbildung 15 (unten): Klassifizierung der Tropfentopologie in Abhängigkeit der Viskosität bei Aufprägung einer treibenden Kraft nach [1].) [1]. Für die verwendeten Öle ergibt sich im Wesentlichen bei Schwerkrafteinfluss eine Topologie der Klassen I und II, wie anhand des beispielhaften Verlaufs des Tropfenwachstums und schwerkraftgetriebenen Loslösens zu erkennen ist. Die Versuche mit dem Versuchsaufbau aus Abbildung 13 ergaben auch, dass für niedrige bis moderate Fördervolumenströme des Öls (in der Größenordnung von 1 µl/s), die finale, kritische Tropfengröße (vor dem schwerkraftgetriebenen Ablösen) wieder bei 15-20 µl liegt.

Abbildung 14 (rechts): Beispielhaftes Ergebnis für einen anwachsenden Tropfen aus einem Filtermaterial mit den Phasen „Anwachsen und Deformation“ sowie „Schleppenbildung und Loslösen“

Abbildung 15 (unten): Klassifizierung der Tropfentopologie in Abhängigkeit der Viskosität bei Aufprägung einer treibenden Kraft nach [1].



Bei dem typischen Aufbau eines Druckluft-Filters besteht zwischen dem zylindrischen Filterelement (Filterkerze) und dem Gehäuse ein schmaler Spalt, in welchem die gereinigte Luft Richtung Austritt strömt (vgl. Abbildung 1 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.). D.h. hier liegt eine Scherströmung vor, in welche die sich bildenden Tropfen hineinwachsen. In Vorarbeiten der FE2 wurde außerdem erarbeitet, dass bei angeströmten Tropfen eine bestimmte kritische Anströmgeschwindigkeit erforderlich ist, bei der ein Tropfen in eine Translationsbewegung versetzt wird. Diese kritische Anströmgeschwindigkeit ist u.a. vom Tropfenvolumen abhängig und sinkt mit

steigender Tropfengröße [1]. In den Vorarbeiten wurden Tropfen aus Fluiden unterschiedlicher Viskositäten und Tropfen-/Substrat-Kombinationen unterschiedlicher Benetzung untersucht, bislang fehlte aber eine Untersuchung für hochviskose Fluide und heterogene Oberflächen. Um diese Wissenslücke zu schließen und für den Fall der Druckluftfiltration relevante Parameter zu extrahieren, wurden für die genannten Öle und Filtermedien Anströmversuche unternommen.

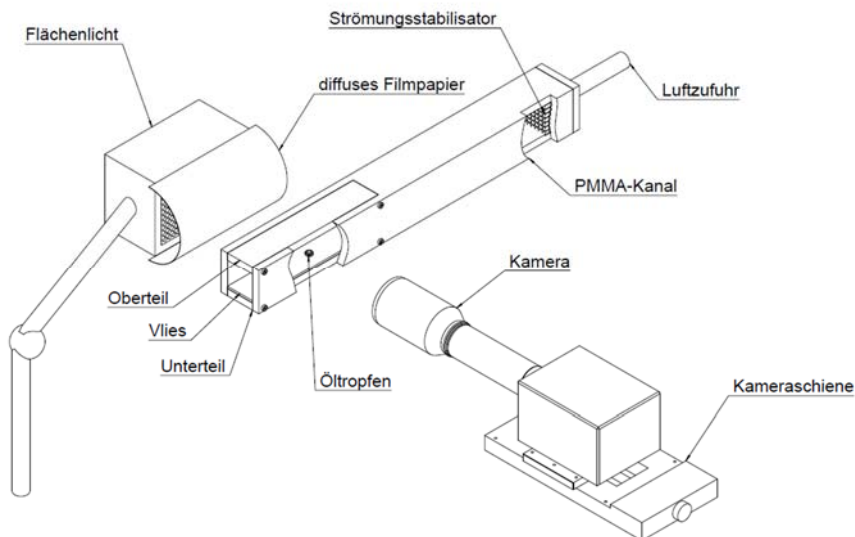


Abbildung 16: Versuchsaufbau zur Analyse kritischen Anströmgeschwindigkeit sowie zu Analyse der Tropfenschwingung bei Anströmung mittels Schattenverfahren.

Dazu wurde ein bereits vorhandener Strömungskanal für die Verwendung von Ölen modifiziert (siehe Abbildung 16). Bei diesem Strömungskanal kann über einen Mass-Flow-Controller eine kontrollierte Strömungsgeschwindigkeit eingestellt und kontinuierlich gesteigert werden, so dass die kritische Anströmgeschwindigkeit ermittelt werden kann. Der Strömungskanal ist ausreichend lang, so dass eine voll ausgebildete Strömung im Messbereich vorliegt. Der Messbereich ist transparent gestaltet, so dass ein optischer Zugang für die Verwendung des Schattenverfahrens gewährleistet ist. Im Messbereich wird das Filtervlies als untere Kanalwand appliziert und mittels einer Präzisionspritze ein Öltropfen (unterschiedlicher Öle und Größen) abgesetzt. Anschließend wird der Kanal in Betrieb genommen und die Tropfenbewegung mittels Schattenverfahren fotografisch festgehalten. Anschließend wird mit Hilfe der bereits genannten Bildverarbeitungssoftware für jedes Bild die Tropfenkontur detektiert. Aus den Daten der Tropfenkontur können relevante Parameter, wie Schwerpunkt- oder Kontaktlinienbewegung bestimmt werden.

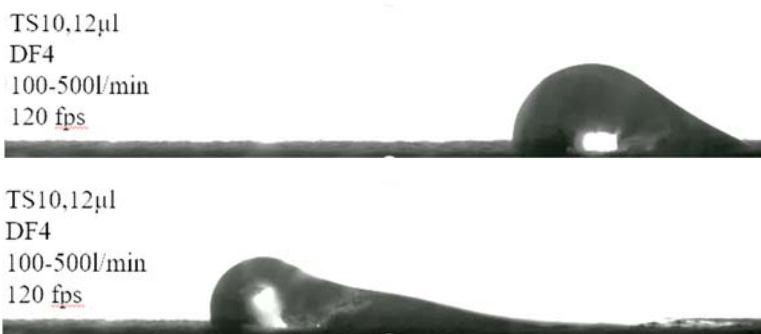


Abbildung 17: typische Form eines Öltropfens vor (oben) und bei Erreichen der Bewegungsphase (unten) (hier für TS10 auf DF4) mit Ausbildung einer Fluidschleppe

Wie in Abbildung 17 zu erkennen ist, zeigt sich für angeströmte Tropfen (Anströmung erfolgt hier von rechts) zunächst im noch anhaftenden Zustand eine typische Deformation mit Ausbildung unterschiedlicher Fortschritt- und Rückschreitwinkel. Wird der Tropfen dann bei ausreichend hoher Anströmgeschwindigkeit in Bewegung gesetzt, zeigt sich in den meisten Fällen eine ausgeprägte

Schleppenbildung für den Tropfen, d.h. der stromab gelegene Kontaktpunkt bewegt sich in Strömungsrichtung, während der stromauf gelegene Kontaktpunkt stehen zu bleiben scheint. Die Tropfenform entspricht hier eher der Klasse II (vgl. Abbildung 15). Für diesen Fall existiert bislang kein belastbares Kriterium für die exakte Bestimmung des Zeitpunkts des Loslösens, d.h. der kritischen Anströmgeschwindigkeit. Abbildung 18 zeigt beispielhaft den typischen Verlauf der Kontaktliniengeschwindigkeit (bezogen auf die Anströmgeschwindigkeit u_A) über der relativen Kontaktlinienposition (bezogen auf die Tropfenbreite b_{Kp}) sowie die entsprechende normierte Darstellung für den Schwerpunkt des Tropfens. Man erkennt deutlich die zügig einsetzende Verlagerung des Schwerpunkts (schwarze Symbole) in Strömungsrichtung aufgrund der Deformation (und Schleppenbildung) ohne eine Veränderung der Kontaktlinienposition (weiße Symbole).

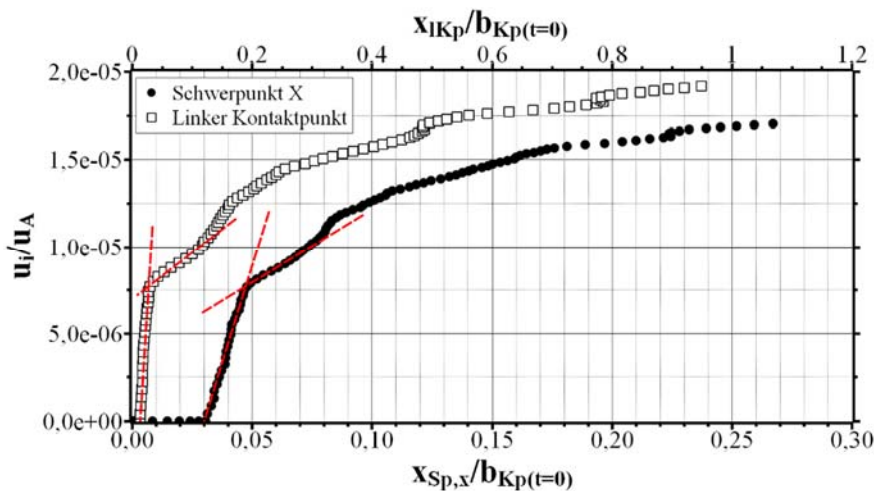


Abbildung 18: exemplarische Darstellung der relativen Geschwindigkeit von Kontaktpunkt und Schwerpunkt eines Tropfens über der relativen Position derselben

Bei Einsetzen der Bewegung steigen sowohl die Geschwindigkeit der Kontaktlinie als auch des Schwerpunkts stark an, ohne eine starke Positionsveränderung zu bewirken, um dann ein eine moderate Geschwindigkeit bei deutlicher Positionsänderung überzugehen. Der Wechsel der Geschwindigkeit sowohl von Kontaktlinie als auch von Schwerpunkt wird als Kriterium genommen, um den Zeitpunkt des Bewegungsstarts zu definieren und somit die kritische Geschwindigkeit zu ermitteln. Das Ergebnis dieses Verfahrens für unterschiedliche Tropfenvolumina und unterschiedliche Filtervliese ist in Abbildung 20 dargestellt. Man erkennt den auch aus anderen Fällen bekannten Trend einer abnehmenden kritischen Geschwindigkeit mit zunehmendem Tropfenvolumen, wobei für größere Tropfen aufgrund der starken Deformation und Schleppenbildung eine eindeutige Festlegung der kritischen Geschwindigkeit schwer möglich ist.

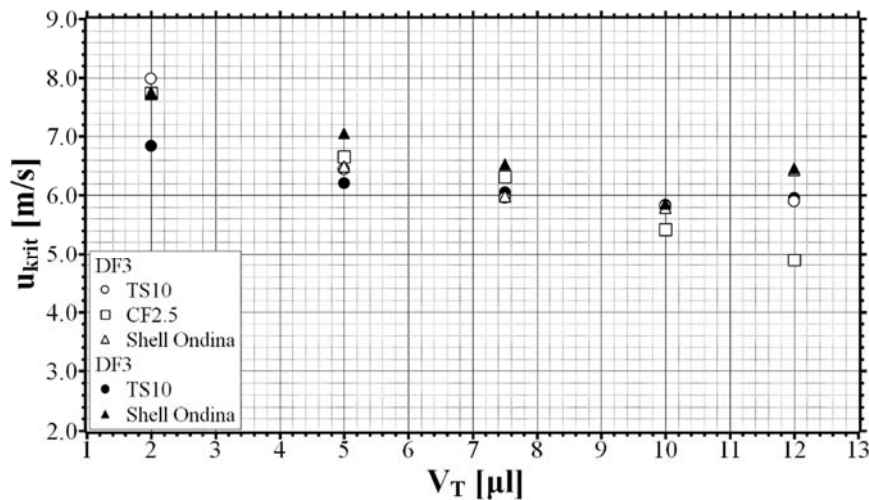


Abbildung 19: Darstellung der kritischen Geschwindigkeit für das Tropfenablösen auf DF3 (weiße Symbole) und DF4 (schwarze Symbole) in Abhängigkeit des Tropfenvolumens

In Vorarbeiten der FE2 wurde außerdem erarbeitet, dass bei angeströmten Tropfen eine Oszillationsbewegung initiiert wird, welche eine charakteristische Schaukelschwingung aufweist. Es erfolgt eine Vor- und-zurück-Bewegung (in Querrichtung zum Substrat) mit der 1. Eigenfrequenz (EF) sowie eine Auf-und-ab-Bewegung (in Normalenrichtung zum Substrat) mit der 2. EF. Es wurde bereits festgestellt, dass eine erhöhte Viskosität die Amplituden der Schwingung dämpft. Diese Dämpfung korrespondiert mit einer Erhöhung der kritischen Geschwindigkeit zum Loslösen des Tropfens [1]. Darüber hinaus wurde bereits in Vorarbeiten der FE2 gezeigt, dass bei einer gezielten Anregung in Normalenrichtung mit der 2. EF die kritische Anströmgeschwindigkeit zum Loslösen des Tropfens um etwa 50% reduziert werden kann. Bei einer gezielten Anregung in Querrichtung mit der 1. bzw. 3. EF stellt sich ein ähnlicher Effekt ein [3]. Da in diesem Projekt verbesserte Drainage (d.h. erhöhtes Maß an Tropfenmobilisierung) über eine Vibrationsanregung vorgesehen ist, muss daher bekannt sein, welche Eigenfrequenzen die Tropfen aus den ausgewählten Ölen aufweisen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Tropfengrößen, wie sie im oben beschriebenen Abschnitt als kritische Tropfengrößen gefunden wurden.

Auf Basis dieser oben beschriebenen Ergebnisse wurde im Folgenden untersucht, welche Eigenfrequenzen Tropfen verschiedener Volumina bei den verwendeten Ölen aufweisen. Dazu wurde ein bereits vorhandener Strömungskanal für die Verwendung von Ölen modifiziert (siehe Abbildung 16). Bei diesem Strömungskanal kann über einen Mass-Flow-Controller eine kontrollierte Strömungsgeschwindigkeit eingestellt werden, so dass die natürliche Oszillation des Tropfens hervorgerufen werden kann. Der Strömungskanal ist ausreichend lang, so dass eine voll ausgebildete Strömung im Messbereich vorliegt. Der Messbereich ist transparent gestaltet, so dass ein optischer Zugang für die Verwendung des Schattenverfahrens gewährleistet ist. Im Messbereich wird das Filtervlies als untere Kanalwand appliziert und mittels einer Präzisionspritze ein Öltropfen (unterschiedlicher Öle und Größen) abgesetzt. Anschließend wird der Kanal in Betrieb genommen und die Tropfenbewegung mittels Schattenverfahren fotografisch festgehalten. Anschließend wird mit Hilfe der bereits genannten Bildverarbeitungssoftware für jedes Bild die Tropfenkontur detektiert. Über die gesamte Bilderfolge kann so aus der lokalen Position der Tropfenkontur oder des Tropfenschwerpunkts ein Zeitsignal erstellt werden, welches sich über eine Fast-Fourier-Analyse (FFT) spektral analysieren lässt.

Das Ergebnis einer solchen Analyse ist beispielhaft in Abbildung 20 gezeigt: dargestellt ist das Frequenzspektrum für die Bewegung des Tropfenschwerpunkts eines 5 μl -Tropfen des Öls TS10. Deutlich zu erkennen ist die 1.EF für die Bewegung des Tropfenschwerpunkts in horizontaler Richtung

(links) und die 2.EF für die Bewegung des Tropfenschwerpunkts in vertikaler Richtung (rechts). Für die niedrigviskosen Öle ließ sich mit dieser „klassischen“ Methode, wie sie auch in [2] und [3] angewendet wurde, eindeutig zeigen, dass auch Tropfen mit höherer Viskosität und niedrigerer Oberflächenspannung und zudem auf einem oleophoben Substrat das schon oben beschriebene charakteristische Schwingungsmuster mit 1. und 2. EF aufweisen. Der Nachweis mit dieser Methode für hochviskose Öle gestaltete sich schwierig, da die hohe Viskosität die Schwingungsamplituden in einem so hohen Maße dämpft, dass eine Analyse nicht verlässlich möglich war.

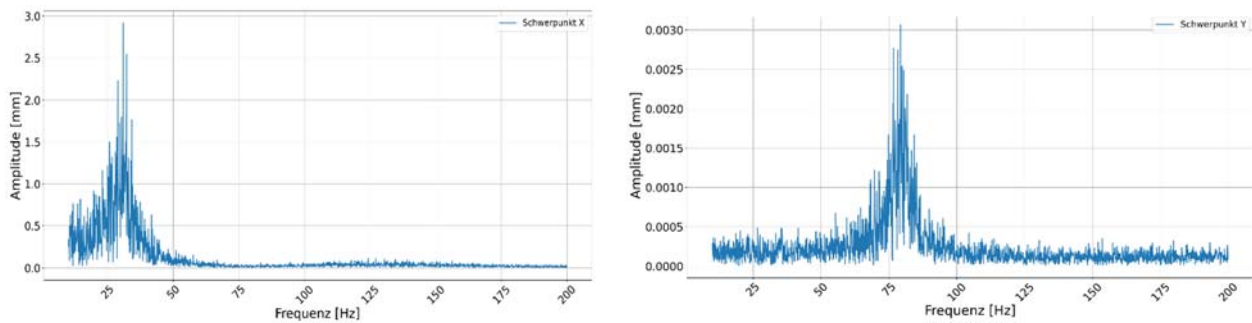


Abbildung 20: Beispielhafte Ergebnisse der Spektralanalyse der Tropfenschwingung, hier bezüglich des zeitlichen Verlaufs des Tropfenschwerpunkts für einen 5 µl-Tropfen des Öls TS10

Daher wurde zur Bestimmung der Schwingungscharakteristik für die hochviskosen Öle ein anderes Verfahren entwickelt und angewendet. Dazu wurde der Tropfen auf dem Filtervlies auf einem Shaker appliziert, mit dem sich gezielt unidirektionale Vibrationen mit bestimmter Frequenz und Amplitude einstellen lassen. Die Tropfenkontur wurde bei diesen Vibrationsversuchen wieder mittels Schattenverfahren aufgenommen, über die Bildverarbeitungssoftware verarbeitet und anschließend über eine FFT das zugehörige Spektrum der Konturosillation ausgewertet (siehe Abbildung 21 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Konkret wurde gezielt in kleinen Frequenzschritten über einen größeren Frequenzbereich angeregt, so dass sich eine eindeutige Oszillationsantwort des Tropfens auf die Anregung durch den Shaker ergibt. Wie in Abbildung 22 zu sehen, zeigt sich eine klare Kurve des Tropfenhöhenverhältnisses mit zwei klaren Maxima. Im Bereich dieser Anregungsfrequenzen kommt es zu Resonanz, da hier die entsprechenden Eigenfrequenzen des Tropfens angeregt werden.

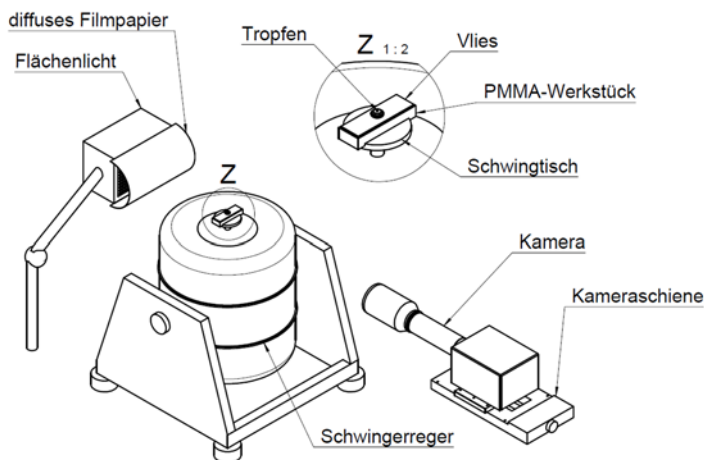


Abbildung 21: Versuchsaufbau zur Analyse der Eigenfrequenzen eines Tropfens mittels Vibrationsanregung.

Das Ergebnis der Eigenschwingungsuntersuchung lässt sich wie folgt zusammenfassen: auch für hoch- und mittelviskose Fluide mit niedrigeren Oberflächenspannungen als z.B. Wasser und auf

nicht-benetzenden Materialien zeigen die Tropfen ein vergleichbares typisches Muster der Schwingungsmoden: die 1. EF entspricht einer Schwingung in Querrichtung und die 2. EF einer Schwingung in Normalen-Richtung. Bei einer Anströmung des Tropfens äußert sich diese Kombination aus Schwingungsmoden in einer Taumelbewegung („rocking motion“). Es zeigt sich zudem, dass die Eigenfrequenzen mit zunehmendem Tropfenvolumen abnehmen – dies entspricht auch der Theorie.

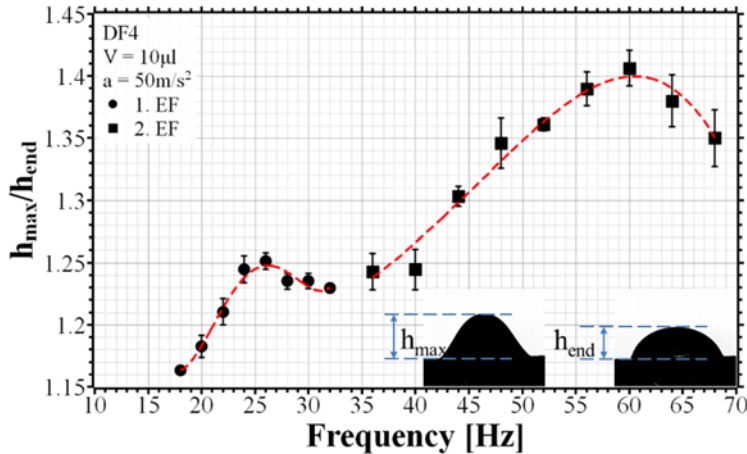


Abbildung 22: Beispielhaftes Ergebnis der Ermittlung der Eigenfrequenzen eines hochviskosen Tropfens mittels Vibrationsanregung.

Nach [4] gilt für die Eigenfrequenzen eines Tropfens:

$$f_n = \alpha \cdot \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{n^3 \cdot \sigma}{24 \cdot m} \cdot \frac{\cos^3 \theta - 3 \cdot \cos \theta + 2}{\theta^3}} \quad (1)$$

Die ganzzahlige Variable n steht für die jeweilige Eigenmode, wobei n bei 2 beginnt und somit die 1. EF beschreibt. Für den empirischen Faktor α wird in der Literatur der Wert 0,81 angegeben. Aus den Untersuchungen ergab sich, dass für höherviskose Fluide ein Faktor von $\alpha=0,65-0,75$ eine bessere Approximation darstellt. Obwohl die Theorie nach [4] für glatte Substrate und benetzende Tropfen entwickelt wurde, bildet sie die Verhältnisse für Öltropfen auf Filtermaterialien in sehr gutem Maße ab, wie in Abbildung 23 nachzuvollziehen ist. Die Messwerte sind über die Symbole dargestellt, während die Kurve gemäß der Formel für die unterschiedlichen (statischen) Kontaktwinkel für DF3 und DF4 als gestrichelte Linien abgebildet sind.

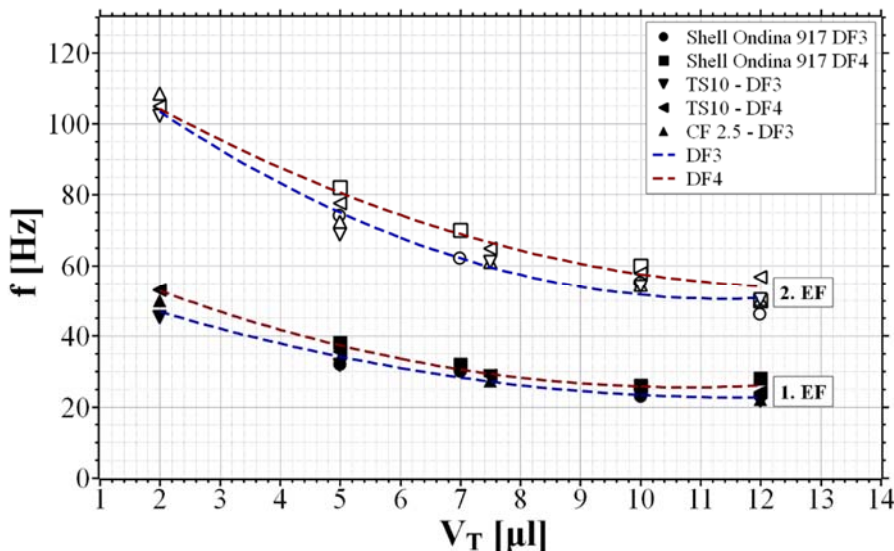


Abbildung 23: Eigenfrequenzen der untersuchten Öl-Tropfen für unterschiedliche Volumina und unterschiedliche Filtervliese

Die im vorangegangenen Abschnitt dargestellte Charakterisierung der Öltropfen auf typischen Filtervliesen stellt im Wesentlichen die Ergebnisse der APs 2, 3, 4 sowie in Teilen von AP 7 dar (vgl. Abbildung 3). Da nun die Eigenheiten typischer Öltropfen bekannt sind, kann nun in einem nächsten Schritt eine gezielte Vibrationsanregung erfolgen, um die Tropfenmobilisierung zu verbessern. Dabei wird die Anregung auf zwei Arten geschehen: zum einen über eine Anregung des Substrats (d.h. des Filtervlieses) und zum anderen über eine Strömungsfluktuation. Zunächst wird über die Effekte bei einer Anregung des Substrats berichtet.

3.2 Analyse des Verhaltens von einzelnen Öltropfen bei Vibrationsanregung des Vliesmediums

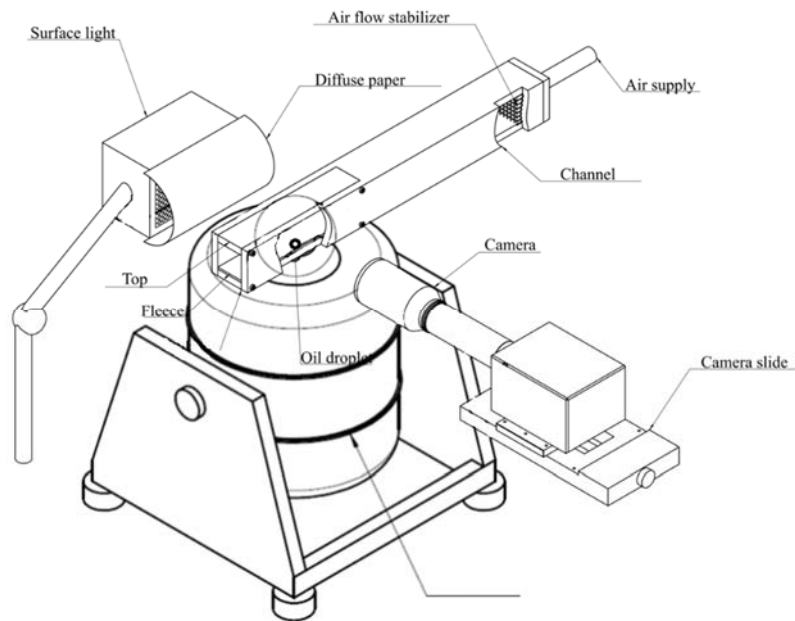


Abbildung 24: Darstellung des modifizierten Versuchsstands zur Analyse der Überlagerung von Anströmung und Vibration auf die Tropfenbewegung

Basierend auf den Ergebnissen des vorangegangenen Kapitels wurden zwei grundlegende Untersuchungen zur Überlagerung von Vibrationsanregung und einer Volumenkraft vorgenommen. Da in vorherigen Untersuchungen (vgl. [3]) gezeigt werden konnte, dass eine Vibrationsanregung mit der 2. EF in Normalenrichtung bzgl. des Substrats den deutlichsten Effekt aufweist, wurde zunächst diese Anrichtungsrichtung untersucht. Zum einen wurde der in Abbildung 16 gezeigte Versuchsstand zur Anströmung eines Tropfens erweitert, so dass eine Vibrationsanregung der unteren Kanalwand (mit dem Tropfen) durch einen Shaker erfolgen kann (siehe Abbildung 24). Hier wird die Überlagerung von Vibration und aerodynamischer Kraft untersucht. Wie in Abbildung 25 zu sehen ist, bewirkt hier aber weder eine Anregung mit der 2. EF, noch mit der 1. EF eine signifikante Verringerung der kritischen Geschwindigkeit, was in starkem Widerspruch zu den Ergebnissen aus [3] steht.

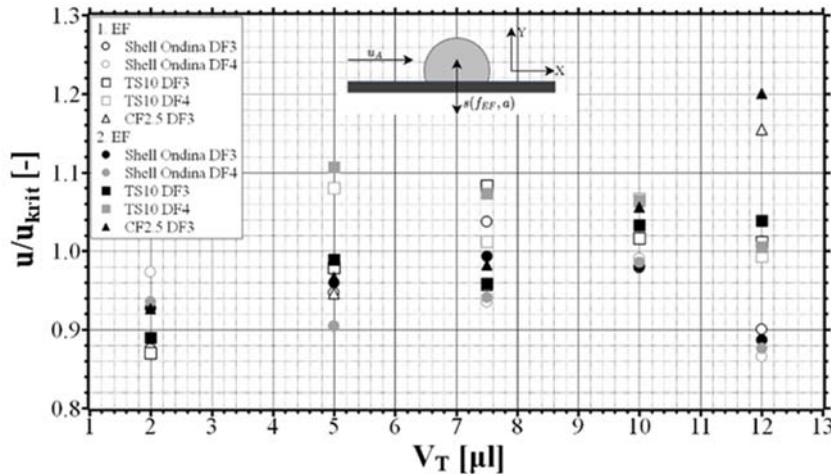


Abbildung 25: Ergebnis der Überlagerung von Anströmung und Vibration bei Anregung in Wand-Normalenrichtung

In einem zusätzlich durchgeführten Versuch wurde die Überlagerung von Vibration und Gravitationskraft untersucht. Hierzu wurde der in Abbildung 13 gezeigte Aufbau um 90° geneigt, so dass eine Vibration in Normalenrichtung zur Vliesoberfläche erfolgen konnte. Darüber hinaus wurde bei diesem Versuch der Tropfen über die Spritzenpumpe erzeugt, d.h. das Tropfenvolumen steigt kontinuierlich bei überlagerter Vibration an. Das Ergebnis für diese Untersuchung ist in Abbildung 26 gezeigt. Man erkennt, dass bei einer Vibrationsanregung in dieser Richtung der Tropfen deutlich länger am Vlies haften bleibt. Während der nicht-angeregte Tropfen auf DF3 in diesem Fall bereits nach etwa 9 Sekunden die Haftung verliert und losläuft, verbleibt der stetig wachsende Tropfen bei Vibrationsanregung länger am Vlies (bis 12,5 sec bei 200 Hz bzw. 13 sec bei 100 Hz). D.h. der Tropfen kann bei Vibrationsanregung in dieser Raumrichtung deutlich größer werden, als bei reinem Schwerkrafteinfluss.

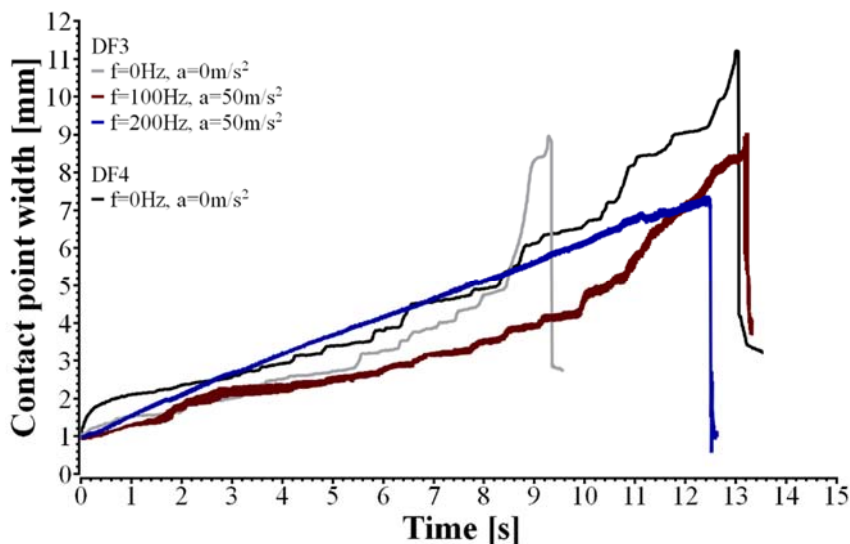


Abbildung 26: Ergebnis der Überlagerung von Gravitation und Vibration bei Anregung in Wand-Normalenrichtung

Dieser zunächst überraschende Effekt konnte über eine genauere Analyse der Tropfenkontur erklärt werden. Es zeigte sich, dass der Tropfen infolge der Anregung in Vlies-Normalenrichtung eine signifikant bessere Benetzung aufweist. Der Tropfen wird im Vergleich vor und nach der Anregung breiter und flacher. Eine Analyse der Tropfenkontur über die Rekonstruktion eines Rotationskörpers und anschließender Volumenberechnung zeigte, dass der (sichtbare) Tropfen nach einer Vibrationsanregung in Normalen-Richtung kleiner wird. Offensichtlich sorgt die Vibration in diesem Fall dafür, dass der Tropfen stärker in das Fasergeflecht des Vlieses eindringt und somit besser haftet. Im Folgenden wurde diese Vibrationsanregung daher nicht weiterverfolgt.

In den genannten Vorarbeiten [3] wurde bereits festgestellt, dass auch eine Vibrationsanregung in tangentialer Richtung, d.h. entlang der Vlies-Orientierung eine signifikante Mobilisierung der Tropfen bewirken kann, wenn mit der 1. oder 3. EF des Tropfens angeregt wird. Daher wurde diese Art der mechanischen Vibrationsanregung weiterverfolgt. Abbildung 27 zeigt den verwendeten Aufbau mit nun senkrecht orientierter Halterung für das Filtervlies, so dass nun eine Anregung tangential zur Vliesoberfläche und entlang der Gravitationsrichtung mittels Shaker aufgeprägt werden kann. Zur Analyse der Tropfenbewegung kommt wieder die bewährte Methode des Schattenverfahrens und der Bildverarbeitung zur Konturerkennung und Auswertung zum Einsatz.

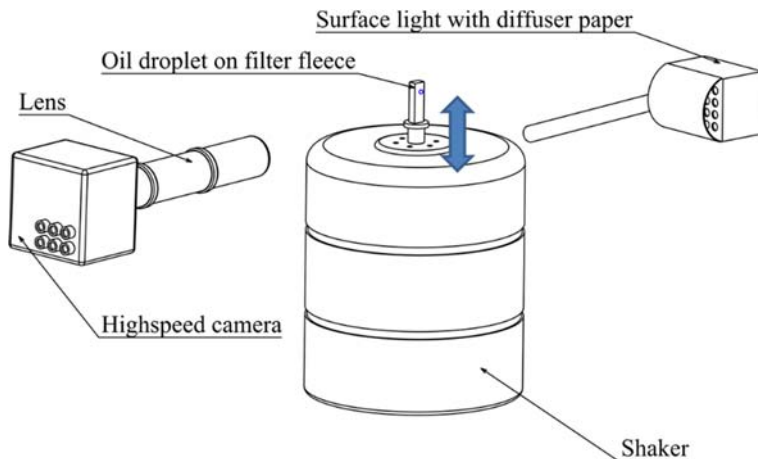


Abbildung 27: Darstellung des Versuchsstands zur Überlagerung von Gravitation und Vibration bei Anregung in tangentialer Richtung bezüglich der Vliesoberfläche

In Abbildung 28 ist beispielhaft das Ergebnis für eine Vibrationsanregung mit unterschiedlichen Beschleunigungen für einen hochviskosen Ondina-Tropfen (konstantes Volumen von $10 \mu\text{l}$) dargestellt. Man erkennt in der Darstellung der Kontaktpunktposition die Schwingung infolge der Anregung sowie eine schrittweise Bewegung der Kontaktlinie. Bei höheren Beschleunigungen erfolgt diese gestufte Tropfenbewegung schneller und häufiger. Man beachte, dass hier ein hochviskoses Öl verwendet wird, bei dem Schwingungen aufgrund der Viskosität stark gedämpft werden. Trotzdem ist hier deutlich eine vibrations-initiierte Bewegung vorhanden. Die schrittweise Bewegung des Tropfens ist mit der Heterogenität der Vliesoberfläche zu erklären.

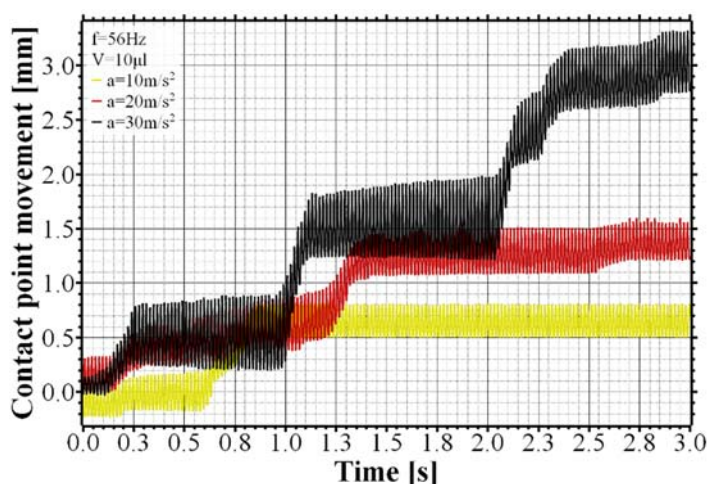


Abbildung 28: Ergebnis der Überlagerung von Gravitation und Vibration bei Anregung in tangentialer Richtung bezüglich der Vliesoberfläche

Wie in Abbildung 5 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu erkennen ist, ist die Oberfläche des Filtervlieses strukturiert. D.h. ein in Bewegung gesetzter Tropfen kann sich an einer anderen Stelle wieder anhaften, bevor er wieder durch die Krafteinwirkung losgelöst wird. Zieht man die Ergebnisse aus den oben bereits beschriebenen Neigeversuchen hinzu, wird deutlich, dass ein $10 \mu\text{l}$ -Ondina-Tropfen ohne Vibrationsanregung bei einer Vliesorientierung von 90° haften bleiben

würde, d.h. die Schwerkraftwirkung alleine nicht ausreicht, um den Tropfen in Bewegung zu versetzen. Eine Vibrationsanregung in tangentialer Richtung sorgt daher für ein Loslösen der Tropfen. In dem hier beschriebenen Versuch wurde gezielt mit der relevanten Frequenz für einen 10 μl großen Tropfen angeregt.

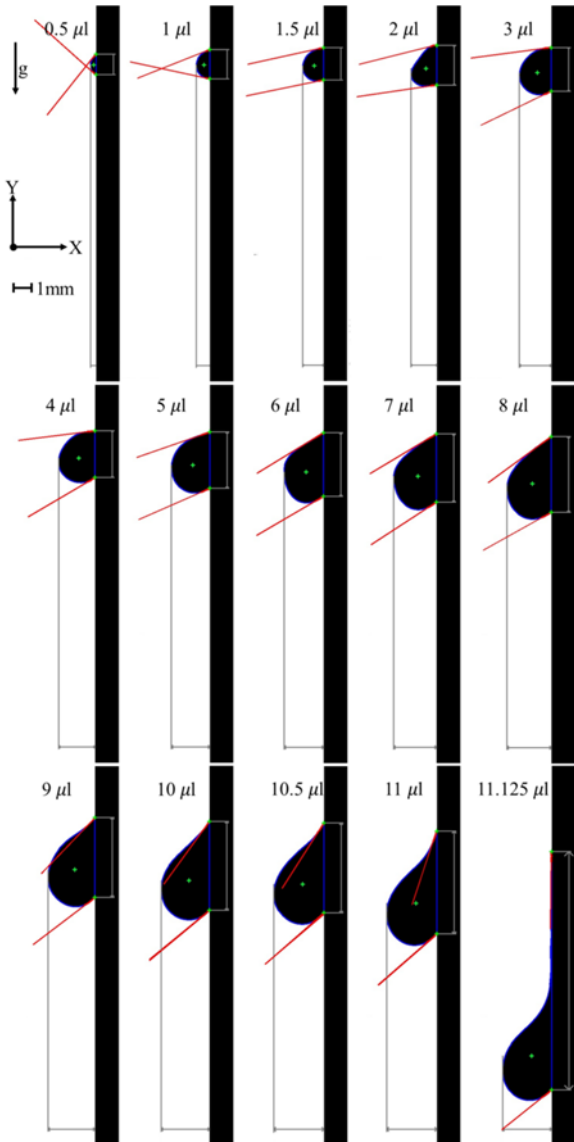


Abbildung 29: Visualisierung des Tropfenwachstums aus dem Filtervlies unter Schwerkrafteinfluss bei gleichzeitiger Überlagerung einer Vibrationsanregung in y-Richtung

Am realen Filterelement wachsen die Tropfen mit der Zeit an, d.h. das Tropfenvolumen steigt und damit verändert sich kontinuierlich auch das natürliche Oszillationsspektrum des Tropfens. Es steht somit die Frage im Raum, inwieweit mit einer Anregung mit einer konstanten Frequenz bei wachsenden Tropfen eine Bewegung initiiert werden kann. Der Aufbau aus Abbildung 27 wurde dahingehend modifiziert, dass wieder mittels Spritzenpumpe ein Tropfen gezielt erzeugt wird, welcher aus dem Vlies austreten kann. In Abbildung 31 ist das Wachstum eines Tropfens aus dem Vlies bei gleichzeitiger Vibrationsanregung in y-Richtung beispielhaft gezeigt. Zu erkennen ist die zunehmende Deformation des Tropfens infolge des zunehmenden Volumens und der damit zunehmenden Gravitationskraft. Außerdem ist die vibrationsinduzierte Schwankung der Kontaktwinkel (hier über die entsprechenden roten Tangenten an den beiden sichtbaren Kontaktpunkten) zu sehen. In diesem Fall löst sich der Tropfen bei einem Volumen von etwas mehr als 11 μl ab und gleitet schwerkraftgetrieben nach unten über die Vliesoberfläche.

Eine detaillierte Analyse der Tropfenbewegung ist in Abbildung 30 gezeigt. Die der Tropfenposition überlagerte Oszillation (vgl. Abbildung 28) ist hier herausgerechnet und somit nicht sichtbar. Die Tropfenbewegung kann in 3 Phasen eingeteilt werden. In Phase I bewegt sich nur der untere Kontaktpunkt infolge des Tropfenwachstums und der Schwerkraftwirkung. Bei Erreichen des kritischen Volumens erfährt der Tropfen eine sprunghafte Geschwindigkeitserhöhung, und der Tropfen bewegt

sich mehrere Tropfendurchmesser nach unten (Phase II), wobei er schließlich wieder haften bleibt. Wie auf den Bildern des Tropfens in der Abbildung zu erkennen ist, weist der Tropfen in dieser und der folgenden Phase eine ausgeprägte Schleppenbildung auf, d.h. es besteht unter Umständen noch Kontakt zu der Öl-Austrittsposition. Es wird kontinuierlich weiter Öl gefördert, so dass möglicherweise der Tropfen in dieser zweiten Haftphase (Phase III) weiter mit Öl versorgt wird und wachsen kann. Aus den Aufnahmen ist allerdings kein merkliches Anwachsen des Tropfens zu erkennen. D.h. das Wiederablösen des Tropfens ist mit hoher Wahrscheinlichkeit wie bei den Versuchen mit kon-

stantem Tropfenvolumen (vgl. Abbildung 28) dadurch bedingt, dass der Tropfen durch die Schwingung wieder in einen Instabilitätszustand versetzt wird, der sich erst nach einer bestimmten Zeit einstellt. Ab dem kritischen Volumen und dem Übergang in Phase II sind die Volumina der x-Achse eher bzw. zu einem nicht unwesentlichen Teil als summierter geförderter Volumenstrom zu sehen und nicht als Volumen des Tropfens in Bewegung.

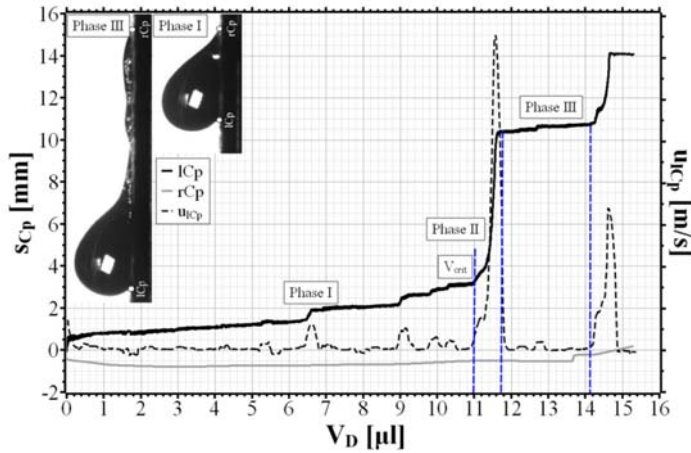


Abbildung 30: typische Bewegung eines Tropfens bei der Überlagerung von Gravitation und Vibration bei Anregung in tangentialer Richtung bezüglich der Vliesoberfläche mit kontinuierlich anwachsendem Tropfen

Der Vergleich der Tropfenbewegung ohne Vibrationsanregung, mit Vibrationsanregung in Vlies-Normalenrichtung („horizontal“) sowie mit Vibrationsanregung in tangentialer (Schwerkrafts-) Richtung („vertikal“) ist beispielhaft in Abbildung 31 gezeigt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Tropfen mit vertikaler Anregung deutlich eher ablöst, d.h. ein geringeres finales Volumen erreicht, bevor die sprunghafte Bewegung des Tropfens einsetzt, als im Fall ohne Vibrationsanregung. Bei Anregung in Vliesnormalenrichtung wächst der Tropfen lediglich immer weiter und verschiebt somit die Position der Kontaktlinie. Hinzu kommt, dass wie gezeigt bei dieser Anregungsrichtung der Tropfen eine bessere Benetzung aufweist bzw. in das Vlies einsinkt.

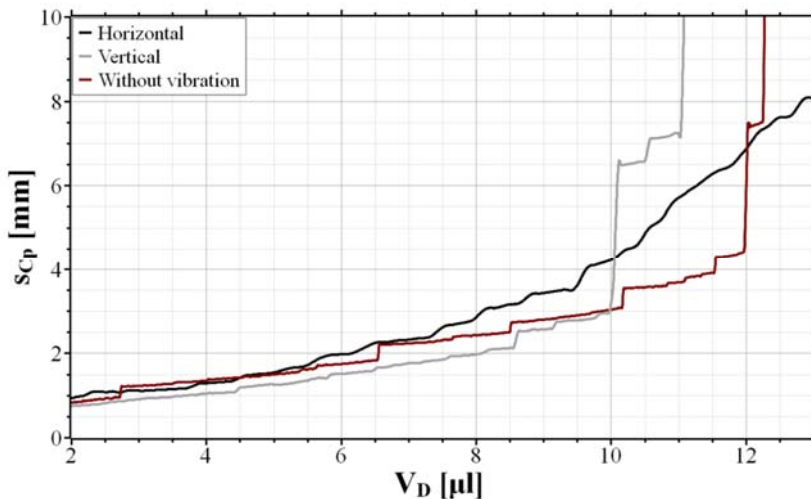


Abbildung 31: Ergebnis der Überlagerung von Gravitation und Vibration bei Anregung in tangentialer Richtung bezüglich der Vliesoberfläche („vertikal“) mit kontinuierlich anwachsendem Tropfen im Vergleich zu Fällen mit Anregung in Normalenrichtung („horizontal“) und ohne Vibrationsanregung

Es bleibt zu untersuchen, inwieweit das Tropfenwachstum den hier gezeigten Effekt einer Vibrationsanregung beeinflusst, da offensichtlich bei der Instabilität des Tropfens eine zeitliche Komponente besteht. Daher wurde systematisch untersucht, ob der Fördervolumenstrom des Öls in dem Versuch nach Abbildung 27 sich auf die Mobilisierung auswirkt. Es wurden verschiedene Volumenströme über die Spritzenpumpe vorgegeben, beginnend bei 0,1 µl/s bis 1 µl/s. Für diese Volumenströme wurde derselbe Versuch durchgeführt, wie er in Abbildung 31 dargestellt ist. Das in Abbildung 32 dargestellte Zeitverhältnis bezieht sich auf die Dauer bis zum Ablösen des Tropfens was letztlich

über den Volumenstrom mit dem Tropfenvolumen verknüpft ist. Es zeigt sich, dass ein positiver Effekt einer Vibrationsanregung für niedrige Volumenströme zu verzeichnen ist. Dies spricht wieder dafür, dass der Instabilitätsmechanismus, der zum Ablösen der Tropfen führt, eine Ausbildungszeit braucht, die bei großen Förderraten d.h. hohen Tropfenwachstumsraten nicht mehr gegeben ist. Es besteht aber die Möglichkeit, über eine Anpassung der Anregungsfrequenz auch bei hohen Wachstumsraten einen positiven Effekt zu erzielen.

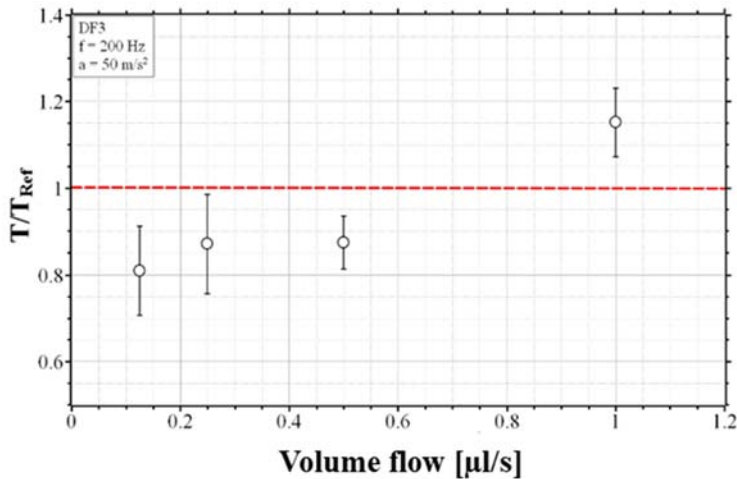


Abbildung 32: Effekt der Tropfenwachstumsrate auf die Ablösezeit bei Überlagerung von Gravitation und Vibration bei Anregung in tangentialer Richtung bezüglich der Vliesoberfläche

Es wurden daher weitere Versuche durchgeführt, um die Abhängigkeit des Effekts eines vorzeitigen Ablösens vom Filtervlies von der Anregungsfrequenz zu untersuchen. Da sich mit dem Tropfenwachstum auch die natürlichen Eigenfrequenzen verschieben und darüber hinaus das poröse und heterogene Material des Filtervlieses einen Einfluss auf die Haftung des Tropfens haben, ist nicht davon auszugehen, dass bei einer tangentialen Vibrationsanregung des Vlieses auch wie in [3] die 1. und 3. EF die besten Resultate liefern. Ein typisches Ergebnis einer solchen Reihenuntersuchung ist in Abbildung 33 für einen niedrigen Volumenstrom sowie verschiedene Öle und Filtermaterialien dargestellt.

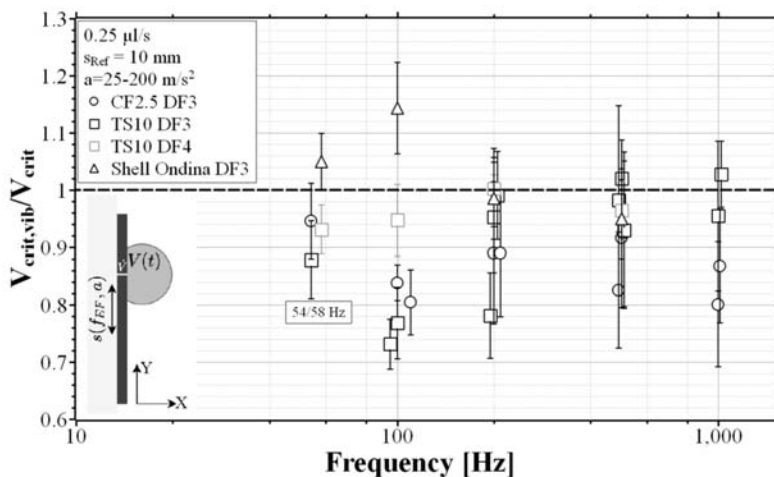


Abbildung 33: Effekt der Anregungsfrequenz auf das Ablösevolumen bei Überlagerung von Gravitation und Vibration bei Anregung in tangentialer Richtung bezüglich der Vliesoberfläche

Für niedrig- bis mittelviskose Öle zeigt sich fast über das ganze Frequenzspektrum ein positiver Effekt. Für hochviskose Öle zeigt sich ein leichter Effekt bei höheren Frequenzen. Deutlich zu erkennen ist allerdings, dass bei etwa 100 Hz insbesondere für mittelviskose Öle eine signifikante Reduktion des finalen Tropfenvolumens zu verzeichnen ist. Diese Frequenz entspricht dann in etwa der 3. EF für einen 10 µl-Tropfen, was in etwa der Tropfengröße entspricht, bei denen die Tropfen

infolge der Vibrationsanregung ablösen. Dass eine Anregung mit der 3.EF eine Mobilisierung bewirken kann, wurde auch schon in den genannten Vorarbeiten [3] festgestellt. Die dargestellten Ergebnisse für den Einzeltropfen am Filtervlies fügen sich demnach auch in die bereits bekannten Zusammenhänge ein. Gleichzeitig liegen hier aufgrund der speziellen Randbedingungen dennoch spezielle weitere Zusammenhänge vor. Die vorgenannten Ergebnisse wurden in der internationalen Fachzeitschrift „Physics of Fluids“ publiziert und als sogenannter „editor’s pick“ ausgezeichnet und hervorgehoben [5].

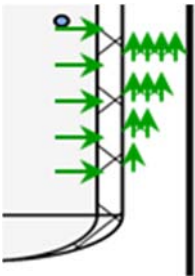


Abbildung 34:
Skizze zur Erläuterung des steigenden Volumenstroms mit zunehmender Lauflänge im Spalt einer Filterkartusche

Es bleibt zu untersuchen, wie die festgestellten Effekte von einer Überlagerung mit einer Strömung entgegen der Schwerkraft beeinflusst werden, d.h. wenn die aerodynamische Kraft entgegen der Schwerkraft wirkt. Eine solche Konfiguration liegt u.a. bei einem zylindrischen Filterelement vor, bei dem zwischen Gehäusewand und der Filterkerze ein Spalt besteht, in welchem das gereinigte Gas in Richtung Ausgang am Filterkopf strömt (vgl. Abbildung 1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dabei ist zu beachten, dass über die Lauflänge des Kanals der Volumenstrom und damit die Geschwindigkeit zunimmt.

Im IGF-Projekt 19109 N konnte bereits mittels Infrarot-Kamera die lokale Beladung eines Filters untersucht werden. Es zeigte sich, dass insbesondere im unteren Teil des Filters die Flüssigkeitsbeladung ansteigt, d.h. vor allem in diesem Bereich ein Durchtritt der Flüssigkeit zu erwarten ist. In diesem unteren Bereich sind naturgemäß aber nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten entgegen der Schwerkraft vorhanden, da hier erst der Beginn der Volumenstrom-Kumulation stattfindet (vgl. Abbildung 34). Es ist zu erwarten, dass hier die aerodynamische Kraft auf den Tropfen gering ist, so dass der Schwerkrafteinfluss sowie der Vibrationseinfluss überwiegen. Größere Volumenströme und damit Kanalgeschwindigkeiten liegen erst im oberen Bereich einer Filterkartusche vor.

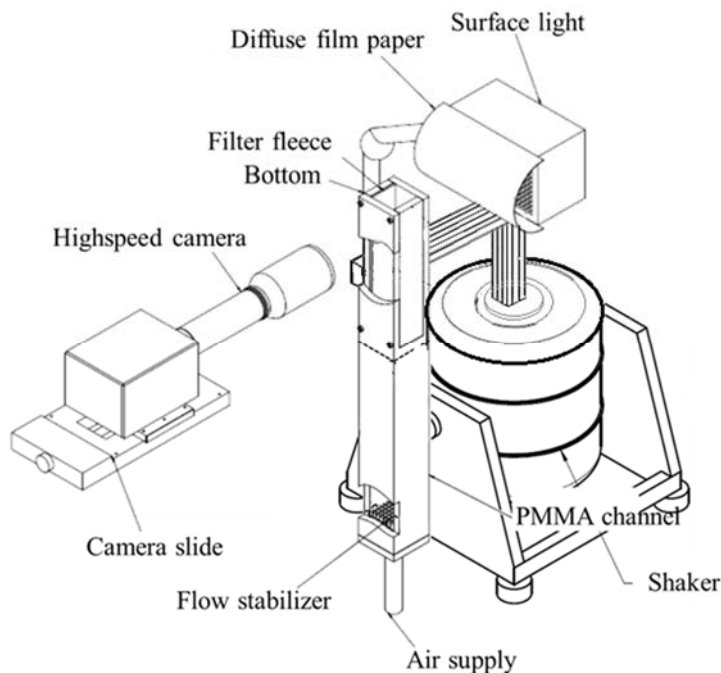


Abbildung 35: Aufbau für die Untersuchung von Anströmung entgegen der Schwerkraft mit optionaler und Vibrationsanregung in Richtung der Kanalachse

Es wurden daher zusätzlich Untersuchungen mit einer Überlagerung der aerodynamischen Kraft infolge der Anströmung, der Gravitationskraft und einer mechanischen Vibration durchgeführt, um auszuloten, ob und wie aerodynamische Effekte zu berücksichtigen sind. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 35 gezeigt. Bei diesem Versuchsaufbau ist die Vibrationsanregung in vertikaler Richtung optional zuschaltbar.

Zunächst wurden Untersuchungen ohne Vibrationsanregung durchgeführt. Für niedrige bis moderate Anströmgeschwindigkeiten zeigten sich keine relevanten, stärkeren Unterschiede in der Tropfentopologie zu Fällen mit einem reinen Schwerkräfteinfluss. Die Tropfendeformation bei wachsendem Tropfenvolumen ist leicht verändert gegenüber dem Fall ohne Anströmung hinsichtlich der Schwerpunktlage und der Kontaktwinkel. Wie in Abbildung 36 zu erkennen, „bäumt“ sich der Tropfen infolge der aerodynamischen Kraft stärker auf. Dennoch überwiegt der Schwerkräfteinfluss. Die kritische Tropfengröße ist bei niedrigen Anströmgeschwindigkeiten für alle untersuchten Konfigurationen ähnlich bzw. leicht größer als für den Fall ohne überlagerte aerodynamische Kraft. Bei erhöhter Anströmgeschwindigkeit kann der Tropfen ein größeres finales Volumen annehmen, da infolge der Scherwirkung der Tropfen deformiert wird und eine größere Kraftangriffsfläche ergibt. D.h. die erhöhte aerodynamische Kraft wirkt der Schwerkraft entgegen und verhindert bis zu einem bestimmten Volumen das Tropfenablösen.

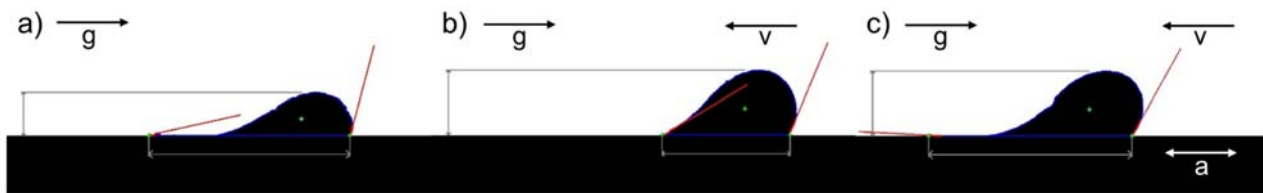


Abbildung 36: ausgewählte Tropfentopologien kurz vor dem Ablösen des Tropfens jeweils für den Fall a) ohne Strömung, b) mit höherer Anströmung (100 NI/min) und c) mit höherer Anströmung (100 NI/min) und Vibrationsanregung mit 100Hz.

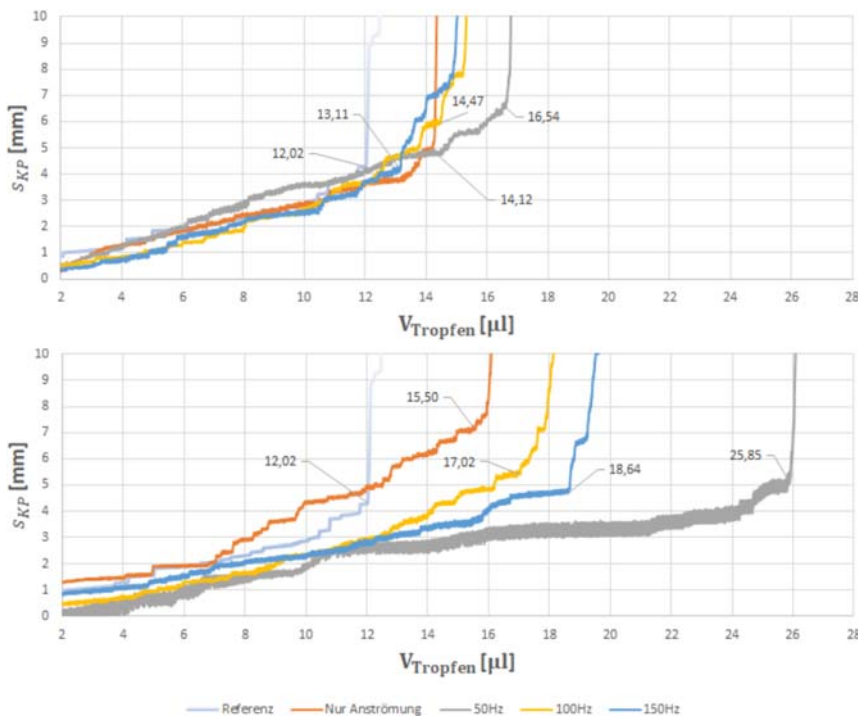


Abbildung 37: Darstellung der Tropfenschwerpunktlage für anwachsende Tropfen bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten (oben: 75 NI/min, unten: 100 NI/min) und unterschiedlichen Anregungsfrequenzen

In Abbildung 37 sind die typischen Verläufe der Schwerpunktlage für anwachsende Tropfen bei zwei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten dargestellt. Im Vergleich zum Referenzfall (nur

Schwerkrafteinfluss, graue Linie) zeigt sich, dass eine starke oder sprunghafte Positionsänderung (nahezu senkrechte Liniensegmente) bei einer zusätzlichen Anströmung erst bei größeren Tropfen erfolgt (rote Linie) und mit zunehmender Geschwindigkeit sich weiter zu größeren Tropfen verschiebt. Der Fall mit einer Anströmung von 75 NI/min stellt hinsichtlich des Vibrationseinflusses einen Grenzfall dar: man erkennt, dass der Tropfen bei Anregungsfrequenzen von 100 und 150 Hz (gelbe und blaue Linien) gegenüber dem Fall ohne Vibration (rote Linie) etwas früher in ein gestuftes Bewegungsmuster treten, d.h. leicht kleinere finale Tropfenvolumen erreichen, wohingegen bei 50 Hz der Tropfen deutlich später erst ablöst. Bei noch höherer Anströmung von 100 NI/min, hat die hier eingestellte Vibrationsanregung mit einer Beschleunigung von $a=25 \text{ m/s}^2$ schließlich keinen positiven Effekt mehr, sondern bewirkt hier signifikant größere finale Tropfenvolumina. Hohe Anströmgeschwindigkeiten entgegen der Schwerkraftrichtung sind hinsichtlich des Tropfenablösens grundsätzlich problematisch.

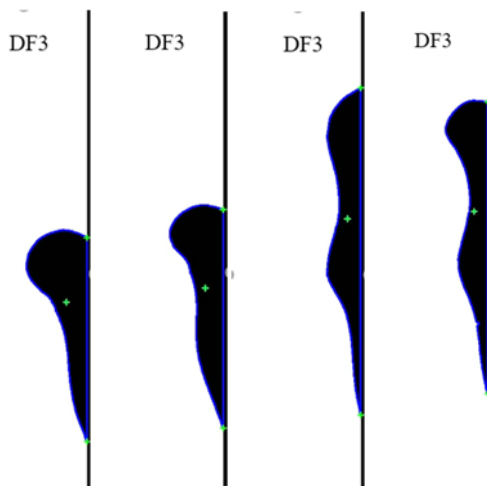


Abbildung 38: typisches Bild eines nach oben wandernden/kriechenden Tropfens bei hohen Öl-Fördervolumenströmen und hohen Anströmgeschwindigkeiten

Darüber hinaus zeigt sich für hohe Öl-Fördervolumenströme, dass bei gleichzeitig hohen Anströmgeschwindigkeiten die austretenden, wachsenden Tropfen stark entgegen der Schwerkraftrichtung ausgelenkt und deformiert werden, d.h. die Tropfen dehnen sich stark entgegen der Schwerkraftrichtung aus. Dabei geraten auch diese Tropfen in eine charakteristische Schwingung und bilden eine typische Form mit mehreren Buckeln aus, wie in Abbildung 38 beispielhaft gezeigt ist. Dabei kriecht der Tropfen bei hohen Anströmgeschwindigkeiten entgegen der Schwerkraft in einer Art raupenförmigen Bewegung. Eine solche Bewegungsform wurde in der Literatur bislang nur für hochviskose Tropfen auf horizontalen, glatten Substraten beobachtet [7]. Für größere Ölbeladungen ist ein solcher Fall unter Umständen im oberen Bereich eines Filterelements relevant.

3.3 Analyse des Verhaltens von Öltropfen bei Strömungszillation

Vorarbeiten der FE2 (Lehrstuhl Strömungsmechanik, Bergische Universität Wuppertal) haben gezeigt, dass die Tropfenoszillation klar mit einer Strömungszillation korreliert [6]. Angeströmte Tropfen bilden eine Strömungsablösung aus, die von größeren Wirbeln charakterisiert ist, welche vom Tropfen abschwimmen. Die Ablösefrequenz, bzw. die charakteristische Frequenz dieser Wirbel ist identisch mit der 2. EF der natürlichen Tropfenoszillation (Auf- und Ab-Bewegung). Es ist somit zu vermuten, dass eine oszillierende Strömung die Schwingungscharakteristik eines Tropfens und somit seine Stabilität beeinflussen kann, da Strömung und Tropfenschwingung miteinander gekoppelt sind. Im Folgenden wird daher untersucht, ob eine Beeinflussung von Tropfen durch eine Strömungszillation möglich ist, bzw. wie die charakteristischen Frequenzen verändert werden.

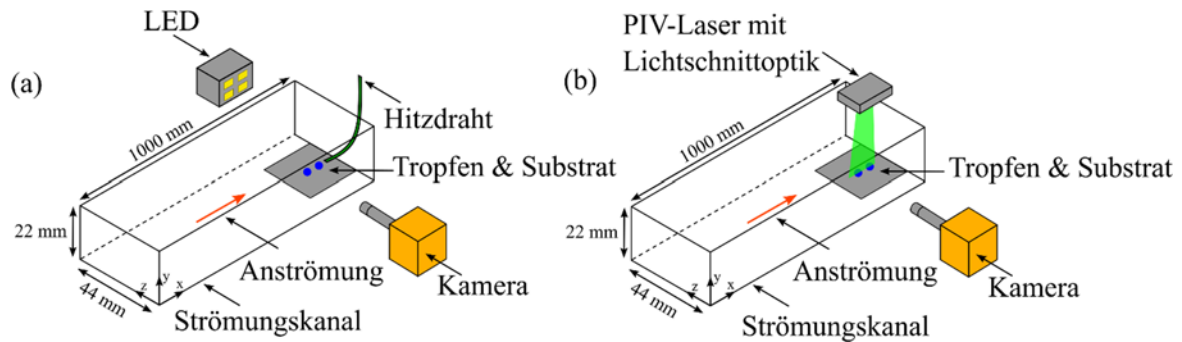


Abbildung 39: Darstellung der Mess-Anordnungen für die Untersuchung der strömungsmechanischen Kopplung von Tropfenpaaren mittels Hitzdraht-Anemometrie und Particle-Image Velocimetry (PIV)

In einem ersten Schritt wird untersucht, wie sich benachbarte Tropfen gegenseitig beeinflussen, da bei der Tropfenbildung an Filtermedien nur selten vereinzelte Tropfen auftreten, sondern in der Regel viele Tropfen in engen Abständen auftreten (vgl. Abbildung 11). Dazu wurde der Strömungskanal aus Abbildung 16 verwendet und hier im Messbereich jeweils 2 Tropfen unterschiedlicher oder gleicher Größe in unterschiedlichen Abständen positioniert. Mittels Hitzdraht-Anemometrie wurde die Strömung im Nachlauf des Tropfenpaares detailliert vermessen, um über die aufgenommenen Zeitreihen und eine anschließende Frequenzanalyse die Oszillationscharakteristik der Strömung zu erfassen. Darüber hinaus wurde das Strömungsfeld um die Tropfen mittels Particle-Image Velocimetry (PIV) vermessen, um die räumliche Wirbelcharakteristik der Strömung zu analysieren. Die Ergebnisse wurden in einer Fachzeitschrift publiziert und sind hier zusammengefasst [8].

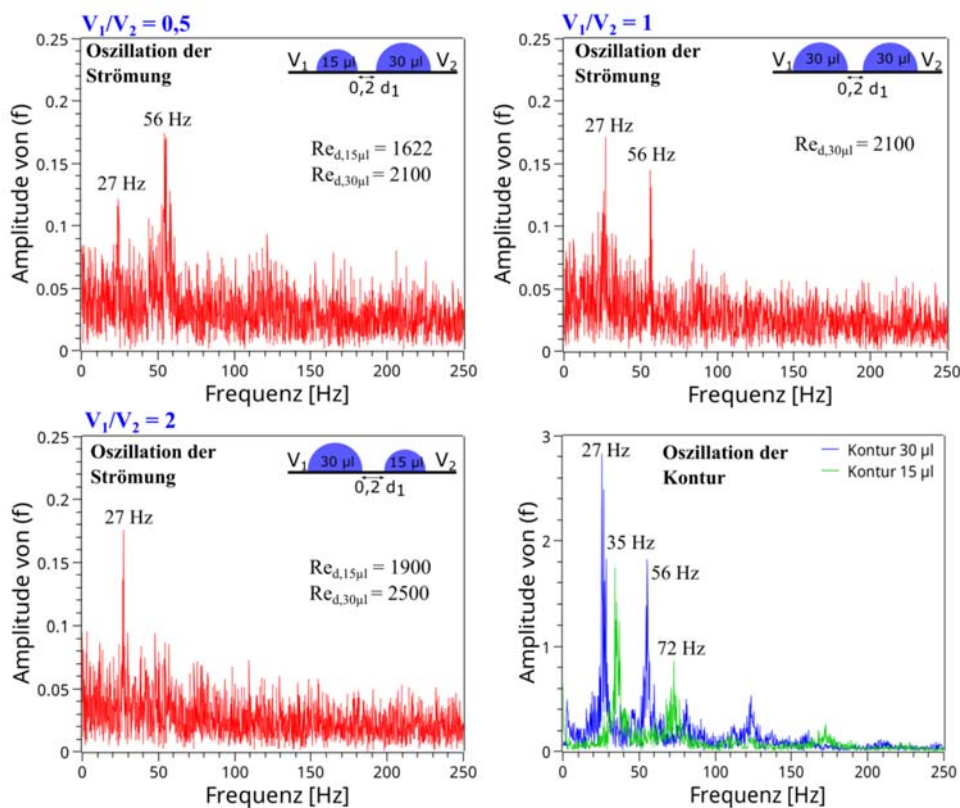


Abbildung 40: Darstellung der gemessenen Frequenzspektren im Nachlauf eines Tropfenpaares für verschiedene Kombinationen aus Tropfenvolumina im Vergleich zu dem typischen Oszillationsfrequenzspektrum der jeweiligen Einzeltröpfchen.

Wie in Abbildung 40 zu erkennen ist, zeigt das Frequenzspektrum der Strömung charakteristische Frequenzpeaks, die sich den Eigenfrequenzen der Tropfen zuordnen lassen. Ist ein großer Tropfen in Strömungsrichtung hinter einem kleinen Tropfen positioniert, wird der Nachlauf (wie zu erwarten)

von der 2. EF des großen Tropfens dominiert, die 1. EF, welche der horizontalen Schwingung des Tropfens entspricht ist hier allerdings auch sichtbar, was bei Einzeltropfen nicht der Fall ist (vgl. [6]). Sind die Tropfen gleich groß, steigt die Amplitude des ersten Frequenzpeaks (1. EF). Wird schließlich ein großer Tropfen vor einen kleinen Tropfen gesetzt, wird das Frequenzspektrum von der 1. EF Frequenz des großen Tropfens dominiert. Dies trifft dann zu, wenn der Abstand zwischen den Tropfen gering ist (kleiner als 1 Tropfendurchmesser). Wie in Abbildung 41 zu erkennen ist, verändert sich das Frequenzspektrum mit zunehmendem Tropfenabstand wieder.

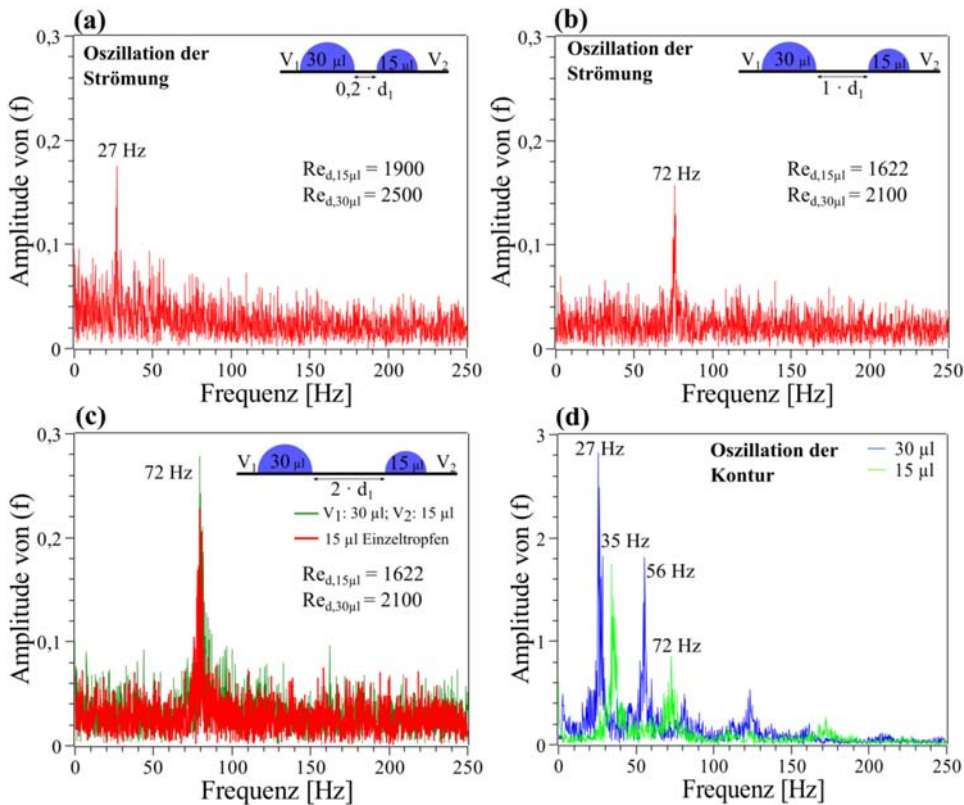


Abbildung 41: Darstellung der gemessenen Frequenzspektren im Nachlauf eines Tropfenpaares für verschiedene Tropfenabstände im Vergleich zu dem typischen Oszillationsfrequenzspektrum der jeweiligen Einzeltropfen.

Bei Vergrößerung des Abstands über einen Tropfendurchmesser hinaus wird wieder die typische Charakteristik eines Einzeltropfens im Spektrum sichtbar: der Peak im Spektrum liegt bei der 2. EF des hinteren Tropfens, auch wenn es sich um den kleineren Tropfen handelt. Die Erklärung für die Verschiebung der Strömungsozillationsfrequenzen kann mit den Ergebnissen der PIV-Messungen gefunden werden. Eine Momentaufnahme der Umströmung eines Einzeltropfens und eines Tropfenpaares ist in Abbildung 42 gezeigt. Das obere Bild zeigt die typische Wirbelströmung an einem Einzeltropfen infolge der Strömungsablösung. Dabei konnte in [2] und [6] schon gezeigt werden, dass die Wirbelfrequenz mit der vertikalen Oszillation des Tropfens (2. EF) korreliert. Deutlich zu erkennen ist das Abschwimmen der großskaligen Wirbel ausgehend von der Tropfenoberkante und die Ausbreitung und Aufweitung der Wirbel auf dem Weg stromab. Im unteren Bild ist die typische instantane Strömungstopologie für ein Tropfenpaar dargestellt. Bei Abständen unter einem Tropfendurchmesser liegt der hintere Tropfen genau im Nachlauf des vorderen (größeren) Tropfen. Zu erkennen ist, dass der hintere Tropfen das typische Abschwimmen der Ablösungsinduzierten großen Wirbel blockiert. Ungestört weisen diese typischerweise eine Frequenz entsprechend der 2. EF auf. Die Folge der Verblockung ist eine Veränderung der Schwingungscharakteristik des Tropfens und somit auch der Oszillation der Strömung im Tropfennachlauf. Die 1. EF des vorderen Tropfens prägt sich dem hinteren Tropfen auf und bewirkt so eine Verschiebung der Wirbelfrequenz der insgesamt abschwimmenden Wirbel. Liegt ein großer Tropfen hinter einem kleinen Tropfen, liegt zwar auch

hier bei Abständen unter einem Tropfendurchmesser der hintere Tropfen im Bereich des Wiederanlegens der abgelösten Strömung des vorderen Tropfens, wird aber nicht eingehüllt. Entsprechend scheint der hintere große Tropfen die Wirbelausbreitung vom vorderen Tropfen zu blockieren und im Tropfennachlauf werden lediglich die Frequenzen des großen Tropfens sichtbar. Mit zunehmendem Abstand der Tropfen zueinander nähert sich das Strömungsfeld um den hinteren Tropfen wieder dem eines Einzeltropfens an. Entsprechend dominiert dieser wieder das Spektrum der Wirbelfrequenzen.

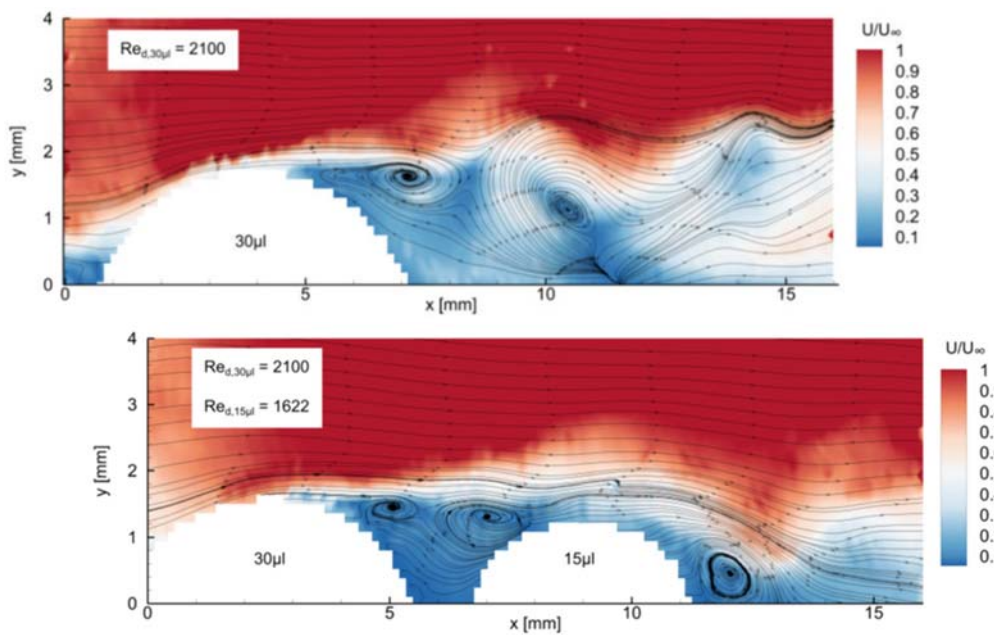


Abbildung 42: Darstellung der typischen Strömungstopologie bei der Umströmung eines Einzeltropfens (oben) und eines Tropfenpaares (unten)

Die oben beschriebene Analyse für Tropfenpaare zeigt zum einen deutlich, dass für eine gezielte Vibrationsanregung am Filterelement bei Auftreten einer Vielzahl von Tropfen unter Umständen ein anderer Frequenzbereich gewählt werden muss, um in der Gesamtheit eine Verbesserung der Tropfenmobilisierung zu erreichen. Zum anderen zeigt sich aber auch, dass es möglich ist, die Tropfenoszillationscharakteristik über eine Strömungszillation zu beeinflussen.

Dieser Ansatz wird zusätzlich in diesem Projekt verfolgt. Über den Einbau eines Störkörpers in den Strömungskanal (Spalt zwischen Filtervlies und Gehäuse) kann eine Strömungszillation erreicht werden. Dabei kann über die Form des Störkörpers und die Position im Kanal die entstehende Wirbelfrequenz über weite Bereiche eingestellt werden. Mittels Strömungssimulationen erfolgte eine Vorauslegung für die Wahl der Störkörper, der Dimensionen (Durchmesser) und der Position im Kanal für die relevanten Strömungsgeschwindigkeiten. Abbildung 43 zeigt beispielhaft die typische Strömungssituation im Nachlauf eines Störkörpers, welcher auf die Wand des Kanals gesetzt wurde. Es kann erwartet werden, dass die Wirbel, welche durch Ablösemeechanismen am Störkörper entstehen, einen Tropfen an der Wand zu einer Schwingung anregen und entsprechend bei passenden Frequenz zur Instabilität der Tropfenhaftung führen.

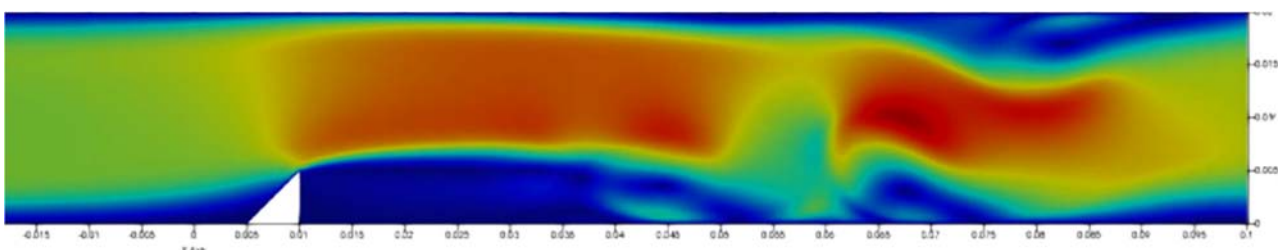


Abbildung 43: Simulation der Umströmung eines auf die Wand gesetzten beispielhaften Störkörpers

Aus den Strömungssimulationen ergab sich, dass das Strömungsfeld bei auf die Wand (Vliesseite) gesetzten Störkörpern eine zu wenig ausgeprägte Strömungsozillation hervorruft (vgl. Abbildung 43). Zwar kann eine Strömungsablösung mit Wirbelbildung erzeugt werden, dennoch bilden sich ungünstige größere Rezirkulationszonen aus, welche letztlich dazu führen, dass Tropfen in diesem Bereich nicht oder kaum gestört werden. Zudem kann ein Störkörper auf der Vliesseite dazu führen, dass ablaufendes Öl sich an diesen Körpern sammelt und aufstaut.

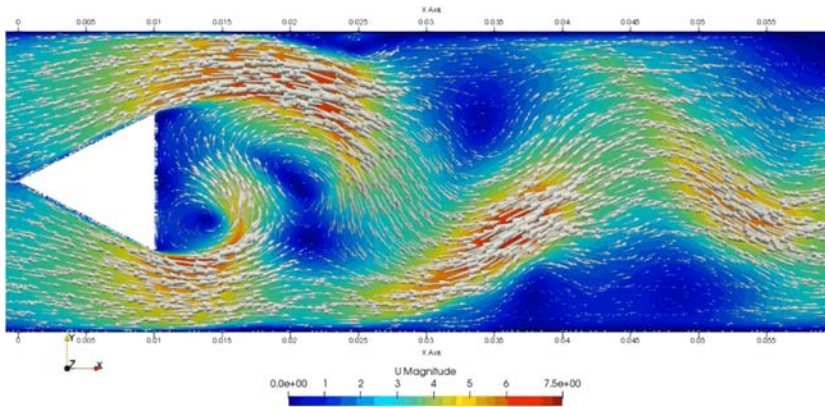


Abbildung 44: Ergebnis der Strömungssimulation für das oszillierende Strömungsfeld an einem dreieckigen Störkörper, der in Kanalmitte positioniert wurde

Auf Basis der Vorauslegung mittels Strömungssimulation wurde herausgearbeitet, dass Störkörper im Kanal quer zur Strömungsrichtung in der Kanalmitte oder im unteren Drittel (d.h. in Richtung des Vlieses) positioniert sein sollten. Ist dies der Fall, bilden sich in dem untersuchten relevanten Reynoldszahlbereich gegenläufige alternierende Wirbelstrukturen aus, welche sich an der Vliesseite des Kanals als stark schwankende Anströmung eines hier austretenden Tropfens ausprägen (Abbildung 44). Auf diese Weise kann eine strömungsinduzierte Oszillationsanregung der Tropfen gelingen. Basierend auf der einschlägigen Literatur und den Strömungssimulationen wurden zwei Störkörper-Geometrien ausgewählt, die über weite Reynoldszahlbereiche eine nahezu konstante Strouhalzahl der Wirbelbildung aufweisen und so die Frequenz der Wirbelbildung gut einstellbar ist. Abbildung 45 zeigt die ausgewählten und im Versuch verwendeten Störkörper.

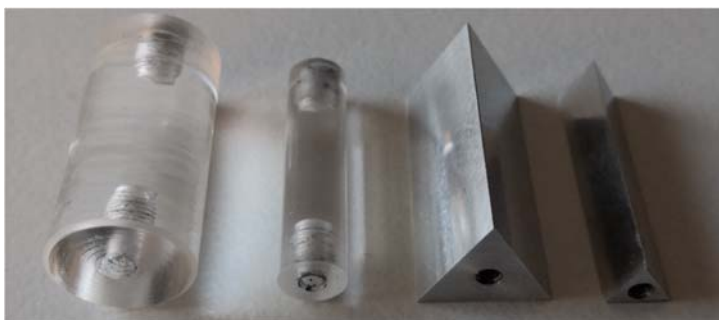


Abbildung 45: Foto der verwendeten Störkörper

Die Störkörper wurden in einen Strömungskanal an unterschiedlichen Positionen hinsichtlich des Wandabstands positioniert und das Strömungsfeld mittels Hitzdraht-Anemometrie vermessen, um die sich ausbildenden Strömungsozillationen erfassen zu können. Abbildung 46 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau. Der Strömungskanal ist senkrecht positioniert und wird von unten durchströmt, so dass sich auch hier Strömungsrichtung und Schwerkraftrichtung entgegenstehen. Zu sehen ist in der Abbildung auch, dass die Strömung hinter dem Störkörper mittels Hitzdraht-Anemometrie vermessen wird und dass gleichzeitig die Tropfenkontur mittels Schattenverfahren aufgenommen wird. Der Tropfen wird im hinteren Kanalbereich wieder mittels Spritzenpumpe aus dem hier angebrachten Filtervlies gedrückt.

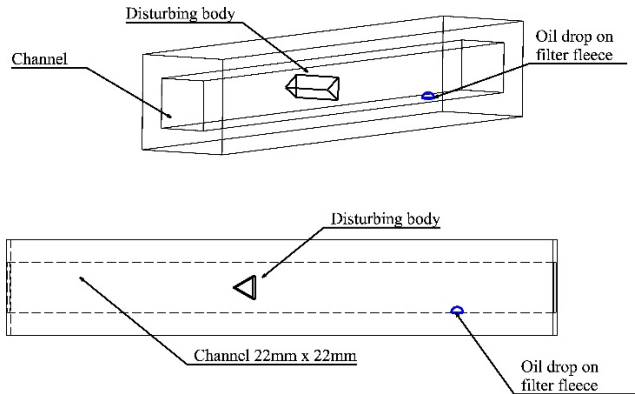
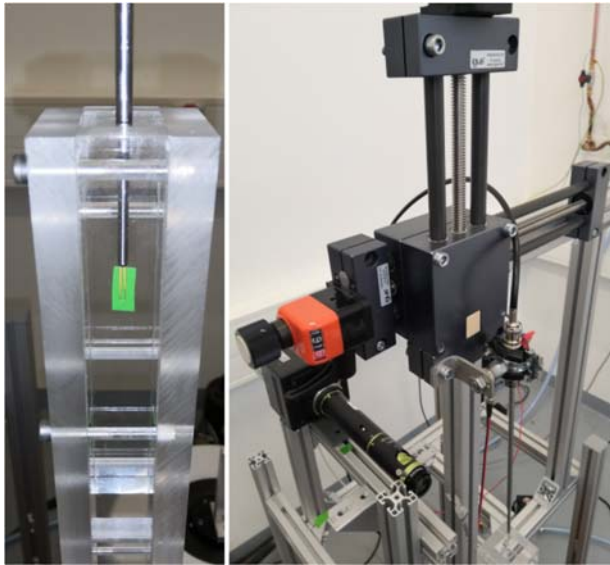
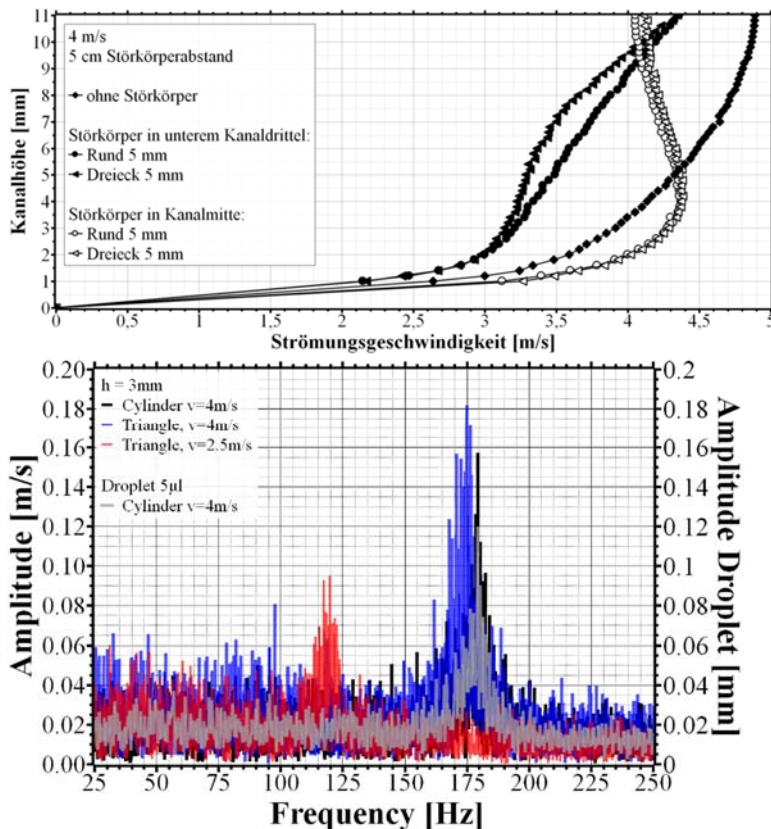


Abbildung 46: Foto des verwendeten Aufbaus für die Untersuchung des Einflusses eines Störkörpers auf die Tropfenmobilisierung (links) und schematische Darstellung der Positionierung von Störkörper relativ zum Tropfen (oben)

Die Ergebnisse für die Untersuchungen für Störkörper sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Zunächst erkennt man in Abbildung 47, dass für alle untersuchten Fälle im zeitlichen Mittel hohe Geschwindigkeitsgradienten in Wandnähe und Wendepunkte im Strömungsprofil erst in weiterem Abstand zur Wand auftreten. D.h., dass im Bereich der Tropfen an der Wand keine Rückströmungsgebiete auftreten und hohe Scherkräfte anliegen, die zu einer Mobilisierung des Tropfens führen können. Zudem zeigt Abbildung 48, dass sich im Nachlauf der Störkörper, wie zu erwarten, charakteristische Frequenzpeaks zeigen, die die Wirbelfrequenzen darstellen. Man erkennt am Beispiel der blauen und roten Kurve, dass sich die Wirbelfrequenz dabei auch gezielt einstellen lassen kann (hier über die Geschwindigkeit; da hier eine Reynoldszahl-Abhängigkeit vorliegt, ist ein Einstellen auch über den Durchmesser des Störkörpers realisierbar).



Gleichzeitig ist in Abbildung 48 auch für das Beispiel eines zylindrischen Störkörpers erkennbar, dass ein Tropfen im Störkörperrücklauf die charakteristische Frequenz der Anströmung übernimmt und nun mit dieser Frequenz schwingt. Wird also gezielt die Resonanzfrequenz des Tropfens getroffen, kann eine Instabilität des Tropfens erreicht werden. Dass dies gelingen kann, ist in Abbildung 49 dargestellt. In dieser Grafik ist die Zeit dargestellt, die ein Tropfen braucht, um eine bestimmte Strecke zurückzulegen. Als Referenzzeit dient dabei die Zeit für einen Fall ohne Störkörper aber mit Schwerkrafteinfluss und entgegen gerichteter Strömung. Es zeigt sich zum einen, dass es vorteilhaft ist, den Störkörper wand nah zu positionieren. Zum anderen zeigt sich auch, dass für moderate Anströmungsgeschwindigkeiten eine Reduktion der Abfließzeiten erreicht werden kann und zwar über eine längere Distanz. D.h., dass der Störkörpereinfluss über eine größere Distanz erhalten bleibt und der Tropfen nicht aufgrund der Dissipation der Wirbel und der damit geringer werdenden Strömungsszillation wieder stehen bleibt. Es wird aber auch deutlich, dass eine höhere Anströmungsgeschwindigkeit der Mobilisierung der Tropfen entgegenwirkt und die Strömungsszillation, die dieser Anströmungsgeschwindigkeit überlagert ist, nicht ausreichend ist, um diese ungünstige aerodynamische Kraft zu überwinden. Dies deckt sich mit den Versuchen aus der Überlagerung von Anströmung und mechanischer Vibrationsanregung.

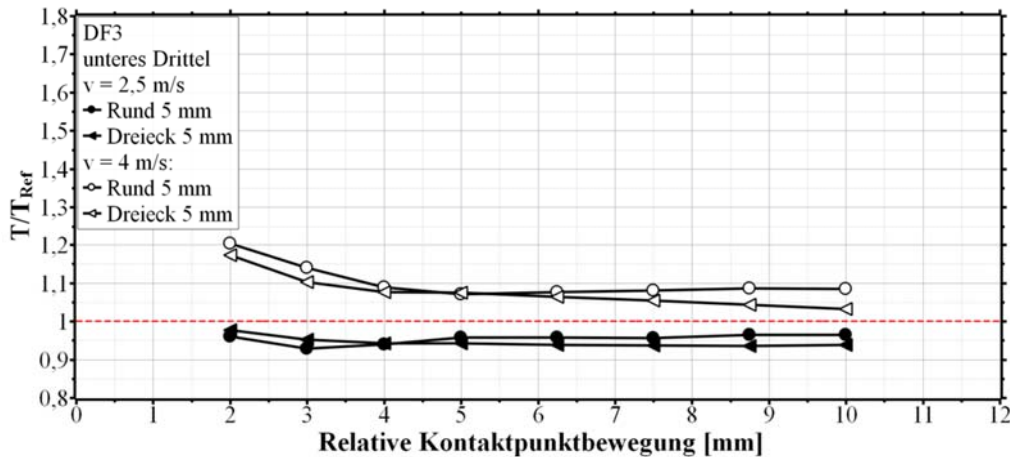


Abbildung 49: Darstellung der Tropfenbewegung infolge einer oszillierenden Anströmung in Bezug zur Referenzzeit ohne Störkörper

Weitere Detailuntersuchungen zeigten, dass für höhere Anströmungsgeschwindigkeiten und Strömungsszillation auch eine Mobilisierung hochviskoser Tropfen erreicht werden kann. In diesem Fall laufen die Tropfen dann aber nicht mehr schwerkraftgetrieben entlang des Vlieses nach unten, sondern ein Teilvolumen des Tropfens löst sich und wird als luftgetragener Tropfen nach oben transportiert. Ein solcher Fall ist möglichst zu vermeiden, da er ein Reentrainment von abgeschiedenem Öl in den Reingasstrom bedeutet.

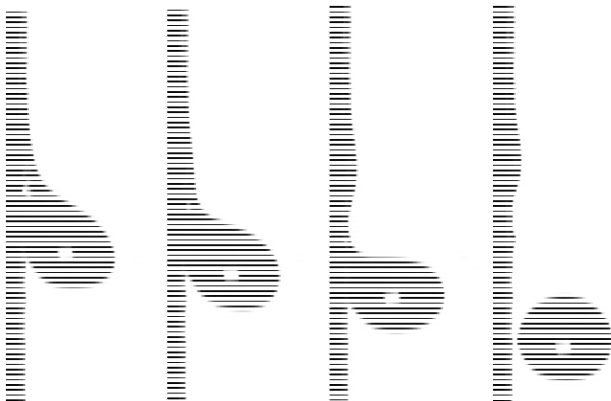


Abbildung 50: typische Sequenz für das komplette Tropfenablösen infolge einer Strömungsszillation für hochviskose Tropfen (Ondina 917, DF3, Störkörper: Dreieck im unteren Drittel, $v=4 \text{ m/s}$)

Die Ergebnisse der Untersuchungen am kleinen Vlies-Element zur Ausbildung und Beeinflussung von Einzeltropfen und Tropfenpaaren wurden genutzt und auf die Anwendbarkeit an ganzen Filterelemente bewertet. Parallel zu den hier beschriebenen Versuchen wurden die entwickelten Empfehlungen für eine Vibrationsanregung am Flachmedienprüfstand übertragen und gezielt Untersuchungen durchgeführt, um den Effekt der Vibrationsanregung auf den Sättigungszustand und den entsprechenden Druckverlust zu erfassen. Basierend auf den hierbei erzielten Ergebnissen wurde ein Funktionsmuster für eine Vibrationsanregung eines Filterelements entwickelt und getestet. Über die Arbeiten, Untersuchungen und Ergebnisse am Flachmedienprüfstand und der Funktionsmuster-Entwicklung wird im Folgenden berichtet.

3.4 Untersuchung des Einflusses von Schwingungen auf Ölbeladung und Sättigungsdruck an Filtermedien

Wie geplant; wurden drei Medientypen untersucht. Diese wurden von Teilnehmern des PA zur Verfügung gestellt: Das oleophile Medium G (M+H) sowie die unterschiedlich stark oleophoben Medien DF3 und DF4 (Donaldson). Beide oleophobe Medien bildeten in Sättigung Tropfen auf der Reingasseite. Diese wuchsen an und liefen nach Erreichen eines bestimmten Größenbereichs am Medium entlang nach unten. Zur Untersuchung der Tropfenbildung und zur Bestimmung des Größenbereichs, in dem die Tropfen sich lösen und abfließen, erfolgte eine Bestimmung anhand aufgenommenen Videomaterials während der Beladung mit rot angefärbtem Öl (s. Kapitel 3.1).

Das oleophile Medium G bildet in Sättigung einen homogenen Ölfilm auf der Abströmseite des Mediums. Dieser ließ sich durch eine eingebrachte Schwingung nicht beeinflussen. Es wurde keine Veränderung im Differenzdruck beobachtet. Daher wurde auf eine weitere Untersuchung dieses Mediums im weiteren Verlauf des Projektes verzichtet.

Die Erzeugung der Schwingungsfrequenzen wurde zu Beginn mittels der App „tone-generator“ am PC durchgeführt und dann über einen Verstärker zum Exciter übertragen (Abbildung 52 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Mit dieser Methode war eine Tonerzeugung zwischen 20 und 15000Hz bei unterschiedlichen Lautstärken (Amplituden) möglich. Im Projektverlauf erfolgte dann für eine gezieltere Erzeugung von Einzelfrequenzen und zur zeitlichen Steuerung einer Frequenzabfolge die Verwendung eines Sinusfrequenzgenerators und schließlich eines Software-Applets. Letzteres wurde programmiert, um eine bestimmte Frequenzabfolge in einem definierten Zeitfenster durchfahren zu können. Dabei konnte sowohl der Frequenzbereich, die Dauer eines Durchgangs, die Schrittweite zwischen den angefahrenen Frequenzen als auch die Amplitude des Ausgabesignals eingestellt werden. Da in einem herkömmlichen Druckluftfiltergehäuse eine Umlenkung der Strömung um 90 ° stattfindet, wurden mittels 3D Druck Einsätze für die Strömungslenkung hergestellt. Mit deren Hilfe war eine Absperrung und Umlenkung der Strömung nach oben möglich.

Die Erweiterung der zur Verfügung stehenden Prüfstände erfolgte in mehreren Schritten.

Anregung des Filtermedienhalters mit einem Körperschallwandler

Der in früheren Projekten entwickelte Flachmedienprüfstand wurde mit sogenannten Körperschallwandlern (Excitern) modifiziert. Für diesen Ansatz zur Einbringung einer Schwingung auf das Filtermedium wurde das Gerät am Flachmedienhalter anmontiert. Exciter werden üblicherweise eingesetzt, um Tonsignale über schwingungsfähige Oberflächen direkt abzugeben und so auf die Installation von Membranlautsprechern und die mit ihnen verbundenen notwendigen Öffnungen in Wänden und Decken verzichten zu können. Möglichkeiten zur Befestigung der Körperschallgeber

wurden am Filterhalter an allen Seiten außer der Abströmseite geschaffen. Auf der Rückseite wurde ein Exciter mit einem 80 mm Durchmesser montiert. Aufgeschraubt auf ein Aluminiumblech wurde er an den oberen Teil des Filtermedienhalters befestigt (Abbildung 51). Kleinere Körperschallgeber wurden direkt an das Metallgehäuse geschraubt. Sie konnten an den Seiten des Filterhalters angebracht werden. Eine Aufbringung von Schwingungen unterschiedlicher Frequenz auf den Filtermedienhalter wurde so ermöglicht. Öl-Beladungsexperiment konnten unter kontrollierten Schwingungsbedingungen durchgeführt werden.

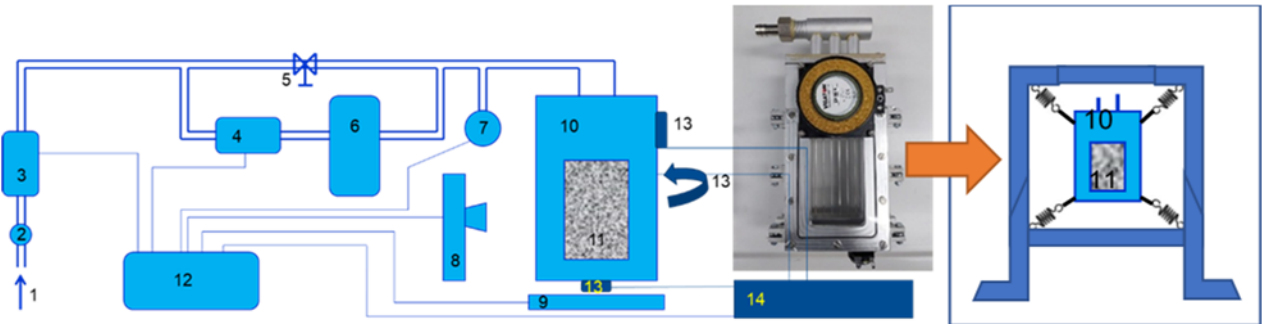


Abbildung 51: Schema des Flachmedienprüfstandes mit Erweiterungen (dunkelblau): 1: Druckluftversorgung, 2: Druckminderer, 3: MFC 1, 4: MFC 2, 5: Drossel, 6: Tröpfchengenerator, 7: Druckmessdose, 8: Kamera, 9: Waage, 10: Filterhalter, 11: Prüfling (Filtermedium), 12: Rechner, 13: Körperschallwandler (Exciter) (unten, seitlich, rückseitig), 14: Verstärker; rechts: Foto des Filterhalters mit aufgeschraubten Excitern und die federgelagerte Aufhängung des Filterhalters.

Für die Untersuchungen an den Filtermedien wurden verschiedene Prozeduren angewandt. So wurden die Versuchsreihen entweder nach Sättigung des Mediums oder während des Sättigungsprozesses durchgeführt. Es erfolgten Frequenzscans, in denen eine bestimmte Schwingungsfrequenz für ein bestimmtes Zeitintervall gehalten wurde und dann ein Sprung zur nächsten Frequenzstufe erfolgte. Des Weiteren wurden bestimmte Frequenzen in der Nähe der Eigenschwingung besonders betrachtet. Der zu Beginn durchsuchte Frequenzbereich von 0 bis 8000 Hz wurde im Laufe der Untersuchungen zunehmend auf 0 bis 100 Hz eingeschränkt, da in diesem Bereich die Eigenfrequenzen der untersuchten Öle liegen. Dem Gehäuse nebst Filtermedium konnte dabei eine Schwingung aufgeprägt werden. Insbesondere bei hohen Amplituden war diese am Gehäuse spürbar.

Die Frequenzbereiche um 20 bis 40 Hz und 60 bis 70 Hz ließen sich als die Bereiche der Eigenfrequenzen und 1. Oberschwingung ermitteln. Für diese wurde ein Effekt auf die Differenzdruckkurve erwartet. In allen durchgeführten Prüfungen konnte aber kein Effekt beobachtet werden.

Es wird vermutet, dass dieser so gering war, dass er in den Differenzdruckschwankungen, die im Betrieb des Flachmedienprüfstandes aufgrund des Kompressors, der Druckminderer und des Regelverhaltens der MFCs auftreten, nicht nachweisbar war.

Direkte Anregung am Filtermedium

Nachdem die Anregung des Gehäuses nebst Filtermedium nur winzige bis gar keine Effekte auf den Differenzdruck der untersuchten gesättigten Medien hatte, wurde der Filtermedienhalter bzw. der Prüfstand für eine direkte Übertragung der Schwingung auf das Filtermedium angepasst. Der 80 mm - Exciter wurde von seiner Position am Medienhalter demontiert und an eine separate Aufhängung vor dem Filtermedienhalter angebracht, die sich vor dessen Öffnung in etwa 20 cm Abstand befand. Mit dem Ziel Schwingungen direkt auf das Filtermedium zu übertragen, wurde eine dünne Metallstange an den Enden mit Cobalt-Samarium Magneten versehen. Aufgrund der starken magnetischen Anziehung haftete diese Stange fest am Metallinnenteil des Exciters und konnte als direkter Schwingungsüberträger dienen. Der Einkopplungspunkt in Form eines Metallplättchens wurde dabei

in der Mitte des 11 cm x 7 cm großen Filtermediums gewählt, um einen möglichst großen Abstand bis zu den Wänden des Halters zu haben. Der Kopplungspunkt wurde ebenfalls mit einem Cobalt-Samarium-Magnet in Position gehalten, was ein Verrutschen während der Prüfungen verhinderte.

Mit Hilfe dieser Modifikationen war es möglich, effektiv und mit ausreichender Amplitude Schwingungen auf Filter und Gehäuse zu übertragen. **Abbildung 52 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Übertragung vom Körperschallwandler auf ein Metallplättchen über eine Metallstange (Stößel). Nachteil der direkten Anregung des Mediums über ein Metallplättchen als Einkopplungspunkt waren die dabei auftretenden Belastungen in dessen Randbereich. Nach den Tests war ein deutlicher Abdruck des Plättchens auf den jeweiligen Koaleszenzmedien zu erkennen. Dies deutet auf eine Verdichtung der Struktur des Mediums in den Randbereichen hin, die durch eine stärkere Sättigung mit Öl sichtbar wurde. Das Aufsetzen und Fixieren des Einkopplungspunktes könnte leicht zu einer Beschädigung des Mediums führen. Daher wurden, um eine Entlastung des Einkopplungspunktes zu erreichen, alternative Einsätze aus dem 3D-Druck erprobt. Diese wurden möglichst dünn gehalten und mit x-förmig angeordneten Seitenteilen versehen. Letztlich konnte dadurch aber keine wesentliche Entlastung des Mediums erreicht werden. Auch mit diesen Einsätzen bildeten sich Stellen mit erhöhter Ölbelastung, also einer Verdichtung der Struktur.



Abbildung 52: Direkte Schwingungsübertragung vom Exciter auf das Filtermedium über einen Stößel und ein Metallplättchen

In den Untersuchungen mit dieser Art der Anregung konnte insbesondere bei Tests mit hohen Amplituden ab 90% ein Effekt auf die Differenzdruckkurve ermittelt werden. Bei 20 Hz und 55 Hz wurde bei der ersten Anregung des Filtermediums eine Abnahme des Differenzdrucks beobachtet. Im Frequenzscan zwischen 20 und 70 Hz war die Abnahme bei 55 Hz am stärksten ausgeprägt. Hier wurde eine Abnahme um bis zu 3 mbar erreicht. In Experimenten mit einer Anregungsfrequenz von 20 Hz ließ sich ebenfalls eine Abnahme von etwa 3 mbar während der ersten Anregung beobachten. Bei allen weiteren Anregungsversuchen kam es unabhängig von der Dauer der Wartezeit bis zur erneuten Aufbringung einer Schwingung nur zu geringeren Effekten. Eine längere Unterbrechung des Volumenstroms

und der Aerosolbeaufschlagung mit einem erneuten Anfahren nach mehr als 15 h führte dagegen zu einem Wiedererstarken des beobachteten Differenzdruckeinbruchs bei erneuter Aufbringung einer Schwingung in der Nähe der Eigenfrequenz des Gehäuses. Dabei ist es entscheidend, dass das Gehäuse einschließlich Filtermedium beweglich gelagert ist und damit ausgelenkt werden kann. Insgesamt konnte damit der Meilenstein 2 erreicht werden.

Im Rahmen der Arbeitspakete 5 und 8 erfolgten weitere Modifikationen des Flachmedienprüfstandes. Ziel war es andere Arten der Schwingungsübertragung und die richtungsabhängige Schwingung besser untersuchen zu können. So wurde das Filtergehäuse insgesamt federgelagert, um eine einfachere Übertragung der Schwingungen zu ermöglichen und die Belastung an der Medienoberfläche zu reduzieren.

Von drei Anregungsrichtungen x, y und z stellte sich die Anregung mit einer Vor- und Zurückbewegung (bei Aufsicht auf das Flachmedium, d.h. in y-Richtung) als die mit dem größten Effekt auf den Sättigungsdifferenzdruck heraus. Bei einer Anregungsfrequenz von 30 bis 35 Hz bildet sich eine um den Faktor 10 kleinere Schwingung des Gehäuses aus. Dabei konnte bei der ersten Anregung des

Gehäuses nachdem das Filtermedium die Sättigung erreicht hatte, eine Abnahme des Differenzdrucks (Δp) um bis zu 12 mbar beobachtet werden. Dieser Effekt ließ sich reproduzieren. Allerdings wurde die Stärke der Abnahme nur bei der ersten Anregung des Filtermediums erreicht. Erneute Anregungen des gleichen Filtermediums nach einer Pause (Minuten bis zu einigen Stunden), zeigten dagegen einen deutlich geringeren Effekt (Abbildung 53). Es stellte sich auch heraus, dass nur mit einer relativ hohen Beschleunigung des anregenden Stößels von ca. 40 m/s^2 (=Einstellung Verstärker: Stufe 10) eine deutliche Beeinflussung des Differenzdrucks (Δp) sichtbar wurde (ab etwa 20 m/s^2 beginnender Effekt in Form einer geringen Δp -Abnahme). Andererseits beschädigte eine zu starke Anregung das Filtermedium. Bei einer Anregung des federgelagerten Gehäuses von oben, d.h. aus z-Richtung wurde dagegen nur eine sehr geringe Beeinflussung der Differenzdruckkurve von weniger als 1 mbar beobachtet.

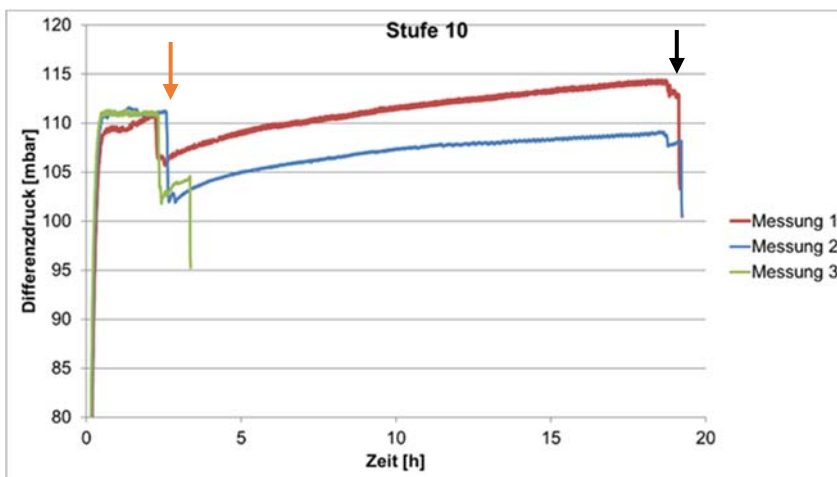


Abbildung 53: Differenzdruckabnahme bei Anregung mit einer Schwingung; roter Pfeil: 1. Anregung; schwarzer Pfeil: 2. Anregung

Anregung von Filtermedium und -halter mit einem Schüttler

Aufgrund der Risiken bei der direkten Übertragung auf das Medium wurden weitere Untersuchungen unter Anwendung eines Laborschüttlers durchgeführt. Mit Hilfe dieses Gerätes konnte der Filtermedienhalter als Ganzes in Bewegung versetzt werden. Hier wurde als Zielfrequenz 3,4 Hz gewählt, was in den Versuchen mit dem größten Effekt auf den Differenzdruck (Δp) und federgelagertem Gehäuse als überlagerte Schwingung identifiziert worden war. Während dieser Untersuchungen wurde das Gehäuse so angebracht, dass es jeweils in eine der drei Raumrichtungen bewegt werden konnte. Der verwendete Schüttler führte eine gleichmäßige Seitwärtsbewegung mit bis zu ~230 Schwingungen pro Minute aus ($3,4 \text{ Hz} \rightarrow 204 \text{ Schwingungen/min}$). Der an die Schüttlerplatte montierte Filtermedienhalter wurde so ausgerichtet, dass die Abströmseite des eingesetzten Mediums jeweils eine der drei möglichen Orientierungen zur Schwingungsrichtung hatte.

Bei den Versuchen, bei denen das Gehäuse 90° zur Bewegungsrichtung ausgerichtet war, und bei den Versuchen mit Bewegung in vertikaler Richtung (z-Richtung), konnte ein winziger Effekt von weniger als 0,5 mbar beobachtet werden.

Eine permanente Schwingung während des Sättigungsvorganges hatte keinen Einfluss auf das sich ausbildende Sättigungsniveau. Alle Schwankungen der Δp -Kurve lagen im durch die Inhomogenität des Filtermediums erwarteten Rahmen.

In einem Experiment kam es zu einem plötzlichen Versagen der Halterung. Die dabei auftretende mechanische Belastung in vertikaler Richtung führte zu einer Differenzdruckabnahme von ca.

5,5 mbar gefolgt von einer langsamen Erholung des Differenzdrucks, der nach 2 h noch nicht das Ursprungsniveau erreicht hatte.

Es lässt sich zusammenfassend festhalten, dass es insbesondere bei kurzzeitigen starken mechanischen Belastungen zu einer Beeinflussung des Differenzdruckniveaus kommt. Dabei auftretende Differenzdruckabnahme bildet sich anschließend langsam zurück, so dass es erst nach einer längeren Periode ohne Vibration wieder möglich wird, eine nennenswerte Reduktion des Differenzdruckniveaus zu erzielen.

Einfluss des Medientyps

Von den seitens Donaldson zur Verfügung gestellten beiden Filtermedien (DF3 und DF4) konnte ab 2024 nur noch DF4 bezogen werden. Unter den Bedingungen der direkten Anregung des Mediums lässt sich aus den bis dahin an beiden Medien durchgeführten Versuchen ein vergleichbares Verhalten ableiten, wobei Differenzdruckabnahmen von wenigen mbar unter Anregung auftraten.

3.5 Entwicklung eines Funktionsmusters für die Vibrationsanregung und Funktionstests

Die Ergebnisse aus der Vibrationsanregung am Flachmedien-Prüfstand im Vergleich zu den Ergebnissen am Einzeltropfen zeigen, dass noch Fragen zu klären sind. Insbesondere betrifft dies die Übertragung vom kleinen zum großen Maßstab unter dem Aspekt der Ölausbreitung im Filtermedium und der Einflüsse der Befestigung/Anbringung des Filtermediums. Festzuhalten bleibt aber, dass eine Vibrationsanregung a) zu einer Verbesserung der Tropfendrainage führt und b) auch zu einer Reduktion des Differenzdrucks führen kann. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein Funktionsmuster einer mechanischen Vibrationsanregung entwickelt, welches mit einem Filter verbunden werden kann. Dabei bleibt der Freiheitsgrad der Vibrationsanregungsrichtung über unterschiedliche Befestigungsmöglichkeiten erhalten. Die erforderlichen Tests bei Variation aller möglichen Einflussparameter (Richtung, Amplitude, Frequenz, Ölbeaufschlagung, Benetzbarkeit, Anregung in oder entgegen der Schwerkraftichtung, etc.) konnten in der verbliebenen Projektlaufzeit nicht mehr durchgeführt werden.

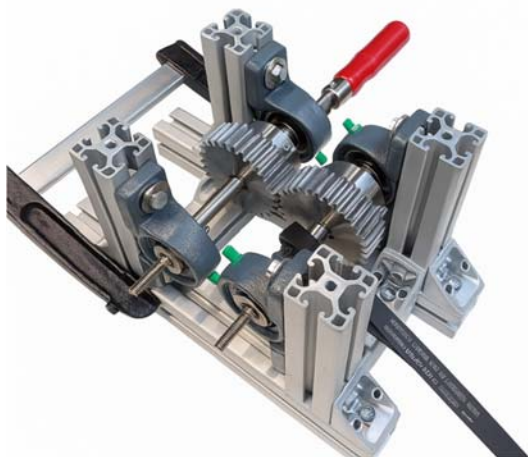


Abbildung 54: Mechanik zur Vibrationsanregung über zwei gegenläufige Wellen, auf welche Exzenter-Aufsätze aufgeschraubt werden (oben), und Gesamtaufbau der Mechanik zur Vibrationsanregung über gegenläufige Wellen mit Exzenter-Aufsätzen (blau) hier mit angebindenem Flachmedien-Filter (links)

Das Prinzip des Funktionsmusters der mechanischen Vibrationsanregung ist im Folgenden beschrieben: die rein translatorische Bewegung wird über zwei parallele gegenläufig rotierende Wellen erreicht (siehe Abbildung 54), auf welche Exzenterkartuschen aufgeschraubt werden können. Diese Exzenterwellenaufsätze können ausgetauscht werden, so dass verschiedene Amplituden in der Vibrationsanregung umgesetzt werden können. An den Exzenterwellenaufsätzen sind Gelenkköpfe mit Gleitlagerung befestigt. Die insgesamt 4 Gelenkköpfe sind über Bolzen mit einer Befestigungsmöglichkeit für den anzuregenden Filter verbunden und übertragen so die translatorische Bewegung an den Filter. Dabei ist über Linearführungen eine geführte und stabile Bewegung in nur einer Raumrichtung gewährleistet. Angetrieben werden die Wellen über einen Elektromotor mit Frequenzumrichter, so dass die Anregungsfrequenz genau eingestellt werden kann.

Das entwickelte Funktionsmuster ist für die Aufnahme von großen Gewichten, d.h. großen Filterkartuschen gedacht. Tests mit solchen Filtern konnten in der verbliebenen Projektlaufzeit nicht mehr durchgeführt werden. Durchgeführt wurden finale Tests mit einem Flachmedien-Filter.

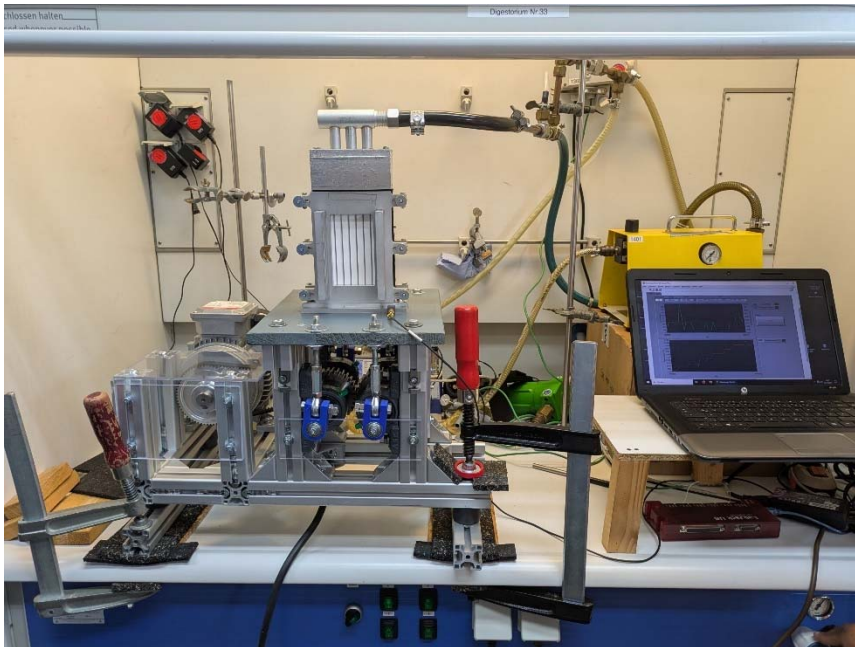


Abbildung 55: Prüfstand zur Untersuchung des Effekts einer Vibrationsanregung auf den Differenzdruck eines Filters hier mit aufgebautem Funktionsmuster und daran befestigtem Flachmedien-Filter

Mit dem Funktionsmuster und daran befestigtem Flachmedien-Filter wurden Versuchsreihen mit den beiden niedrigviskosen Ölen TS10 und Cali. 2.5 durchgeführt. Für die Tests stand nur noch das Filtermaterial DF4 zur Verfügung, für welches sich in den vorherigen Versuchen nur bedingt Effekte einer Vibrationsanregung feststellen ließen, da hier aufgrund der besseren Benetzung die Tropfenbildung in weit geringerem Maße erfolgt als bei DF3. Es wurden zwei unterschiedliche Versuchstypen durchgeführt: a) Beaufschlagung des Filters mit Öl bis zur Sättigung bei gleichzeitiger dauerhafter Vibrationsanregung, wobei verschiedene Reihen mit unterschiedlicher Frequenz durchgeführt wurden, b) Beaufschlagung des Filters mit Öl bis zur Sättigung bei anschließender kurzzeitiger Vibrationsanregung, wobei verschiedene Reihen mit unterschiedlicher Frequenz durchgeführt wurden.

Bei den Versuchen konnte bei den gewählten Parameterkombinationen für den Fall der Sättigung eine nicht so hohe Anzahl von Tropfen wie in Abbildung 11 erreicht werden. Es treten stets nur einzelne Tropfen sichtbar auf und häufig eine Art Schaum (vgl. Abbildung 56). Dies ist im Wesentlichen auf das Vlies DF4 zurückzuführen. Eine Analyse der Bilder zeigt aber, dass wie zu erwarten die Vibrationsanregung zu einem Ablösen der einzelnen Tropfen führt. Es ist zu vermuten, dass dieses Ablaufen der einzelnen Tropfen zu den leichten Druckdifferenzänderungen führt, wie sie in

Abbildung 57 beispielhaft gezeigt wird. Der Effekt der Vibrationsanregung auf den Differenzdruck ist hier sehr klein, aber reproduzierbar. Gleichzeitig kann dieser Effekt mit der forcierten Mobilisierung der wenigen Tropfen korreliert werden. Es ist also zu vermuten, dass die Mobilisierung der Tropfen für die Reduktion des Differenzdrucks sorgt. Diese Vermutung konnte aber mit den zur Verfügung stehenden Materialien und der begrenzten Zeit im Projekt nicht mehr bewiesen werden.



Abbildung 56: typisches Bild für die Tropfenbildung und die Öl-Schaumbildung auf der Reingasseite des Filters im Bereich der Sättigung vor und nach der Vibrationsanregung mit 55 Hz

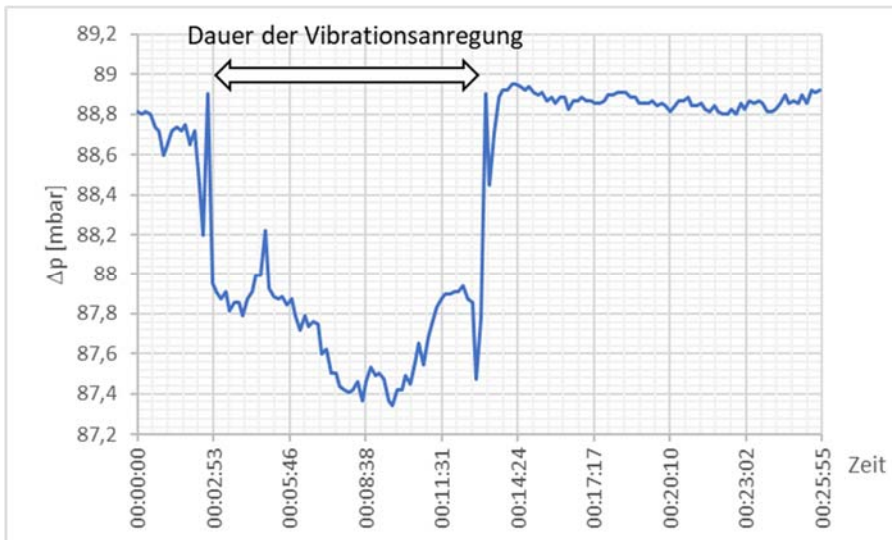


Abbildung 57: typischer Verlauf des Differenzdrucks im Bereich der Sättigung des Filters infolge einer Vibrationsanregung mit 55 Hz

4 Verwendung der Zuwendung

Forschungseinrichtung 1 (IUTA)

- Ausgaben für Personaleinsatz wissenschaftlichen Personals (Einzelansatz A des Finanzierungsplans)

Es wurde wissenschaftliches Personal (HPA-A) im Umfang von 16,85 Personenmonaten im Projektverlauf eingesetzt. Der Mitarbeiterereinsatz an Forschungseinrichtung entsprach damit den bewilligten Einzelfinanzierungsplänen.

- Ausgaben für Gerätebeschaffung (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

Wurden nicht beantragt

- Ausgaben für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Wurden nicht beantragt

Forschungseinrichtung 2 (Bergische Universität Wuppertal)

- Ausgaben für Personaleinsatz wissenschaftlichen Personals (Einzelansatz A des Finanzierungsplans)

Es wurde wissenschaftliches Personal (HPA-A) im Umfang von 28,5 Personenmonaten im Projektverlauf eingesetzt.

Der Mitarbeiterereinsatz an den Forschungseinrichtung 2 (Bergische Universität Wuppertal) entspricht weitgehend den bewilligten Einzelfinanzierungsplänen. Sie sind geringer als ursprünglich geplant, da zunächst kein Mitarbeiter für dieses Projekt gefunden werden konnte; dieser Verzug konnte bis zum Ende der Projektlaufzeit nicht mehr ausgeglichen werden.

Die Notwendigkeit des Mitarbeiterereinsatzes wurde jeweils in den Erläuterungen zum Einzelfinanzierungsplan bereits ausführlich begründet. Die Gründe für die kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit wurden ebenfalls ausführlich dargelegt. Alle zur Durchführung der Arbeiten bzw. zum Erreichen der Forschungsziele beschafften Geräte, Bauteile und Verbrauchsmaterialien besitzen Beschaffungswerte von jeweils unter 2.500 € außer dem hier aufgelisteten Gerät:

- Spritzenpumpen-System Typ Nemesis der Firma Cetoni (12.840,10€)
 - Ausgaben für Gerätebeschaffung (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

Wie beantragt wurde ein Spritzenpumpen-System Typ Nemesis der Firma Cetoni (12.840,10€) beschafft und eingesetzt. Alle weiteren zur Durchführung der Arbeiten bzw. zum Erreichen der Forschungsziele beschafften Geräte, Bauteile und Verbrauchsmaterialien besitzen Beschaffungswerte von jeweils unter 2.500 €.

- Ausgaben für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Wurden nicht beantragt

5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten der beiden beteiligten Forschungsstellen entsprachen weitestgehend den Plänen des Forschungsantrags und waren insgesamt für die Erreichung der folgend aufgelisteten Ziele notwendig und angemessen.

- Entwicklung einer Methode für den Bereich der Druckluftfiltration, mit der es möglich ist, eine Reduktion des Sättigungsniveaus bzw. Verringerung der Sättigung durch eine verbesserte Drainage herbeizuführen.
- Entwicklung von Empfehlungen für die Auswahl von Filtermaterialien und zur Auslegung von Einbauten in den Spaltkanal eines Filters auf der Reingasseite für eine gezielte Fluid-Oszillation basierend auf den Erkenntnissen aus Detailanalysen am Einzeltropfen in Kombination mit Untersuchungen am Filterelement am Filterprüfstand
- Schaffung von Basiswissen, speziell Detail-Untersuchungen von Flüssigwasseransammlungen bzw. der Tropfenbewegung unter Einfluss von Strömungs- und/oder Strukturoszillation mit dem Zweck der Entwicklung von (empirischen) Gesetzmäßigkeiten zur Flüssigkeitsbewegung

Anmerkung: Aus verschiedenen Gründen kam es im Verlauf des Kalenderjahrs 2022 zu Verzögerungen und Verschiebungen im Arbeitsablauf des Forschungsvorhabens, was Auswirkungen auf die weitere Bearbeitung im Kalenderjahr 2023 hatte. So wurde das Projekt aufgrund der anfänglich nur vorläufigen Bewilligung des Projektes und wegen Personalengpässen seitens FE2 erst im September 2022 begonnen. Im weiteren Verlauf des Projekts kam es zu weiteren Personalengpässen seitens FE1 und FE2 und u.a. dadurch bedingten Verzögerungen. Es wurde daher eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung um 9 Monate in 2024 beantragt und auch bewilligt.

6 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

In diesem Projekt wurden die Effekte einer mechanischen Vibrationsanregung und einer Strömungsinduzierten Vibrationsanregung auf die Mobilisierung von Öltropfen an Filtervliesen untersucht und darauf aufbauend eine technische Maßnahme zur Verbesserung der Mobilisierung von Flüssigkeitsansammlungen auf der Reingasseite eines Filters erarbeitet. Durch das Einbringen einer Vibration kann eine verbesserte Drainage und gegebenenfalls eine Verringerung des Druckverlusts erzielt werden. In einzelnen Tests konnte eine Reduktion des Differenzdrucks von 12 mbar durch eine Vibrationsanregung nachgewiesen werden. Es konnten in diesem Projekt konkrete Empfehlungen hinsichtlich der Einbringung einer Vibrationsanregung sowie weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Drainage und einer dadurch bedingten Reduktion des Druckverlusts entwickelt werden. Es sind noch weitere abschließende Untersuchungen offengeblieben, doch sind die Trends eindeutig darstellbar. Basierend auf den Ergebnissen des Projekts kann ein energieeffizienzsteigerndes Filtrationsverfahren weiterentwickelt werden. Da aktuelle am Markt befindliche Systeme auf eine möglichst kantenfreie und kontrollierte Zuführung der Druckluft zum Filterelement abzielen, besteht keine einfache Möglichkeit zur Nachrüstung einer Schwingungsanregung in bestehende Filterkartuschen. Es

kann jedoch erwartet werden, dass eine Weiterentwicklung der Methodik zu einer signifikanten Verbesserung der Druckluftfiltration führen würde. Dies würde einen Nachrüstbedarf an den etwa 62.000 deutschen Druckluftanlagen hervorrufen. Insbesondere KMU, als Dienstleister für Drucklufttechnik, würden von der entstehenden Nachfrage profitieren. Aber auch die Betreiber der Anlagen selbst (darunter eine Vielzahl von kleinen Betrieben, d.h. KMUs) würden von einer energieeffizienten Druckluftaufbereitung profitieren.

Die in diesem Projekt entwickelten konkreten Empfehlungen hinsichtlich der Einbringung einer Vibrationsanregung sowie weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Drainage und einer dadurch bedingten Reduktion des Druckverlusts bieten Ansätze für eine weitere Verbesserung der Druckluftfiltration insbesondere unter Bedingungen mit erhöhter Temperatur und betriebsbedingt auftretenden Schwingungen. Durch die Projektergebnisse wird KMU die nötige Basis-Information für eigene Entwicklungen und innovative Produkte an die Hand gegeben. Der Einsatz dieser „schwingenden Filtersysteme“ könnte daher die Wettbewerbsfähigkeit von KMU insgesamt verbessern und durch Innovation ihre Konkurrenzfähigkeit steigern. Dabei ist davon auszugehen, dass diese Systeme eine vergleichbare oder bessere Abscheideeffizienz als herkömmliche Druckluftfiltersystem bei gleichzeitig reduziertem Sättigungsdifferenzdruck aufweisen werden. Durch die noch notwendige Überarbeitung des Funktionsmusters und Klärung offener Fragen wird aber noch mit einem Übergang von mehreren Jahren bis zur Serienfertigung gerechnet.

Es besteht weiterer vorwettbewerblicher Forschungsbedarf in anderen Bereichen (z.B. der Brennstoffzellentechnik), daher ist geplant, ein IGF-Folgeprojekt zu beantragen. Bevor die FuE-Ergebnisse direkt in die industrielle Anwendung transferiert werden können, sind noch die Fragen der Produktionsprozesse oder der Qualitätssicherung zu klären. Hier stellt das Förderprogramm ZIM (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) eine weitere Möglichkeit zur Finanzierung der Innovationsbemühungen dar. Weitere Ergebnisse des Projektes, die KMU und anderen Anwendern zugutekommen werden, sind die vielen Detailkenntnisse zum Tropfenverhalten unter Krafteinfluss, welche z.B. in der Reinigungstechnik, der Automobiltechnik oder auch der Produktionstechnik zu Prozess und Produktverbesserungen führen können.

7 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Das durchgeführte IGF-Projekt hat gezeigt, dass durch die Aufbringung einer Schwingung eine Reduktion der auftretenden Druckverlustniveaus in Sättigung möglich wird, unter welchen Bedingungen diese Effekte auftreten und, dass sie insbesondere bei erhöhten Umgebungstemperaturen, wie sie etwa in Kompressoren bei der Erzeugung der Druckluft auftreten, von Relevanz sein können. Die gezeigten Effekte liegen mit 12 mbar bei den untersuchten Bedingungen im erwarteten Rahmen und lassen, trotz der Einschränkung der geringen Effektdauer, grundsätzlich eine wirtschaftliche Nutzung und Umsetzung zu. Sie können insbesondere in Kompressoren, in denen typischerweise durch die Motorbewegung Schwingungen auftreten, zu einer zusätzlichen Energieeffizienzsteigerung genutzt werden. In den durchgeführten PA-Sitzungen und über die Homepage der beiden FE wurden bzw. werden die gewonnenen Erkenntnisse an interessierte Vertreter aus der Industrie weitergegeben. Dadurch besteht die Möglichkeit die gewonnenen Erkenntnisse direkt in der Entwicklung neuer Produkte zu berücksichtigen. Der Themenbereich „Mobilisierung von Tropfen“ ist bei einer Vielzahl von technischen Anwendungen relevant. Die Forschungseinrichtungen kooperieren fortlaufend mit Firmen aus diesen Anwendungsfeldern und diskutieren die Ergebnisse dieses Projekts im Kontext der

jeweiligen Anwendungen, so dass hier eine konkrete Übertragung und Weiterentwicklung der Erkenntnisse aus dem Projekt ermöglicht wird. Darüber hinaus werden die Projektergebnisse auf den einschlägigen nationalen und internationalen Fachkonferenzen vorgestellt, bei denen auch eine Vielzahl von relevanten Firmen vertreten ist. Hier wurden bereits konkret Herausforderungen der Wirtschaft identifiziert, und es sind Kooperationsprojekte in Vorbereitung.

8 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Zeitliche Durchführung	Maßnahme	Ziel
Mai/Juni 2022	Uni Wuppertal-Homepage IUTA- Homepage	Information eines breiten Fachpublikums über das Projekt
September 2022	Vorstellung des Projekts im Rahmen der Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“ der GALA e.V. in Ilmenau	Information eines breiten Fachpublikums über das Projekt
November 2022	Vortrag während des 13. Filtrationstag am IUTA	Information eines breiten Fachpublikums über das Projekt
November 2022	Gespräch mit der Firma Robert Bosch GmbH (Powertrain Solutions, Engineering Fuel Cell Components (PS-DI/EFC-EM2))	Information über das Projekt
Dezember 2022	1. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (PA)	Information des PA zum Fortgang, kritische Diskussion der Arbeiten
Dezember 2022	Gespräch mit der Firma BEKO Technologies GmbH	Information über das Projekt
Februar 2023	FILTECH 2023	Information Fachpublikum aus Wissenschaft und Industrie Möglichkeit zur direkten Diskussion
September 2023	Vorstellung des Projekts im Rahmen der Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“ der GALA e.V. in München	Information eines breiten Fachpublikums über das Projekt
November 2023	2. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (PA)	Information des PA zum Fortgang, kritische Diskussion der Arbeiten
März 2024	Gespräch mit der Firma ZBT GmbH	Information über das Projekt
März 2024	Gespräch mit der Firma Aerostack GmbH	Information über das Projekt
November 2024	FILTECH 2024	Information Fachpublikum aus Wissenschaft und Industrie Möglichkeit zur direkten Diskussion
Dezember 2024	3. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (PA)	Information des PA zum Fortgang, kritische Diskussion der Arbeiten
Mai 2025	Vorstellung des Projekts im Rahmen der Fachtagung ICMF25, Toulouse	Information Fachpublikum aus Wissenschaft und Industrie Möglichkeit zur direkten Diskussion

Juli 2025	Vorstellung des Projekts im Rahmen der Fachtagung Droplets25, Lüttich	Information Fachpublikum aus Wissenschaft und Industrie Möglichkeit zur direkten Diskussion
Publikation in einer Zeitschrift	Information eines breiten Fachpublikums zu Ergebnissen des Projekts	Metzmacher A., Schoeneich N., Schultz J., Ettl M., Burgmann S., Janoske U. (2025), Physics of Fluids, 37, 087213

9 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeit
Präsentation auf Fachtagung	Information eines breiten Fachpublikums über das Projekt	Vorstellung des Projekts im Rahmen der Fachtagung „Experimentelle Strömungsmechanik“ der GALA e.V. in Darmstadt	September 2025
Uni Wuppertal-Homepage IUTA- Homepage	Information eines breiten Fachpublikums über das Projekt	Aktualisierung der Informationen zum Projekt auf den Internetpräsenzen der Uni Wuppertal und des IUTA	Jeweils im Anschluss an Veröffentlichungen
Veröffentlichung des Abschlussberichtes	Information eines breiten Fachpublikums über das Projekt	Internetpräsenz des IUTA	Nach Projektende, wenn verfügbar
Information an die PA-Teilnehmer	Verbreitung des Abschlussberichtes im Kreis der interessierten Unternehmen	Verbreitung des Downloadlinks per E-Mail	Nach Projektende, wenn verfügbar

Die Realisierbarkeit der noch ausstehenden Transfermaßnahmen wird nach bisheriger Erfahrung als „hoch“ eingeschätzt.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Barwari B., Burgmann S., Janoske U. (2019) Chem. Ing. Tech. 91 (1), pp. 991-1000
- [2] Burgmann S., Dues M., Barwari B., Steinbock J., Büttner L., Czarske J., Janoske U. (2021) Experiments in Fluids, 62:47
- [3] Rohde M., Barwari B., Burgmann S., Janoske U. (2022) International Journal of Multiphase Flow, 155, 104163
- [4] Sharp J. S. (2012) Soft Matter 8, 399–407
- [5] Metzmacher A., Schoeneich N., Schultz J., Ettl M., Burgmann S., Janoske U. (2025), Physics of Fluids, 37, 087213
- [6] Burgmann S, Krämer V, Rohde M, Dues M, Janoske U (2022) International Journal of Multiphase Flow, 153, 104140
- [7] Chahine A, Sebilleau J, Mathis R, Legendre D (2023) Phys. Rev. Fluids 8, 093601
- [8] Rohde M., Ravishankar S., Burgmann S, Janoske U. (2025) Eur. Phys. J. Spec. Top. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-025-01677-x>