

Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

**Entwicklung eines physikalischen bionischen Verfahrens zur
Entfernung von Ölverschmutzungen auf Wasser unter
Einsatz superhydrophober Funktionstextilien**

BOA (Bionic Oil Adsorber)

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 34602/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr. Wilhelm Barthlott, Prof. Dr. Tomas Gries,
Prof. Dr. Kai Klopp, Dr. Petra Ditsche, MEng. Leonie Beek,
MSc. Musa Akdere, Dr. Matthias Mail

April 2022

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34602/01	Referat	23	Fördersumme	365.005 €
----	----------	---------	----	-------------	-----------

Antragstitel	Entwicklung eines physikalischen bionischen Verfahrens zur Entfernung von Ölverschmutzungen auf Wasser unter Einsatz superhydrophober Funktionstextilien
---------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Stichworte	Verfahrenstechnik/Prozesse, Gewässer, Textil, Umweltschutz, Gewässerschutz, Kontamination, Schadstoff, Entsorgung, Oil-Water Separation, Öl-Wasser-Trennung, Bionik
-------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
36 Monate	01.02.2019	31.01.2022	1

Abschlussbericht

Bewilligungsempfänger	Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen, AG Biodiversität und Bionik, Venusbergweg 22, 53115 Bonn	Tel	0228-73 5283
		Fax	
		Projektleitung	Prof. Barthlott
		Bearbeiter	Dr. Mail / Dr. Ditsche

Kooperationspartner	Institut für Textiltechnik und Lehrstuhl für Textilmaschinenbau, RWTH Aachen, University Otto-Blumenthal-Str. 1, 52074 Aachen
----------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Assoziierter Partner	Heimbach GmbH, an Gut Nazareth 73, 52353 Düren
-----------------------------	------------------------------------------------

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ölverschmutzungen von Gewässern sind ein bedeutendes Umweltproblem. In der medialen Wahrnehmung sind es vor allem die marinen Katastrophen verursacht von Öltankern und Bohrplattformen, jedoch führen auch die alltäglichen Kontaminationen von Binnengewässern weltweit zu ökologisch hoch bedenklichen Störungen von Ökosystemen und der Trinkwasserversorgung. Bei den umfangreichen Vorläuferarbeiten der Universität Bonn zu superhydrophoben biologischen Oberflächen und der bionischen Umsetzung des Lotus- und Salvinia-Effektes wurde beobachtet, dass einige dieser Oberflächen ebenfalls zu effizienter Adsorption und schnellem passiven Transport von Öl in der Lage sind. Dabei wurden als effizienteste biologische Vorbilder bestimmte Pflanzenarten mit teilweise höchst komplexer Oberflächenarchitektur, wie der Schwimmpflanze *Salvinia molesta*, identifiziert. In diesem Projekt konnten diese Fähigkeiten der biologischen Vorbilder technisch umgesetzt werden. Langfristige Zielstellung ist die Entwicklung eines auf der Gewässeroberfläche schwimmenden Bionischen Öl-Adsorbentens (BOA), der ohne Energiezufuhr in der Lage ist mit Funktionstextilien, hoch effizient Öl aus Wasser zu adsorbieren und zur Entsorgung in einen Sammelbehälter zu transportieren. Für den BOA sollte in Rahmen dieses Projektes u.a. ein optimiertes Funktionstextil identifiziert werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zunächst wurden die biologischen Vorbilder auf ihre Strukturparameter und Transporteigenschaften analysiert. Darauf basierend wurden 54 kommerziell erhältliche Funktionstextilien, welche aus unterschiedlichen Polymeren mit verschiedenem strukturellem Aufbau bestehen, für ein Screening ausgewählt. Nach der Hydrophobierung der Textilien wurden deren Öladsorptionskapazität sowie die horizontale und vertikale Transportgeschwindigkeit bestimmt. Auf dieser Grundlage wurden 2 Funktionstextilien ausgewählt. Diese wurden über einen längeren Zeitraum unter anwendungsnahe Bedingungen für verschiedenen Ölarten (Diesel, Heizöl, Bilgenöl, Altöl, Motoröl) untersucht. Dabei wurde vor allem die horizontale Transportgeschwindigkeit, welche der Anwendung im BOA entspricht, unter Berücksichtigung der Maschenausrichtung, kontinuierlicher und diskontinuierlicher Vorhandensein von Öl getestet. Mittels optischer Verfahren wurde analysiert wie am Textil der Öltransport stattfindet. Die Auswirkungen des Strukturdurchmessers (D), der Strukturabständen (A) und deren Verhältnis (A/D) innerhalb der Oberflächenarchitektur der Textilien sowie unterschiedlicher Ölkontaktwinkel wurden für Öle verschiedener Viskosität mittels numerischer Strömungssimulation analysiert um die idealen Textilstrukturen für einen optimierten BOA zu ermitteln.

Ergebnisse und Diskussion

Es konnten zwei Funktionstextilien identifiziert werden, die sehr überraschend effiziente Eigenschaften für die Öl-Wasser-Trennung aufweisen. Eines der Funktionstextilien transportierte in 6 cm Streifenbreite bis zu einem halben Liter Öl in der Stunde. Es handelt sich um ein Abstandstextil. Die Maschenausrichtung hat einen erheblichen Einfluss. Bei Orientierung des Textils orthogonal zur Maschenrichtung wurde 61 - 90% mehr Öl transportiert als in Querrichtung. Einen erheblichen Einfluss auf den Öltransport hat auch die Art des zu transportierenden Öls. Prinzipiell werden Öle mit geringer Viskosität (< 10 cP) wie Diesel oder Heizöl deutlich schneller transportiert als Öle mit hoher Viskosität (> 100 cP), wie Altöl, Bilgenöl oder Motoröl. Dabei ist ein direkter Zusammenhang zwischen Viskosität und Transportgeschwindigkeit zu beobachten. So transportiert das gleiche Funktionstextil Heizöl (Viskosität 5,6 cP) um dem Faktor 50 schneller als Motoröl (Viskosität 196,7 cP). Die Versuche zeigten weiterhin, dass kein direkter Zusammenhang zwischen Ölhaltekapazität und Öltransportgeschwindigkeit besteht. Im Rahmen der Simulation des Öltransportes konnte gezeigt werden, dass ein Verhältnis von 1:1 von Durchmesser und Abstand der Feinstrukturen optimal für den Transport ist. Die optimalen Werte für Strukturdurchmesser und -abstände variieren jedoch mit der Viskosität des Öls.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Funktionstextilien sowohl für den kontinuierlichen als auch im diskontinuierlichen Einsatz geeignet sind. Es sind keine Probleme zu erwarten, wenn Öl nur gelegentlich auf der Wasseroberfläche vorhanden ist. Dies ermöglicht somit auch den präventiven Einsatz, zum Beispiel auf Gewässern, welche durch gelegentliche Ölverschmutzungen gefährdet sind, wie zum Beispiel in Hafengebieten. Hierbei kommt der dauerhaften Hydrophobierung eine zentrale Bedeutung zu, da ansonsten Wasser in den Sammelbehälter transportiert würde.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt wurde auf renommierten Konferenzen und Messen, wie der Hannover Messe und der Filtech-Konferenz, sowie im Rahmen eingeladener Fachvorträge vorgestellt. Weiterhin wurden Projektergebnisse in drei Fachartikeln in renommierten Zeitschriften veröffentlicht bzw. zur Veröffentlichung eingereicht und fanden in einem Buchkapitel Erwähnung. Basierend auf diesem Projekt erschienen weltweit ca. 20 nationale und internationale Pressemitteilungen, in deren Folge sind insgesamt geschätzt über 100 Beiträge, Artikel in Fachzeitschriften, aber auch Tagespresse und Fernsehsendungen, erschienen.

Fazit

Im Rahmen dieses Projektes wurden zwei äußerst effiziente Funktionstextilien für den Einsatz im BOA identifiziert. Diese ermöglichen genau wie ihre biologischen Vorbilder die Trennung von Öl und Wasser, wobei das Öl - ohne Anwendung zusätzlicher Energie – passiv in einen Sammelbehälter transportiert wird. Die Funktionstextilien mit einer Streifenbreite von 6 cm können dabei bis zu einem ½ Liter Öl von der Wasseroberfläche abtransportieren. Die Projektergebnisse zeigen, dass mit BOA eine neue, energiesparende Technik der Öl-Wasser-Trennung zur Verfügung gestellt wird, welche vorwiegend in Binnengewässern eingesetzt werden kann. Darüber hinaus bietet diese innovative Technik Potential für die Öl-Wasser-Trennung im Bereich der Schifffahrt oder in industriellen Anlagen.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	4
Verzeichnis der Tabellen	6
Verzeichnis der Begriffe.....	6
Verzeichnis der Definitionen	6
Zusammenfassung	7
1 Einleitung.....	8
2 Arbeitsschritte und angewandte Methoden	11
2.1 Proben	11
2.1.1 Biologische Oberflächen.....	11
2.1.2 Technische Oberflächen und technische Textilien	12
2.1.3 Hydrophobierung der Proben	13
2.2 Chemische und physikalische Parameter	14
2.2.1 Geometrische Parameter	14
2.2.2 Oberflächenchemie / Kontaktwinkel	14
2.3 Ölarnten	14
2.4 Experimente und Versuchsdesign	16
2.4.1 Öladsorptionskapazität	16
2.4.2 Horizontaler Öltransport	16
2.4.3 Vertikaler Öltransport.....	17
2.4.4 Screening	17
2.4.5 Kurz- und Langzeitmessungen mit ausgewählten technischen Textilien und Öltypen.....	18
2.4.6 Einfluss von Textil-Geometrien und Anordnung auf den Öltransport...	19
2.4.7 Einfluss von Kontaminationen	20
2.4.8 Untersuchung des Transportvorganges innerhalb des Textils.....	20
2.4.9 Freilandversuch mit BOA-Demonstrator.....	21

2.5	Konzeptionierung idealer Konstruktionsparameter mittels Simulation	21
2.5.1	Numerische Strömungssimulation	21
2.5.2	Relevante Eigenschaften des biologischen Vorbilds	22
2.5.3	Modellbildung	22
2.5.4	Simulationsdurchführung	24
2.5.5	Parametervariation und Zusammenfassung	25
3	Ergebnisse	26
3.1	Die biologischen Vorbilder	26
3.1.1	Öl-Transport	26
3.1.2	Öladsorptionskapazität	27
3.2	Technische Oberflächen - Screening	27
3.2.1	Öladsorptionskapazität	28
3.2.2	Horizontaler Transport	29
3.2.3	Vertikaler Transport	29
3.3	Technische Oberflächen - Simulation	30
3.4	Performance ausgewählter technischer Textilien	33
3.4.1	Kontinuierliche und diskontinuierliche Langzeitversuche	33
3.4.2	Einfluss der Ölart auf den Öltransport	35
3.4.3	Geometrien und Anordnung der technischen Textilien	36
3.4.4	Hydrophobierung der Textilien	37
3.4.5	Transportvorgang	37
3.5	Validierung der Simulationsergebnisse	39
3.5.1	3D-Abformungen	39
3.5.2	Ausgewählte Textilien	39
4	Diskussion	40
4.1	Diskussion der Ergebnisse	40
4.1.1	Diskussion Simulationsergebnisse	42

4.2	Diskussion der Methoden.....	42
4.3	Bewertung in ökologischer, technologischer und ökonomischer Hinsicht	43
5	Öffentlichkeitsarbeit und Publikationen.....	44
5.1	Tagungen, Messen, weitere Vorträge und Veröffentlichungen (N/I)	44
5.2	Medien	45
6	Fazit und Ausblick	46
7	Literaturverzeichnis	46
	Anhang	49
	Videos.....	49

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Ölfilm auf Binnengewässer.....	8
Abbildung 2: Mechanisch und personell aufwendige Entfernung einer Ölkontamination.	8
Abbildung 3: Ölaufnahme durch ein Blatt von <i>Salvinia molesta</i>	10
Abbildung 4: Schema der untersuchten Textilien.	12
Abbildung 5: REM-Aufnahmen der Textilproben BOA-003, BOA-047 und BOA-054.....	13
Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Messung des horizontalen Öltransportes.	16
Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Messung der vertikalen Öltransporthöhe und -geschwindigkeit.	17
Abbildung 8: Versuchsaufbau Kurz- und Langzeitmessungen des Öltransports....	18
Abbildung 9: Versuchsaufbau Kontaminationsversuche.	20
Abbildung 10: Haare von <i>Salvinia molesta</i>	22
Abbildung 11: <i>S. molesta</i> Haare und abstrahierte Geometrie.	23
Abbildung 12: <i>S. moelsta</i> Haare und Querschnittsanordnung.....	23
Abbildung 13: Randgebiete des Simulationsmodelles mit Strömungsrichtung.....	24
Abbildung 14: Rechennetz des Simulationsmodelles.....	24
Abbildung 15: Zusammenfassung des Simulationsmodelles.	25
Abbildung 16: Vertikaler Öl-Transport an biologischen Oberflächen.....	26
Abbildung 17: Ölaufnahmekapazität der biologischen Oberflächen.	27
Abbildung 18: ÖladSORPTIONSKAPAZITÄT für Motoröl der im Screening berücksichtigten Textilien.	28
Abbildung 19: Zusammenhang zwischen der Ölaufnahmekapazität für Motoröl und der Faserlänge.	28
Abbildung 20: Horizontale Öl-Transport-geschwindigkeit.....	29
Abbildung 21: Transporthöhe Vertikaltransport.	29
Abbildung 22: Transportgeschwindigkeit von Altöl in Abhängigkeit des Ölkontaktwinkels bei konstanten Strukturparametern.	30

Abbildung 23: Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Viskosität.....	31
Abbildung 24: Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand.	31
Abbildung 25: Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit von dem Abstand.	31
Abbildung 26: Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit von dem Verhältnis von Abstand zu Durchmesser (A/D).	32
Abbildung 27: Vergleich des horizontalen Transport von Heiz- und Motoröl.....	33
Abbildung 28: Horizontaler Transport von Heizöl durch BOA-047 und BOA-003.....	34
Abbildung 29: Horizontaler Transport von Diesel durch BOA-047.	34
Abbildung 30: Zusammenhang zwischen Temperatur und Transport- geschwindigkeit im diskontinuierlicher Transportversuch.....	35
Abbildung 31: Volumenstrom in Abhängigkeit der untersuchten Ölarten.	35
Abbildung 32: Transportgeschwindigkeit von Heizöl durch das Funktionstextil BOA-047 mit unterschiedlichen Geometrien und Überhanglängen... ..	36
Abbildung 33: Gemessener Volumenstrom im Kurzzeitversuch.....	36
Abbildung 34: Volumenstrom bei BOA-047 mit Diesel im unbeschichteten Zustand, mit Tegotop besprüht und getränkt.....	37
Abbildung 35: Altöltransport in BOA-047 in horizontaler und vertikaler Richtung.....	38
Abbildung 36: Öltransportwege im Querschnitt von BOA-047 in vertikaler Richtung.....	38
Abbildung 37: Geometrie eines 3D Drucks für ein Validierungsexperiment.	39
Abbildung 38: Horizontaler Öltransport von Altöl durch den 3D-Druck.....	39
Abbildung 39: Position der Öfließkante über die Zeit bei der Adsorption mit linearem Trend.	40
Abbildung 40: Schematische Übersicht über die beim Öltransport vorherrschenden Kräfte.	43

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Übersicht zum verwendeten Pflanzenmaterial.....	11
Tabelle 2: Parameter der im Screening identifizierten optimalen Textilien	12
Tabelle 3: Liste der verwendeten Öle und Ölgemische.	15
Tabelle 4: Bewertungskriterien für die Screening-Versuche mit Punktesystem.....	18
Tabelle 5: Übersicht zu den durchgeführten, kontinuierlichen Versuchen.....	19
Tabelle 6: Übersicht der durchgeführten, nicht kontinuierlichen Transportversuche.....	19
Tabelle 7: Maximal ermittelte vertikale Transporthöhe der verschiedenen Ölarten an den Blattoberflächen von <i>Cistus</i> und <i>Pistia</i>	27
Tabelle 8: Bewertung der Vorversuche mit Proben, die für alle weiteren Untersuchungen ausgewählt wurden.....	28

Verzeichnis der Begriffe

CPD	Critical Point Dried	PET	Polyethylenterephtalat
PES	Polyethylensulfid	PBT	Polybutylenterephtalat
REM	Rasterelektronenmikroskopie	s.d.	Standardabweichung

Verzeichnis der Definitionen

2D-Textilien: Textilien ohne Fadensystem orthogonal zur textilen Grundfläche, z. B. Gelege, Gewebe, Gestricke

3D-Textilien: Textilien mit Fadensystem orthogonal zur textilen Grundfläche z. B. Abstandsgewirk, Abstandsgestrick, Schnittflorteppich

Zusammenfassung

Ölverschmutzungen von Gewässern stellen ein weltweites Umweltproblem dar. In der medialen Wahrnehmung stehen vor allem die marinen Katastrophen verursacht von Öltankern und Bohrplattformen im Mittelpunkt. Die alltäglichen Kontaminationen von Binnengewässern, vorwiegend mit Diesel, Heiz- oder Motoröl, werden meist nur lokal beachtet. Allerdings führen diese ebenfalls weltweit zu ökologisch hoch bedenklichen Störungen der sensitivsten Ökosysteme und Biotope und gefährden darüber hinaus unsere Trinkwasserversorgung.

Ein völlig neuartiger Ansatz zur Beseitigung derartiger Verschmutzungen bildet die Grundlage dieses, von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekts („Entwicklung eines physikalischen bionischen Verfahrens zur Entfernung von Ölverschmutzungen auf Wasser unter Einsatz superhydrophober Funktionstextilien“; Az: 34602/01): Mittels eines auf dem Wasser flottierenden Bionischen Öl-Adsorbers (BOA), der passiv ohne Energiezufuhr mit Funktionstextilien in der Lage ist, hoch effizient Öl aus Wasser zu adsorbieren und zur Entsorgung in einen Sammelbehälter zu transportieren. Diese neuartige Technologie kann vermutlich in geeigneter modifizierter Ausführung auch im marinen Bereich (z. B. Hafenbecken) und die Textilien bei der industriellen Öl-Wasser-Separation (z. B. Bilgenwasser) eingesetzt werden.

Grundlage waren die nach der Entdeckung und bionischen Umsetzung des Lotus-Effektes seit 2008 durchgeführten Arbeiten an der Universität Bonn zu effizienter Adsorption und schnellem passiven Transport von Öl auf biologischen Oberflächen. Es fanden sich dabei Organismen (vor allem Pflanzen), die mit teilweise höchst komplexer Oberflächenarchitektur (wie der Schwimmpflanze *Salvinia molesta*) dazu optimal in der Lage sind. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde eine entsprechende Technologie entwickelt.

Folgend wurden in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen und der Heimbach GmbH, Düren, im Rahmen dieses Projektes geeignete Funktionstextilien identifiziert, die bereits in 6 cm breiten Streifen bis zu einem halben Liter Diesel-, Heiz- oder Motoröl von einer Wasseroberfläche in einen Sammelbehälter transportieren. Ein kleiner (Durchmesser ca. 30 cm) flottierender prototypischer Bionischer Öl-Adsorber kann mit sechs Adsorbentextil-Streifen (jeweils 6 cm breit) umweltfreundlich, effizient und passiv bis zu 3 Liter Öl pro Stunde von einer Gewässeroberfläche sammeln.

Die Technologie wurde im Detail untersucht und die Auswahl der Textilien durch Simulationsmodelle unterstützt. Zweifellos gibt es für eine kommerzielle Umsetzung noch offene Fragen, wie bspw. Skalierung und Konstruktionsdetails von BOA, Stabilität bei starkem Wellenschlag der Gewässer, Hydrophobierung der Textilien, etc.

Die hohe Effizienz der ersten Prototypen lässt jedoch eine zeitnahe industrielle Produktion des Bionischen Öl-Adsorbers für die Öl-Wasser-Trennung erwarten. Die Projektergebnisse zeigten zudem, welche unerwarteten materialwissenschaftlichen und technischen Innovationen aus der biologischen Vielfalt ableitbar sind.

1 Einleitung

Öle und ölhaltige Substanzen auf Gewässern stellen ein weltweit zunehmendes Umwelt-Problem dar (Fingas 2012, 2015). Im Blickpunkt der Öffentlichkeit stehen dabei die marinen Tankerunglücke und Bohrplattform-Zwischenfälle wie bei der Ölbohrplattform „Deep Water Horizon“ im Jahr 2010, bei dem nach offiziellen Schätzungen etwa 780 Mio. Liter Rohöl ins Meer gelangten (Atlas, 2011; https://de.wikipedia.org/wiki/Deepwater_Horizon). Sie rücken die Thematik immer wieder in den Fokus des öffentlichen Interesses – wie im Januar 2022 die katastrophale Ölverschmutzung vor der Küste von Peru, die kausal letztlich auf den Ausbruch eines tausende Kilometer entfernten Vulkans vor dem Tonga-Archipel zurückzuführen ist.

Das abgeschlossene DBU-Projekt BOA zielte jedoch primär auf die Entfernung von Ölverschmutzungen aus Binnengewässern ab, wobei auch ein Einsatz im marinen Bereich in bestimmten Fällen denkbar ist. Es sind die alltäglichen Verunreinigungen mit Heiz-, Diesel- oder Motoröl, die weltweit diese Gewässer mit irisierenden Filmen überziehen (Abbildung 1).



Abbildung 1: Ölfilm auf Binnengewässer. Diese sind ein weltweites Problem von hoher ökologischer Relevanz, auch für die Trinkwasserversorgung. Hier ein Beispiel der University of Calgary von 2016. Die Entfernung ist mechanisch hoch aufwendig oder manchmal nur unter dem Einsatz umweltschädlicher Chemikalien möglich <https://biologix.ie/oil-spill/calgary-university-investigative-tool-wildfires-spills/>



Abbildung 2: Mechanisch und personell aufwendige Entfernung einer Ölkontamination. Ein Teich im Schlosspark München-Nymphenburg in 2016. Der Ölfilm muss aufwändig von der Feuerwehr entfernt werden. Der BOA würde die Entfernung ohne großen Aufwand kostengünstig und umweltfreundlich ermöglichen. Foto: Feuerwehr München <https://www.abendzeitung-muenchen.de/muenchen/stadtviertel/mysterioeser-oelfilm-im-nymphenburger-schlosskanal-art-537493>

Sie bedrohen damit die hochempfindlichen artenreichen Ökosysteme – aber auch unsere essentielle Trinkwasserversorgung (Vandermeulen & Hrudehy, 1987; Green & Trett, 1989). Trotzdem werden diese weniger „spektakulären“ Unfälle meist nur von der lokalen Presse und den betroffenen Anliegern und Kommunen zur Kenntnis genommen. Ein repräsentativer Bericht (Zeitraum 1968-2012) sieht in den USA bei 10 von 13 Problemfeldern eine größere Gefahr von den Öl-Unfällen im Binnenland ausgehen als von Zwischenfällen auf offener See (American Petroleum Industry, 2016). Eine weitere Studie der American Petroleum Industry (2009) schätzt den in den USA durch den Menschen verursachten Öl-Austritt auf jährlich 30 Mio. Liter (Zeitraum 1998-2007).

Die Beseitigung von Ölfilmen ist mit einem hohen personellen und mechanischen Aufwand verbunden: Feuerwehr und Umweltbehörden sind tagelang beschäftigt, selbst Kontaminationen von wenigen Litern (in Form eines Films gewaltige Flächen) zu entfernen (Abbildung 2).

Die Gefährdung von Tieren, Pflanzen und den Trinkwasserressourcen wird durch die Wasserbewegung sowie die komplexe Vernetzung der Wasserwege und über biotische Nahrungsketten auf weitere Lebensräume ausgedehnt. Oftmals verdunsten große Mengen der Ölfilme (abhängig von der Öl-Sorte bis zu 75 %), wodurch erhebliche Schadstoffmengen in die Luft gelangen. Letzteres führt zur Verbreitung giftiger Bestandteile, wie z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAHs), die durch Regenfälle wieder aus der Luft auf Böden und Gewässer verteilt werden (Weis, 2014). Zusätzlich tragen gerade diese Schadstoffe aktiv zur Treibhausgasbelastung und somit zum Klimawandel bei. In den letzten Jahren wuchs das Bewusstsein für dieses Problem und die daraus resultierende Gefährdung für unsere Gesundheit, den Erhalt der Biodiversität und das Klima (Hiscock, 2014).

Eine wachsende Community beschäftigt sich mit der Thematik, wobei vorwiegend auch hier zunächst die „großen marinen Katastrophen“ und Möglichkeiten, diese massiven Verschmutzungen unter Kontrolle zu halten, im Fokus stehen (Fingas, 2012; Davidson et al., 2006). Die Problematik besteht darin, das Öl effektiv und umweltschonend vom Wasser zu trennen. Bisherige Methoden sind vor allem für den Einsatz im Hochseebereich konzipiert und bergen teils große Nachteile. Die wohl umweltverträglichste Methode ist physikalisch: das Einkesseln des Ölteppichs durch eine Barriere und anschließendes Absaugen mittels einer Saugapparatur („skimming“) (Nordvick, 1996; DITF, 2018). Beim Absaugen dünnerer Ölfilme besteht die abgesaugte Flüssigkeit jedoch zum größten Teil aus Wasser, wodurch eine zusätzliche Filterung erforderlich ist. Eine andere, ebenfalls häufig angewendete Methode basiert auf dem Einsatz von Dispersions-/Bindemitteln (Prince, 2015). Diese nehmen das Öl auf und vereinzeln es, um Bakterien den biologischen Abbau zu erleichtern. Dabei verteilen sie das Öl großflächig oder sinken mit ihm auf den Grund des Gewässers ab. Dies löst jedoch das Problem nur vordergründig, denn die Mittel und deren Abbauprodukte sind häufig gefährlicher für Tiere und Pflanzen als das Öl selbst (Bhattacharyya et al., 2003; Toyota et al. 2017). Es dauert zum Teil Jahre, bis das Öl und die Bindemittel biologisch abgebaut werden (White, 2014). In diesem Zeitraum können die Neben- und Zwischenprodukte von Wasserlebewesen aufgenommen werden und in die Nahrungskette gelangen. Weiterhin ist der biologische Abbau durch Bakterien sehr sauerstoffintensiv. Für eine vollständige bakterielle Umsetzung von 1 kg Öl werden mehr als 1,7 kg Sauerstoff benötigt (Beckermann et al., 1999). Bei einer Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser von 9 mg/l (bei 20 °C und 1013.25 hPa) entspricht dies rund 200.000 Litern Frischwasser. Insbesondere bei langsam fließenden oder gar stehenden Gewässern stellt dieser hohe Sauerstoffbedarf ein großes Problem dar, da das Öl hier einerseits nicht weitertransportiert, und andererseits nur wenig Sauerstoff nachgeliefert wird. Die Problematik wird weiterhin dadurch verstärkt, dass der an der Wasseroberfläche verbleibende Ölfilm den Sauerstoffnachschub aus der Luft unterbindet. Der entstehende Sauerstoffmangel kann schnell das Umkippen des Gewässers zur Folge haben. Andere Verfahren basieren auf Basis von Gitterstrukturen (Brown & Bushan, 2015) oder der Verwendung von Membranen (Wu, 2014). Sie ermöglichen eine zuverlässige Öl-Wasser-Separation, sind aber sehr kostenintensiv und können nur in geringem Umfang eingesetzt werden. Die Beseitigung der kleineren, alltäglichen Öl-Verschmutzungen ist daher von größter Relevanz.

Hier wird eine völlig neue Technologie vorgestellt: ein auf der Wasseroberfläche schwimmender, physikalischer Apparat (Funktionsprinzip siehe [Video](#)), der über Adsorptionstextilien Ölfilme adsorbieren und sie passiv gegen die Schwerkraft in einem entleerbaren Sammelbehälter transportiert. Selbst ein Prototyp mit nur 30 cm Durchmesser mit sechs streifenförmigen Adsorptionstextilien war erstaunlicherweise

in der Lage, bis zu drei Liter Heizöl pro Stunde von einer Gewässeroberfläche zu entfernen. Der Einsatz dieser Technologie ist vor allem im Bereich von Binnengewässern zu sehen, es sind aber durchaus Anwendungen im marinen Bereich und generell bei der Öl-Wasser-Separation im Bereich der Schifffahrt (Bilgen-Öle) und in industriellen Anlagen denkbar.

Grundlage dieses Projektes sind die jahrzehntelangen bionischen Arbeiten an biologischen Oberflächen, bei denen rund 20.000 Pflanzen- und Tierarten in der Arbeitsgruppe W. Barthlott an der Universität Bonn (Barthlott et al. 2017) untersucht wurden, die u.a. zu der Entdeckung und Anwendung des Lotus-Effektes führten. Seit 2006 wurden dabei gezielt auch die Adsorption und der Transport von Flüssigkeiten an Oberflächen untersucht und führten zur Entdeckung der superhydrophilen und superoleophilen Oberfläche bei *Ruellia devoniana* (Koch et al. 2009). Des Weiteren konnte diese superoleophile Eigenschaft auch am Schwimmpflanz *Salvinia molesta* festgestellt werden (Barthlott et al. 2010). Dieser wurde als weiteres biologisches Vorbild anschließend in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) auf seine Fähigkeit, mit seiner extrem komplexen Oberflächenarchitektur (Abbildung 2) Öl zu adsorbieren und zu transportieren, analysiert (Zeiger et al. 2016, Barthlott et al. 2020).



Abbildung 3: Ölaufnahme durch ein Blatt von *Salvinia molesta*.

a) Ein Öltropfen auf einer Wasseroberfläche, b) der Öltropfen kommt mit einem Blatt des Schwimmpflanz *Salvinia molesta* in Kontakt, c) das Blatt des Schwimmpflanz adsorbiert das Öl von der Wasseroberfläche (Barthlott et al. 2020).

Der Schritt zur Entwicklung des bionischen Ölsammlers BOA erfolgte mit der Patentanmeldung der Universität Bonn 2018 ([WO2020021031A1](#)). Es zeichnete sich früh ab, dass Flock oder andere textile Träger ideale Substrate sind, um das Funktionsprinzip des biologischen Vorbildes abzubilden. Anschließend begann die Kooperation mit dem Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA) und folgend mit der Heimbach GmbH, Düren. Textilien bieten sich an, da mit ihnen der hierarchische Aufbau der Pflanze optimal nachempfunden werden kann. Die Mehrskaligkeit des Aufbaus lufthaltender, superhydrophober Oberflächen lässt sich durch breite Auswahlmöglichkeiten von Polymeren (z.B. hydrophil, hydrophob), Filamentgarnen (z.B. Feinheit, Querschnittsgeometrie), textilen Strukturen (z.B. Vlies, Gewebe, Gewirke, Gestrick, Geflecht, Tuftingstruktur (Teppich)) und nachfolgenden Ausrüstungs- und Veredelungsprozessen (Beflocken, offenporige Beschichtungen und Laminieren), auf Textilien abbilden. Textilien sind somit ideal zur Entwicklung neuartiger, Öl-adsorbierender Oberflächen geeignet. Die Textiltechnik ist traditionell ein wichtiger Bereich der deutschen Industrie, in dem KMU ca. 50 % der insgesamt 693 Betriebe ausmachen. Insgesamt wird jährlich ein Umsatz von 11 Mrd. € erwirtschaftet, wovon 220 Mio. € für Forschung und Entwicklung aufgewendet werden (Statistika 2021).

Zum besseren Verständnis der Vorgänge in der Biologie und der anschließenden Übertragung in die Technik wurden die Vorgänge zuerst simulativ untersucht. Im Bereich der Modellierung und Simulation von textilen Prozessen weist das ITA eine langjährige Erfahrung auf. So wurde bereits 2004 am ITA der Rotationsspinnprozess mittels neuronaler Netze untersucht und der Einfluss der Eingangsparameter auf die zu erwartenden Garneigenschaften vorhergesagt.

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung/Identifikation eines geeigneten Funktionstextils, mit dem die Fähigkeit zur Öladsorption der biologischen Oberflächen in die Technik übertragen werden kann. Dieses BOA-Textil soll somit eine schnelle wirtschaftliche, umweltschonende, leicht zu handhabende und wiederverwendbare Beseitigung von Ölverschmutzungen aus Gewässern ermöglichen. Geeignete Funktionstextilien wurden identifiziert. Wesentliche Charakteristika der Funktionstextilien sind dabei eine schnelle Öladsorption und eine hohe Transportgeschwindigkeit.

Das abgeschlossene Projekt ist ein weiteres Beispiel, wie die ungeheure Vielfalt biologischer Oberflächenstrukturen im Zeitalter des Anthropozäns für neuartige umweltfreundliche Technologien bionisch umgesetzt werden kann. Gerade die Bionik trägt in unserer technikgläubigen Gesellschaft zur Wertschätzung von Biodiversität und damit zu ihrem Erhalt bei. (Barthlott, Rafiqpoor & Erdelen 2016). Die zunehmenden Umweltverschmutzungen Gewässern mit Öl sind letztlich ein weltweit relevantes Problem.

2 Arbeitsschritte und angewandte Methoden

2.1 Proben

2.1.1 Biologische Oberflächen

Auf Grundlage der weltweit größten Datensammlung von Strukturen biologischer Oberflächen (siehe Review Barthlott et al. 2017) wurde eine Auswahl von Pflanzen hinsichtlich ihrer Öl-Adsorptionsfähigkeit getestet. Fünf Arten mit superhydrophoben Oberflächen wurden für die weiteren Untersuchungen ausgewählt (Tabelle 1) und auf ihre Öl-Adsorptions- und Transporteigenschaften hin untersucht. Von *Salvinia molesta*, *Pistia stratiotes*, *Helianthemum apenninum* und *Cistus albidus* wurden die Blätter untersucht, von *Fibigia triquetra* dagegen die unreifen Früchte. Alle Proben wurden frisch entnommen und sofort für die Messungen verwendet.

Tabelle 1: Übersicht zum verwendeten Pflanzenmaterial. Herkunft und Akzessionsnummern aus dem Botanischen Garten der Universität Bonn.

Art	Familie	Akzessionsnr.	Bereich
<i>Cistus albidus</i>	Cistaceae	BGB 214536-15	voll entwickelte, obere Blattseite
<i>Pistia stratiotes</i>	Araceae	BG BONN 1077	Blätter
<i>Salvinia molesta</i>	Salviniaceae	BG BONN 14459	Schwimmblätter
<i>Fibigia triquetra</i>	Brassicaceae	BG BONN 06870	Oberfläche von unreifen, noch grünen Früchten
<i>Helianthemum apenninum</i>	Cistaceae	BG BONN 32438	Obere Blattseite von jungen, aber voll entwickelten Blättern

2.1.2 Technische Oberflächen und technische Textilien

Wie schon vorher bei den Biologischen Vorbildern mussten die textilen Transportvorgänge zunächst verstanden werden. Auf eine Entwicklung im Primärspinnen wurde verzichtet und die Identifikation eines transportierenden technischen Textils angestrebt. Dazu wurden im Rahmen eines Screenings insgesamt 54 Textilproben auf ihre Öl-Adsorptions- und Transporteigenschaften hin untersucht, um öldadsorbierende Textilien zu identifizieren und die Zusammenhänge in den Strukturparametern zu erkennen. Die Proben umfassen eine Vielzahl von Materialien und Herstellungsverfahren, und weisen ein weites Spektrum an Strukturparametern auf. Es handelt sich um eine Auswahl verschiedener 2D- und 3D-Textilien, wie z. B. 18 verschiedene Gewebe, 3 Spiralstrukturen, 2 Abstandstextilien und 8 Velours. (vollständige Liste im Anhang). Zweidimensionale Textilien wurden vor allem betrachtet, um Transportvorgänge besser zu verstehen. Durch die 3D-Textilien konnten die biologischen Vorbilder besser abgebildet werden. Alle Textilien wurden in 30 mm x 100 mm große Streifen geschnitten. Pro Textilart wurden drei Proben gefertigt, die wie in 2.1.3 beschrieben hydrophobiert wurden. Die Textilien wurden hinsichtlich der Faserlänge, dem Faserabstand und dem Faserdurchmesser bewertet (Abbildung 4).

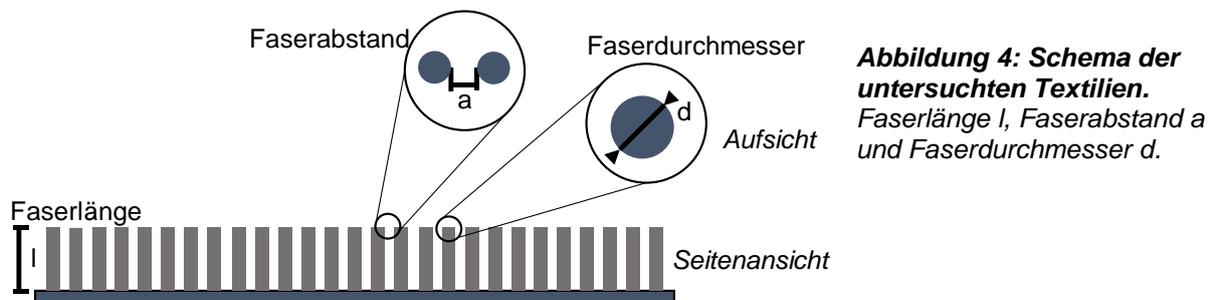


Abbildung 4: Schema der untersuchten Textilien.
Faserlänge l , Faserabstand a und Faserdurchmesser d .

Tabelle 2: Parameter der im Screening identifizierten optimalen Textilien

Textilstruktur	Abstandstextil	Abstandstextil	Velours
ID-Number	BOA-003	BOA-047	BOA-054
Hersteller	Müller Textile GmbH, Wiehl	Eschler Textil GmbH, Balingen	Spandauer Velours GmbH & Co. KG, Liechtenstein/Sachsen
Material	100 % PET	72 % PES, 28 % PBT	100 % PES
Dicke [mm]	2,6	2,5	4,7
Flächengewicht[g/m ²]	320	280	
Faserabstand [mm]	0,65	< 0,1	1,4
Polfadendichte [Stk. /cm ²]	799	1408	Keine Angabe
Faserdurchmesser [mm]	0,066	0,025	< 0,02

Aus dem Screening wurden drei Textilien (Tabelle 2) zur detaillierten Untersuchung ausgewählt. Dabei handelte es sich um zwei Abstandstextilien und ein Velours. Die Proben bestehen aus unterschiedlichen Polymeren und unterscheiden sich zudem im strukturellen Aufbau. BOA-003 weist im Vergleich zu BOA-047 deutlich offenporigere Deckschichten auf. Zudem ist der Polfaden aus einem Monofilament, wodurch ein größerer Abstand zwischen den Polfäden entsteht als bei BOA-047. Hierbei ist der

Polfäden aus Multifilament mit einem geringeren Durchmesser. Beide Abstandstextilien sind im Querschnitt symmetrisch aufgebaut. Das Velours BOA-054 weist ähnlich feine Faserdurchmesser auf wie BOA-047. Dabei besteht die Grundstruktur aus einem Gewebe, von dem die Polfäden abstehen. BOA-054 ist im Querschnitt nicht symmetrisch aufgebaut (Abbildung 5).

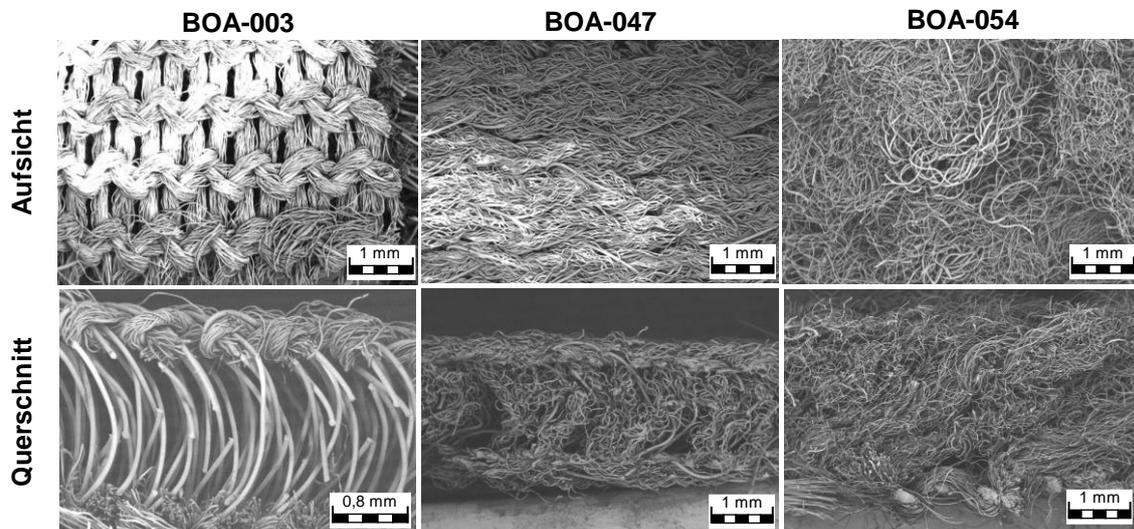


Abbildung 5: REM-Aufnahmen der Textilproben BOA-003, BOA-047 und BOA-054.

Neben den im Screening untersuchten Textilien wurden weitere ausgewählte technischen Oberflächen in weiterführenden Experimenten untersucht. Dies waren der kommerzielle Ölbinde-Vlies Cobranol, Flock, ein Glastextil und Schleifpapier zweier verschiedener Korngrößen (Details siehe Barthlott et al. 2020).

2.1.3 Hydrophobierung der Proben

Um mit den biologischen Oberflächen vergleichbare hydrophobe Eigenschaften an den Textilien zu gewährleisten, wurden die Textilien mit einem Hydrophobierungsmittel beschichtet. Dazu wurde Tegotop 210™ der Firma Evonik Industries AG, Essen, verwendet, eine Dispersion aus Siliziumoxiden, die auf den Fasern der Textilien eine Schicht mit Strukturen im Nanometerbereich bildet. Die Strukturierung mit dem hydrophoben Siliziumoxid sorgt für eine superhydrophobe Textiloberfläche. Die Hydrophobierung erfolgte dabei auf zwei unterschiedliche Arten. Entweder wurden die zugeschnittenen Proben an einer Leine aufgehängt und Tegotop 210™ mittels Airbrush von allen Seiten einschichtig aufgetragen. Anschließend wurden die Proben für mindestens einen Tag getrocknet. Alternativ, wurden die zugeschnittenen Textilproben mit Tegotop 210™ getränkt und anschließend mithilfe eines Stahlzylinders ausgequetscht. Anschließend wurden die Textilproben zum Trocknen für ca. 72 Stunden ausgelegt. Für die getrockneten Textilproben konnte mittels Tauchtest überprüft werden, ob diese durchgängig hydrophob sind. Beim Untertauchen sollte hierbei die silbrig glänzende Grenzschicht des Luftpolsters gut zu erkennen sein.

2.2 Chemische und physikalische Parameter

2.2.1 Geometrische Parameter

Die Strukturparameter der Oberflächen (Haarlänge, -durchmesser, -abstand) wurden mittels eines digitalen Mikroskopes (Keyence, Modell: VHX-1000, Objektive Keyence VH-Z20R und Keyence VH-Z100R) untersucht. Es wurden jeweils sechs Proben vermessen, davon jeweils drei in Längs- und drei in Querrichtung. Ergänzend wurde Rasterelektronenmikroskopie (Carl Zeiss Microscopy GmbH; Modell: Auriga 60; Beschleunigungsspannung 5 kV) eingesetzt. Zur Vorbereitung wurden die biologischen Proben in einer aufsteigenden Alkoholreihe entwässert, CPD-getrocknet (Leica CPD300, Leica Mikrosysteme GmbH) und mit einer 20-30 nm dicken Goldschicht beschichtet (Sputter Coater 108auto, Cressington Scientific Instruments hK).

Neben den Strukturparametern wurde die Dicke des Ölfilms in den Proben bestimmt. Dazu wurden im Anschluss an den in Kapitel 2.4 beschriebenen Versuchen die untersuchten biologischen Oberflächen mittels flüssigem Stickstoffs schockgefroren. Anschließend wurden drei Blätter mittig der Länge nach vom basalen zum apikalen Ende und die anderen Blätter innerhalb des zentralen Bereichs durch die lateralen Außenbereiche gebrochen. Die Höhe der Ölschicht wurde an jeweils drei Stellen an den Blatträndern und im Blattzentrum gemessen.

Auch an den technischen Textilien wurden lichtmikroskopisch die Ober- und Unterseite, sowie der Querschnitt untersucht. Anschließend wurden die Parameter Faserlänge, Faserabstand und Faserdurchmesser ausgemessen, indem 5 Messungen pro Textil durchgeführt wurden und der Mittelwert gebildet wurde. Ergänzend wurde REM verwendet, sodass die vielversprechendsten Textilien höher aufgelöst betrachtet werden konnten.

2.2.2 Oberflächenchemie / Kontaktwinkel

Für die Messung des Kontaktwinkels mit Wasser und Öl wurde ein Aufbau nach DIN 55660-2 gewählt. Die Probe wurde auf einem Probenhalter horizontal abgelegt. Eine Kamera wurde auf einer Höhe mit dem Textil und in einer Achse gegenüber einer Lampe aufgebaut. Auf die Probe wurde ein Tropfen mit einem Volumen von 60-80 µl mithilfe einer Spritze aufgetragen. Durch die Kamera wurde ein Bild aufgenommen, welches mithilfe der Bildbearbeitungssoftware ImageJ (Wayne Rasband, national Institute of Health, USA) bzgl. des Winkels ausgewertet wurde. Insgesamt wurden pro Probe sechs Aufnahmen gemacht.

2.3 Ölarnten

Zur Berücksichtigung verschiedener potentieller Einsatzbereiche des BOA wurden verschiedene Öle für die Versuche ausgewählt. Ziel war, dass der BOA möglichst verschiedene Öle gut adsorbieren und transportieren kann. Für die weiteren Versuche wurden drei Öle und zwei Ölgemische ausgewählt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Viskosität. Zu den reinen Ölen zählen ein mineralisches Motorenöl, Diesel und ein herkömmliches Heizöl.

Tabelle 3: Liste der verwendeten Öle und Ölgemische.

Bezeichnung	Typ	Viskosität bei 20°C [cP]	Dichte [kg/m ³]	Hersteller/ Bereitsteller
Motoröl 15W40	Mineralisches Motorenöl	196,7	866	Ravensberger Schierstoffvertrieb GmbH
Heizöl	Heizöl Schwefelarm	5,6	829	Dossinger GmbH, Knauber
Diesel	Diesekraftstoff	4,5	845	Aral AG
Altöl	Ölgemisch aus dem Automobilbereich	66,1	859	Bonner Kfz-Werkstatt
Bilgenöl	Ölgemisch aus der Binnenschifffahrt	147,3	872	Bilgenentölungsgesellschaft

Die in Tabelle 3 dargestellten Viskositätswerte der Öle wurden für das Motoröl den Herstellerinformationen entnommen. Für Bilgenöl, Heizöl und Altöl lagen keine Herstellerinformation vor, sodass ergänzend eigene Messung mittels eines Digital-Viskosimeter (Brookfield Digital-Viskosimeter; Modell: DV-II+Pro) durchgeführt wurden. Zur Bestimmung der Dichte wurde die Masse einer definierten Menge bestimmt. Mit einer Pipette wurden 5 Mal 6 ml (bei Heizöl nur 3 ml) ungefärbtes Öl entnommen und anschließend das Gewicht mittels einer Waage (Kern EMB 200-3; Eichgewicht 0,001 g) bestimmt. Für einige Experimente wurde das transparente Öle eingefärbt, um es besser sichtbar zu machen. Das Motoröl und das Heizöl wurden mit Sudanschwarz B (Carl Roth GmbH + Co. KG, Art.-Nr.02922, Chemische Formel: C₂₉H₂₄N₆) eingefärbt. Es wurden 0,1 g Sudanschwarz zu 100 ml Öl gegeben und unter Verwendung eines Ultraschallgerätes (Bandelin Sonorex TK20) bis zum Vorliegen einer homogenen Mischung gut gemischt. Die Ölgemische Altöl und Bilgenöl sind bereits ohne zusätzliche Färbung dunkelbraun bis schwarz.

Das Motorenöl (15W40, Ravenol) wird im Fahrzeugbereich eingesetzt. Da für die Folgeversuche dieses Öl nicht mehr vom gleichen Hersteller bezogen werden konnte, wurde hier das Motorenöl 15W-40 von Total Classic verwendet. Heizöl zeichnet sich durch eine geringe Viskosität aus. Das verwendete schwefelarme Heizöl gilt in Deutschland als Standard-Heizöl für Heizungsanlagen und Ölbrennwerttechnik. Heizöl kann beispielsweise bei Überschwemmungen aus Kellern austreten und auf diesem Wege ins Wasser gelangen (Warm and Köppke, 2007). Motoröl gelangt überwiegend über Lecks und bei Unfällen in die Umwelt. Das Heizöl wurde zunächst von der Dossinger GmbH, später von der Knauber GmbH bezogen. Diesel ist chemisch identisch zu Heizöl, jedoch tritt Diesel eher durch unvorsichtige Betankung von Schiffen, KFZ und LKW aus, oder gelangt durch Lecks in Tankstellen, bei Verkehrsunfällen und bei Unfällen bei dem Transport und der Lagerung in die Umwelt. Der verwendete Diesel wurde von kommerziellen Tankstellen beschafft. Es wurde außerdem Altöl aus dem Automobilsektor verwendet. Dieses ist ein Ölgemisch von Schmierölen, die bei Personenkraftwagen anfallen. Es wurde von einer Autowerkstatt (Bonner Kfz-Werkstatt) zur Verfügung gestellt. Altöl und 15W40 kann durch Lecks oder Unfälle aus Autos und Lastwagen auf Straßen und andere versiegelte Flächen gelangen, von welchen es dann bei Niederschlägen abgeschwemmt wird (Weis 2014). Bilgenwasser ist ein korrosives Gemisch aus Wasser und anderen Flüssigkeiten, die sich in der Schifffahrt innerhalb des Schiffsrumpfes (Bilge) ansammeln können (Körbahti and Artut 2010). Zu den Bestandteilen des Bilgenwassers zählen Öle (Kraftstoffe, Schmieröle, Hydrauliköle), Reinigungsmittel, Fette, Lösemittel und Farben. Der Wasseranteil des Bilgenwassers enthält dabei sowohl Salzwasser als

auch Süßwasser (Bhattacharyya et al. 1979; Körbahti and Artut 2010). Die Zusammensetzung des Bilgenwassers hängt von dem Schiffstyp und dem Einsatzgebiet ab (Bhattacharyya et al. 1979). Die Öle stellen den größten Anteil an Fremdstoffen im Bilgenwasser dar und bilden eine aufschwimmende Phase (Bilgenöl). Dieses Bilgenöl wurde für die Versuche abgeschöpft. Bilgenwasser und -öl gelangen durch die Schifffahrt in die Umwelt (Bernal et al. 1999), zum Beispiel bei Schiffsunfällen von Tankern und durch Lecks.

2.4 Experimente und Versuchsdesign

2.4.1 ÖladSORPTIONSKAPAZITÄT

Zur Bestimmung der ÖladSORPTIONSKAPAZITÄT wurden die zuvor hydrophobierten Proben auf ein Maß von 20 x 20 mm² zugeschnitten und gewogen (Kern EMB 200-3). Anschließend wurde jede Probe einzeln für 30 Sekunden so in das Öl getaucht, dass die relevante Seite der Probe nach unten zeigt. Dann wurde die Probe mit einer Pinzette vorsichtig aus dem Öl gehoben, sodass das Öl abtropft. Hierbei wurde die Probe immer so gehalten, dass eine Ecke der quadratischen Probe nach unten zeigte und die Diagonale genau vertikal stand. Es wurde gewartet bis 30 Sekunden lang kein Tropfen von der Probe mehr abtropft. Dann wurde sie unmittelbar erneut gewogen. Aus der Differenz der Probengewichte ohne und mit Öl wurde das Gewicht des aufgenommenen Öls berechnet. Anhand der ermittelten Dichte des verwendeten Öls konnte anhand des Gewichtes an aufgenommenem Öl auch das Volumen des aufgenommenen Öls berechnet werden.

2.4.2 Horizontaler Öltransport

Für die Versuche zum horizontalen Öltransport sowie für das Screening wurden die ausgewählten Oberflächen in 10 x 80 mm² große Streifen zugeschnitten. Ein dünner Draht wurde auf der Rückseite der Probe angeklebt und die beiden Probenenden auf einer Länge von 20 mm um 45° nach unten gebogen (Abbildung 6). Ein Ende der Proben wurde in Gefäß 1 (Petrischale mit 140 mm Durchmesser und 20 mm Höhe) gehängt, welches mit Wasser und Öl gefüllt war. Jede der Proben hatte dabei sowohl mit dem Öl als auch mit dem darunter befindlichem Wasser Kontakt.

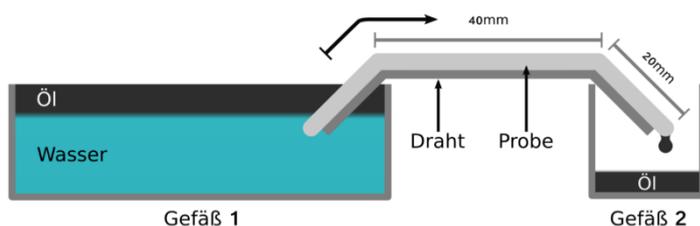


Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Messung des horizontalen Öltransportes.

Das Öl wurde von Gefäß 1 in das Gefäß 2 transportiert (Pfeil zeigt die Transportrichtung an)

Das andere Ende der Probe wurde in ein kleineres, leeres Gefäß (Gefäß 2) gehängt. Der mittlere Teil der Probe war dabei in waagerechter Lage. Das Gewicht der transportierten Ölmenge, welche sich in dem kleinen Gefäß sammelte, wurde dabei in definierten Zeitabständen gemessen. Nach der Messung wurde das Öl aus dem kleinen Gefäß wieder in das große Gefäß gegeben, um die Ölmenge weitgehend konstant zu halten.

2.4.3 Vertikaler Öltransport

Zur Messung des vertikalen Öltransportes wurden die verwendeten Proben in 10 mm breite Streifen geschnitten und senkrecht in ein Gefäß mit Öl gehängt, sodass die untere Kante Kontakt mit dem Öl hatte (Abbildung 7). Die Messung erfolgte über einen Zeitraum von jeweils einer Stunde. In dieser Zeit adsorbierte und transportierte die Probe das Öl in vertikaler Richtung entgegen der Schwerkraft. Eine auf einem Dreibeinstativ montierte und über einen Laptop gesteuerte (Software: EOS Utility) Kamera (Canon EOS 1200D mit Canon EFS 18-55mm Objektiv) zeichnete den Vorgang auf. Die Kamera befand sich frontal auf halber Höhe der Proben und konnte eine variable Distanz zur Probe aufweisen, um den Bildausschnitt bestmöglich auszufüllen. Zur Optimierung der Beleuchtung wurde eine Lampe hinter der Kamera aufgestellt.



Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Messung der vertikalen Öltransporthöhe und -geschwindigkeit. Die Richtung des Öltransportes ist durch die gestrichelte Linie angedeutet.

Ab dem Beginn des Versuchs wurde über einen Zeitraum von 5 Minuten alle 5 Sekunden ein Bild aufgenommen. Danach wurde die Kamera über weitere 55 Minuten alle 30 Sekunden ausgelöst. Die Bilder dokumentieren die Bewegung des Öls über insgesamt eine Stunde. Die Auswertung der Bilder erfolgte mit ImageJ, wobei die Einzelbilder als 'Stack' geladen werden. Als Größenreferenz wurde im Bildausschnitt ein Geodreieck platziert. Anhand der Bilderreihen (170 Einzelbilder für einen Versuch) wurde mittels Kymographen bestimmt, wie hoch das Öl zu jedem Aufnahmezeitpunkt des Versuchs transportiert wurde.

2.4.4 Screening

Die Vorversuche wurden für alle 54 Textilien mit Bilgenöl durchgeführt.

V1) Kontaktwinkel Wasser: Auf den ersten Teststreifen werden jeweils fünf Tropfen Wasser händisch mit einer Spritze auf die Oberseite des Teststreifens aufgetragen und der Kontaktwinkel optisch bewertet.

V2) Kontaktwinkel Öl: Analog zum ersten Vorversuch wurden jeweils fünf Tropfen Heizöl händisch mit einer zweiten Spritze auf die Vorderseite desselben Textils aufgetragen und optisch bewertet.

V3) Lufthaltung unter Wasser: Ein Becherglas wurde mit 250 ml Wasser befüllt und ein Teststreifen für eine Minute unter Wasser gehalten. Die Ausbildung einer Luftschicht, welche am silbrigen Glanz zu erkennen ist, wurde bewertet. Zudem wurde die Probe nach dem Eintauchen in das Wasser auf ein Papiertuch gelegt, um eingedrungenes Wasser zu identifizieren.

V4) Vertikaler Öltransport: Der dritte Probestreifen wurde an einem Stativ befestigt, sodass ein Ende in Kontakt mit Öl war. Für fünf Minuten wurde der vertikale Öltransport beobachtet und bewertet.

Für die vier Versuche wurde ein Bewertungssystem erstellt. Die Ergebnisse des Öltransportversuches erhielten einen Gewichtungsfaktor von zwei, da diese für das zukünftige Produkt entscheidend sind. Die Einzelpunkte der vier Versuche wurden miteinander addiert. Die maximale Punktzahl betrug neun Punkte. Alle Proben, die diesen Wert erreichten oder übertrafen, wurden für die weiteren Versuche ausgewählt und vorbereitet.

Tabelle 4: Bewertungskriterien für die Screening-Versuche mit Punktesystem.

Versuch	Beobachtung	Punkte
Kontaktwinkelmessung Wasser	Vollständige Benetzung durch den Wassertropfen	0
	Kontaktwinkel $< 90^\circ$, hydrophiler Zustand	1
	Kontaktwinkel $90^\circ < x < 150^\circ$, hydrophober Zustand	2
	Kontaktwinkel $150^\circ < x < 180^\circ$, superhydrophober Zustand	3
Kontaktwinkelmessung Öl	Kontaktwinkel $> 90^\circ$, oleophober Zustand	0
	Kontaktwinkel $< 90^\circ$, oleophiler Zustand	1
	Vollständige Benetzung durch den Öltropfen	2
Lufthaltung unter Wasser	Wasser durchdringt Probe unmittelbar nach dem Eintauchen	0
	Auf ca. 2/3 der Fläche silbriger Glanz, Papiertuch wurde nass	1
	Gesamte Fläche mit silbrig glänzender Luftschicht überzogen	2
Vertikaler Öltransport (Zweifache Gewichtung)	Es wurde kein Öl durch die Probe transportiert	0*2
	Geschwindigkeit des Öltransportes sehr gering	1*2
	Stetiger Öltransport, jedoch langsamer als bei <i>S. molesta</i>	2*2
	Öltransport ähnlich zu <i>S. molesta</i> oder schneller	3*2

Die Versuche zum Horizontaltransport wurden entsprechend der in 2.2.4 beschriebenen Methode über einen Zeitraum von 24 Stunden mit Motoröl durchgeführt. Zusätzlich wurde von allen untersuchten Textiltypen die Ölaufnahmekapazität entsprechend der in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Methode bestimmt.

2.4.5 Kurz- und Langzeitmessungen mit ausgewählten technischen Textilien und Öltypen

Diese Versuche wurden mit den technischen Textilien BOA-003 und BOA-047 durchgeführt, welche im Screening die besten Transporteigenschaften gezeigt hatten.

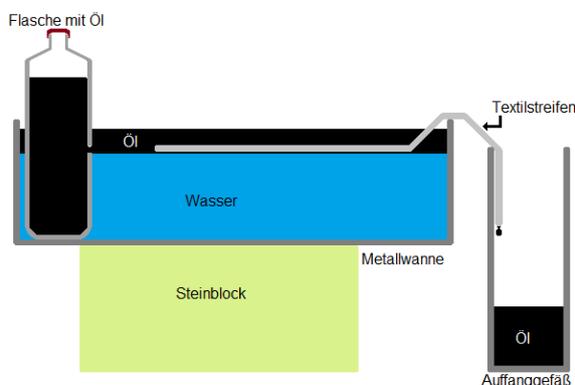


Abbildung 8: Versuchsaufbau Kurz- und Langzeitmessungen des Öltransports. Ein Funktionstextil adsorbiert das Öl und transportiert es in einen Auffangbehälter. Der Öl-Pegel wurde automatisch konstant gehalten.

Um die Transporteigenschaften unter anwendungsnahen Bedingungen zu testen wurden Kurz- und Langzeitmessungen mit dem in Abbildung 8 dargestellten Versuchsdesign durchgeführt. Dafür wurde eine 4 cm hohe Metallwanne bis zu einer Höhe von 3 cm mit Wasser befüllt. In das Wasser wurde eine Flasche aus Polyethylen hineingestellt. In dieser Flasche befand sich ein Loch auf Höhe der Wasseroberfläche, damit Öl automatisch ausströmen konnte. Die Größe des gewählten Lochs war dabei von der Viskosität des Öls abhängig (Heizöl: 6 mm, Motoröl: 7 mm). Durch den beschriebenen Aufbau konnte gewährleistet werden, dass eine Ölschicht mit einer weitgehend konstanten Schichtdicke von 5 mm auf der Wasseroberfläche lag. Der Abstand der Ölschicht zum obersten Rand der Wanne betrug 5 mm. Die Transporttextilien lagen in der Wasser-Öl-Grenzschicht und transportierten das Öl aus dem Ölfilm in ein Auffanggefäß. Durchgeführt wurden sowohl kontinuierliche Messungen als auch diskontinuierliche Messungen. Bei den kontinuierlichen Messungen (Tabelle 5) ging es darum die Transporteigenschaften des Textils über einen längeren Zeitraum zu untersuchen. Bei diesem Versuchsdesign war immer Öl in der Wanne und die Textilstreifen haben durchgehend transportiert.

Bei den diskontinuierlichen Messungen ging es dagegen darum die Bedingungen nachzustellen, wenn Öl nur zeitweilig auf der Wasseroberfläche vorhanden ist und somit ein kurzzeitiger Transport mit zwischenzeitlichen Unterbrechungen stattfindet. Bei diesem Versuchsdesign war Öl immer nur bis zum Zeitpunkt des vollständigen Abtransports in der Wanne. Die Textilstreifen verblieben bis zu einem neuen Durchlauf im Wasser. Für den neuen Durchlauf wurde die Wanne wieder mit Öl gefüllt. Eine automatische Nachfüllung wurde für diese Versuche nicht angewendet (Tabelle 6).

Tabelle 5: Übersicht zu den durchgeführten, kontinuierlichen Versuchen.

Textilart	Abmaße	Öltyp	Dauer	Stichprobenanzahl
BOA-047	15 mm * 40 cm	Heizöl	15 Tage	4
BOA-003	15 mm * 40 cm	Heizöl	14 Tage	5
BOA-047	15 mm * 40 cm	Motoröl	15 Tage	4

Tabelle 6: Übersicht der durchgeführten, nicht kontinuierlichen Transportversuche.

Textiltyp	Abmaße	Öltyp	Dauer	Stichprobenanzahl	Wiederholungen
BOA-047	6 cm * 30 cm	Heizöl	24 h	4	14
BOA-003	6 cm * 30 cm	Heizöl	24 h	5	14
BOA-047	6 cm * 30 cm	Motoröl	24 h	4	14
BOA-047	6 cm * 30 cm	Heizöl	4 h	2	5
BOA-003	15 mm * 40 cm	Heizöl	24 h	5	5

2.4.6 Einfluss von Textil-Geometrien und Anordnung auf den Öltransport

Um das optimale Versuchsdesign hinsichtlich der späteren Anwendung zu finden, wurden verschiedene Geometrien und Anordnungen der technischen Textilien verglichen. Zur Bestimmung des Einflusses der Geometrie, wurden vier Streifen verschiedener Form und Breite getestet. Herangezogen wurden hierfür die Streifenvariante, die in den meisten anderen Versuchen verwendet wurde (15 mm), sowie ein Streifen mit der Hälfte der Breite (7,5 mm). Zum Vergleich wurde neben den rechteckigen Streifen weiterhin ein Streifen mit einem Trapez im oberen Bereich verwendet.

Gemessen wurde dabei ein Streifen, der ebenfalls 15 mm Breite im parallelen Teil maß und ein Streifen mit doppelter Breite (30 mm). Für den Versuch wurde das Funktionstextil BOA-047 ausgewählt, welches in den in Kapitel 2.4.5 beschriebenen Versuchen sehr gute Ergebnisse erzielte. Als Öl wurde Heizöl verwendet. Die Messungen wurden entsprechend der in Kapitel 2.4.5 beschriebenen diskontinuierlichen Versuche durchgeführt mit 6 Durchgängen über je sechs Stunden.

Weiterhin wurde untersucht, ob die Überhanglänge der Textilien einen Einfluss auf den Öltransport hat. Dafür wurden Streifen des Funktionstextils BOA-047 (Breite 15 mm) mit drei unterschiedlichen Längen: 29,5 cm, 37,5 cm, 45,5 cm verwendet. Der Versuchsaufbau entsprach wiederum dem in Abbildung 6 dargestellten. Das verwendete Öl war Heizöl. Die Textilstreifen wurden dabei so in das Öl hineingelegt, dass die Länge der Streifen in der Wanne identisch war. Die Überhanglänge unterschied sich dementsprechend um jeweils 8 cm. Zusätzlich wurde der Aufbau auch auf einen zweiten Steinblock gesetzt, um einen höheren Abstand zu den Auffanggefäßen zu erzielen. Die Versuche wurden dreimal über drei Stunden, einmal über vier Stunden und einmal über 90 Minuten gemessen.

2.4.7 Einfluss von Kontaminationen

In natürliche Gewässer werden aus der Umwelt organische Materialien, wie Pollen, eingetragen. Diese könnten einen Einfluss auf den Öltransport der Funktionstextilien haben. Um diesen abzuschätzen wurde Kontaminationsversuche durchgeführt. Für diese wurde eine Kunststoff-Behälter mit Wasser gefüllt und darauf ein Ölfilm von 2 mm Dicke aufgebracht. In einer Versuchsvariante wurde die Oberfläche mit 10 ml Pollen kontaminiert. In einer zweiten Versuchsvariante wurden die Pollen direkt auf den Streifen verteilt. Als Referenz wurde zeitgleich ein Versuch ohne Kontaminationen und mit ansonsten gleichem Aufbau durchgeführt. Gemessen wurden die technischen Textilien BOA-003 und BOA-047. Der Versuch mit den Pollen im Öl wurde viermal über einen Tag gemessen. Der Versuch mit den Pollen auf den Streifen wurde dreimal über einen Tag, einmal über zweieinhalb Stunden und einmal über eine Stunde gemessen.

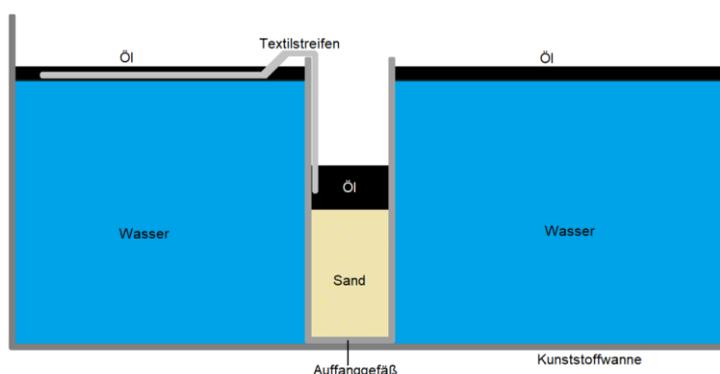


Abbildung 9:
Versuchsaufbau
Kontaminationsversuche.

Ein Textilstreifen transportiert einen limitierten Ölfilm aus einer mit Wasser gefüllten Kunststoffwanne in ein Auffanggefäß aus Glas. Dieses war mit Sand beschwert, um ein Umfallen zu verhindern

2.4.8 Untersuchung des Transportvorganges innerhalb des Textils

Mit Hilfe eines horizontalen und eines vertikalen Transportversuches an BOA-047 wurde der Transportvorgang innerhalb des Textils genauer untersucht. Ziel war es herauszufinden, ob das Öl primär in den Deckschichten oder im Polbereich transportiert wird. Dazu wurde ebenfalls eine Probe angefertigt, in der eine Deckschicht mitsamt der Polfäden abgetrennt wurde. Dafür wurden mit Hilfe einer Rasierklinge die Polfäden zwischen den Deckschichten durchtrennt. Pro Versuch wurden je 20 Probenstücke des jeweiligen unversehrten und aufgetrennten Abstandtextils verwendet. Die Probenstücke wurden in 10 mm breite und 60 mm lange Streifen geschnitten.

2.4.9 Freilandversuch mit BOA-Demonstrator

Zur Untersuchung der Textilien wurde ein Gerät gebaut, in das vier Streifen des BOA-Textils eingehängt wurden. Das Gerät besteht aus zwei Kunststoffschüsseln, die ineinander gestellt werden und durch Schaumstoff auf Abstand gehalten werden. Die äußere Schüssel weist seitliche Schlitze auf, in die die Textilien eingeführt werden. Die Schlitze dürfen nicht zu schmal sein, sodass die Textilien frei hängen können. Das Gerät wurde durch Gewichte und Sand beschwert und dadurch stabilisiert. Dabei wurden Bereiche für kleine Glassammelgefäße in welchen das Öl gesammelt wurde, ausgespart. Die Beschwerung wurde so gewählt, dass die seitlichen Zugänge für die technischen Textilien ca. 1,5 cm über der Wasseroberfläche lagen. Das Gerät wurde mit einem Deckel verschlossen, so dass kein Niederschlag eindringen konnte. Es wurde im Botanischen Garten Bonn im Melbweiher exponiert.

2.5 Konzeptionierung idealer Konstruktionsparameter mittels Simulation

Mit Hilfe der Simulation wurden die Wirkmechanismen des Öltransports im biologischen Vorbild untersucht und ein Modell einer idealisierten Oberfläche abgeleitet. Das Ziel hierbei war es den Raum der Strukturparameter für das zu entwickelnde Textil im Vorhinein einzuschränken und Erkenntnisse hinsichtlich der notwendigen physikalischen Eigenschaften und den benötigten geometrischen Randbedingungen im Textil zu gewinnen.

2.5.1 Numerische Strömungssimulation

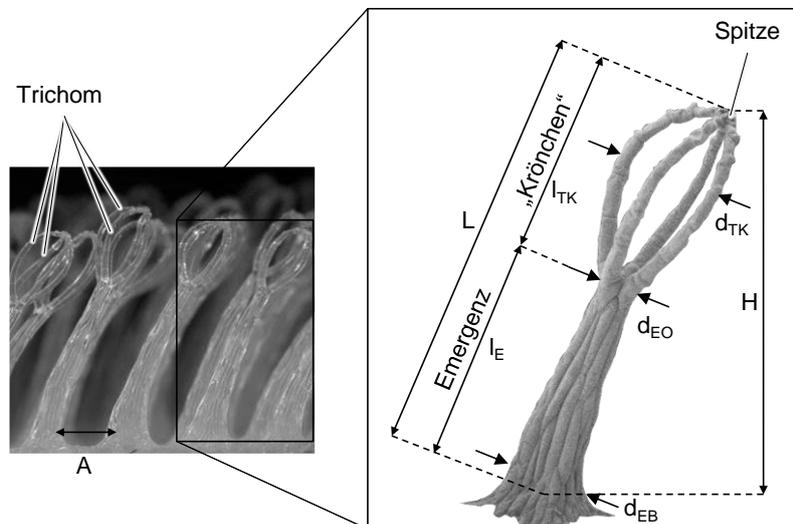
Komplexe Problemstellungen können numerisch mittels Simulationsprogrammen gelöst werden. Dabei wurde die vorliegende Problemstellung mit ihren relevanten Einflussgrößen in einem Simulationsmodell abstrahiert und ihre Größen mit angepassten Lösungsalgorithmen berechnet (Herwig & Schmandt, 2018; Lecheler, 2018; Rapp, 2017). Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wurde das Rechengebiet auf das Notwendigste reduziert. Bei sich wiederholenden Strömungsgeometrien können dafür repräsentative Ausschnitte verwendet werden sowie Symmetrieebenen ausgenutzt werden (Lecheler, 2018).

Da Simulationen immer eine Abstraktion der Realität bedeuten, muss die Genauigkeit der numerischen Ergebnisse sowie ihre Übertragbarkeit auf die reale Problemstellung anhand einer Validierung überprüft werden. Die Strömungsberechnung wurde in diesem Projekt mit ANSYS Fluent aus der ANSYS Workbench in der aktuellsten Version durchgeführt. ANSYS Fluent ist ein auf Finite-Volumen basierendes Programm zur Lösung von numerischen Strömungsproblemen, im Englischen auch Computational Fluid Dynamics (CFD) genannt (Ansys, 2020).

Für die Simulation zweier nicht mischbarer fluiden Phasen mit einer klar definierten Grenzfläche wurde das „Volume of Fluid“ (VoF) Modells in ANSYS Fluent eingesetzt. Mit dem VoF-Modell kann die zeitabhängige Position einer Grenzfläche im Strömungsfeld berechnen werden. Dafür wird für jede Zelle des Rechnetzes zu jedem Zeitpunkt der Volumenanteil (vf) der Phase bestimmt (Ansys, 2020).

2.5.2 Relevante Eigenschaften des biologischen Vorbilds

Als biologisches Vorbild für die Simulation wurde der Schwimmpflanz *Salvinia molesta* benutzt. Die Oberflächenstruktur von *S. molesta* ist charakterisiert durch dichte „schneebesensförmige“ Haare, die in Reihen wachsen (Barthlott, et al. 2010; Barthlott, et al., 2009).



Die Haare bestehen aus einer kegelförmigen Emergenz, auf der vier einsträngige Trichome wachsen (Abbildung 10). Diese sind an ihren vorletzten Zellen miteinander verbunden und bilden mit ihren abgestorbenen Endzellen eine Spitze. Bis auf diese Spitzen ist die gesamte Oberfläche der Schwimtblätter mit nanoskopisch großen, hydrophoben Wachskristallen überzogen (Barthlott et al., 2010, Barthlott et al., 2009).

Die Größe und die Dichte der *Salvinia molesta* Haare variiert über die gesamte Blattfläche (Barthlott et al., 2009). Die charakteristischen Strukturparameter für die Haare sind: Abstand (A) von $812,45 \pm 85,83^{*1} \mu\text{m}$, Höhe (H) von $2.629 \pm 285 \mu\text{m}$ und eine Länge (L) von $2.922 \pm 264 \mu\text{m}$. Für die Emergenz: Länge (I_E) $1.955 \pm 302 \mu\text{m}$, Durchmesser Basis (d_{EB}) $590 \pm 45 \mu\text{m}$, Durchmesser Oben (d_{EO}) $177 \pm 13 \mu\text{m}$. Für das Trichom: Durchmesser (d_T) $70,9 \pm 6,7 \mu\text{m}$, Länge Krönchen (I_K) $967 \pm 51 \mu\text{m}$, Durchmesser Krönchen (d_K) $613 \pm 73 \mu\text{m}$ (Mayser & Barthlott, 2014; Barthlott et al., 2020).

Die Querschnittsgeometrie der Emergenzbasis können als kreisförmige Struktur abstrahiert werden (Mayser & Barthlott, 2014). Die ca. 2 mm hohen kegelförmigen Emergenzen der Blattmitte besitzen einen Durchmesser von $590 \pm 45 \mu\text{m}$ (an der Basis), der sich mit zunehmender Höhe auf $177 \pm 13 \mu\text{m}$ verschmälert (Mayser & Barthlott, 2014). Die Emergenzen verkürzen sich zum Blattrand hin bis keine „Schneebesens“ Form mehr erkenntlich ist, sondern einsträngige Trichome (Barthlott et al., 2009; Gandyra, 2014). Ihre breiteste Stelle besitzen die Haare am „Krönchen“ mit einem Durchmesser von $613 \pm 73 \mu\text{m}$ (Mayser & Barthlott, 2014).

2.5.3 Modellbildung

Für die simulative Untersuchung der Ölabsorptionsfähigkeit wurden die oben beschriebenen Eigenschaften der komplexen Oberflächenstruktur des biologischen Vorbilds in einem vereinfachten Modell abstrahiert. Dabei wurde drauf geachtet, dass das Modell, die wesentlichen Einflussgrößen aufweist, jedoch vereinfacht genug ist, damit die Berechnungen in einem vertretbaren Rechenaufwand durchgeführt werden können. Anschließend wurde auf diesem Modell eine Parametervariation durchgeführt,

bei der die Einflüsse unterschiedlicher Material- und Strukturparameter auf den Öltransport untersucht wurden.

Für die Simulation wurde die Adsorption und der Transport von Öl auf dem lufthaltenden Schwimmblatt als eine Mehrphasenströmung von zwei nicht miteinander mischbaren Mikrofluiden betrachtet. Dabei wurde die Strömung als laminar inkompressibel und als Newtonsches Fluid angenommen.

Das zweidimensionale Rechengebiet für den Öltransport ist in Abbildung 11(rechts) dargestellt. Dieses ergibt sich aus einem Schnitt durch die Haarstrukturen parallel zur Blattoberfläche (Abbildung 11links), wobei die durchströmten Haartzwischenräume als freie Fläche vorliegen. Die Haarquerschnitte wurden als kreisförmige Festkörper abstrahiert, die für die Strömung undurchlässig sind.

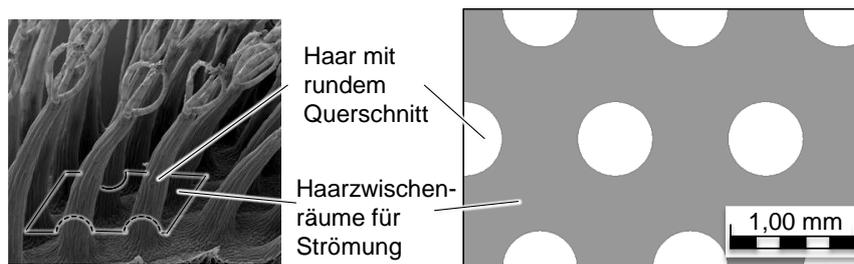


Abbildung 11: *S. molesta* Haare und abstrahierte Geometrie.

Aufnahme mit Schnittebene durch die *S. molesta* Haare nach (Barthlott, et al., 2016; links) und die abstrahierte 2D- Geometrie als Rechengebiet (rechts).

Die in Reihen wachsenden Haare von *S. molesta* besitzen regelmäßige Abstände zueinander. Vom Blattrand zur Blattmitte hin vergrößern sich die Abstände sowie die Haardurchmesser gleichmäßig. Aufgrund dieser Regelmäßigkeiten der *S. molesta* Oberflächenstruktur, war ein kleiner Ausschnitt für die Erzeugung des Rechengebietes genügend. Für die geometrische Anordnung der Kreise wurde ein hexagonales Muster gewählt, welches der geometrischen Anordnung der Haare ähnelt (Abbildung 12links). In dem betrachteten Rechengebiet wurden jeweils drei Reihen von Kreisen abgebildet, wobei die obere und untere Reihe durch den Mittelpunkt der Kreise halbiert wurden.

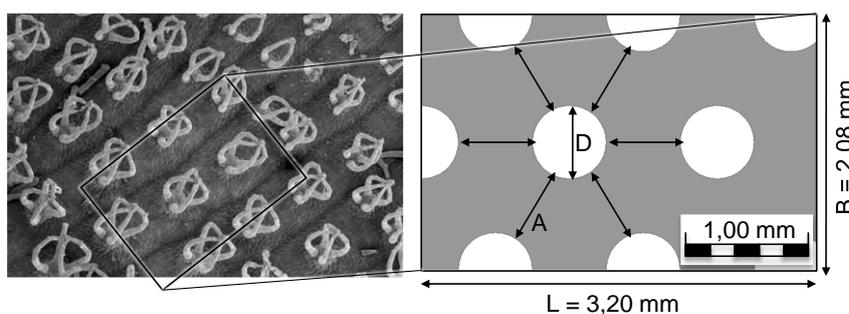


Abbildung 12: *S. molesta* Haare und Querschnittsanordnung.

Aufsicht der *S. molesta* Haare (Solga, 2007; links) und hexagonale Anordnung der abstrahierten Haarquerschnitte (Kreise) im Rechengebiet (rechts).

Für das Simulationsmodell wurde ein Ausschnitt aus der Blattmitte nahe der Blattoberfläche betrachtet. Für den Abstand und Durchmesser der Kreise wurde in dem Ausgangsmodell ein angenäherter Wert von 0,60 mm festgelegt. Abstand und Durchmesser wurden anschließend variiert. Die Länge (L) des Rechengebietes wurde auf 3,20 mm begrenzt, was für alle folgenden Variationen des Simulationsmodelles konstant blieb. Im Gegensatz dazu musste die Breite (B) des Rechengebietes in Abhängigkeit der variierten Durchmesser und Abstände verändert werden. In Abbildung 13 sind das Rechengebiet und die benutzten Randbedingungen abgebildet. Das Rechengebiet wurde links durch den Zuströmrand begrenzt und erstreckt sich bis zum rechten Abströmrand. Oben und unten wurden periodische Randbedingungen angenommen. Die Kreisränder wurden als Festkörper definiert.

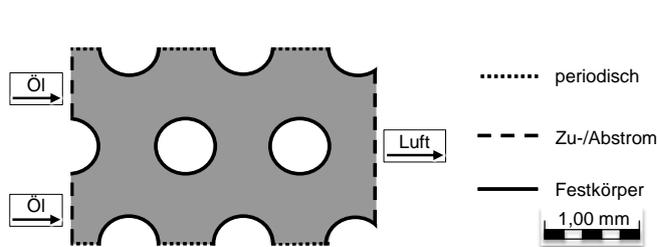


Abbildung 13: Randgebiete des Simulationsmodelles mit Strömungsrichtung.

Für die Vernetzung des Rechengebiets wurde der in ANSYS integrierte Standardvernetzer eingesetzt. Für eine bessere Auflösung der Strömung wurden die Standardeinstellungen geringfügig verändert. Die Seitenlänge der Zellen im durchströmten Gebiet wurde auf 0,02 mm festgelegt. Das Rechenetz wurde darüber hinaus an den Kreisrändern mit Hilfe von Prismenschichten verfeinert.

Prismenschichten sind Schichten von Zellen, die um ein Randgebiet gelegt werden und deren Höhe mit jeder neuen Schicht graduell zunimmt. Dabei kann die Anzahl der maximalen Schichten, die Höhe der ersten Schicht am Randgebiet sowie der Faktor, mit dem die Höhe der Schichten zunimmt, bestimmt werden. Für das Simulationsmodell wurde eine Schichthöhe von maximal zwei Schichten verwendet, wobei die Höhe der ersten Schicht 0,01 mm und die der zweiten 0,012 mm betrug. Das so erzeugte Rechenetz ist in Abbildung 14 dargestellt.

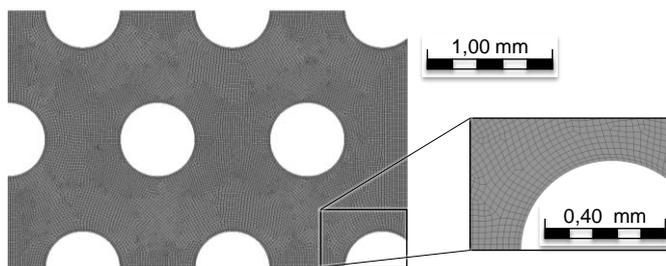


Abbildung 14: Rechenetz des Simulationsmodelles.

Rechenetz des Simulationsmodelles mit Nahaufnahme eines Festkörperendes, an dem das Netz verfeinert ist.

2.5.4 Simulationsdurchführung

Die Strömung wurde mit dem VoF-Modell abstrahiert. Dazu wurde zunächst die Anzahl der beteiligten fluiden Phasen (primäre Phase Luft und sekundäre Phase Öl) sowie deren Materialeigenschaften (Dichte, Viskosität) festgelegt. Für die Luftphase wurde das Standardmaterial „air“ aus der Materialdatenbank von ANSYS verwendet.

Das entwickelte VoF-Modell berücksichtigt Phaseninteraktionen und daraus resultierende Grenzflächenspannungen sowie Benetzungseigenschaften. Effekte wie Wärme-, Massenübertragung oder chemische Reaktionen wurden nicht betrachtet. Für die Grenzflächenspannungen zwischen Luft und den Ölen ($\gamma_{\text{Öl/Luft}}$) gibt Hollebone einen Wertebereich von 0,025 N/m bis 0,032 N/m an (Hollebone, 2007). Daher wurde für alle Berechnungen für $\gamma_{\text{Öl/Luft}}$ ein konstanter Wert von 0,03 N/m gewählt.

Die Benetzung der oleophilen Haare mit Öl wurde durch die Angabe eines Ölkontaktwinkels ($\theta_{\text{Öl}}$) an den stationären Festkörperändern der Kreise berücksichtigt. Der Ölkontaktwinkel wurde mittels einer Parametervariation untersucht. Der Zuströmrand bzw. der Abströmrand wurden als druckfreier Einlass bzw. Auslass definiert. Außerdem wurde am Zuströmrand der Volumenanteil von Öl mit 1 eingestellt. Des Weiteren wurden die oberen und unteren Ränder als periodisch angenommen. Periodische Ränder können genutzt werden, wenn das vorliegende Rechengebiet wiederholende geometrische Anordnungen aufweist und wenn für die daraus resultierende Strömung ebenso wiederholende Muster zu erwarten sind. (Ansys, 2020).

Die Bilanzgleichungen wurden für instationäre Strömungen mit dem pressure-based solver von ANSYS Fluent berechnet. Dieses Verfahren eignet sich für inkompressible Strömungen mit geringen Geschwindigkeiten (Ansys, 2020). Bei instationären Strömungen sind die zeitabhängigen Lösungen der Bilanzgleichungen von Interesse. Dafür wurden die Bilanzgleichungen räumlich und zeitlich diskretisiert. Für die zeitliche Diskretisierung bedeutet dies, dass die zeitabhängigen Terme der Differentialgleichungen für einen Zeitschritt integriert werden. Dabei sind die Zeitschritte derart zu wählen, dass zeitliche Änderungen ausreichend erfasst werden und gleichzeitig der Rechenaufwand minimal ist (Lecheler, 2018). Die Bilanzgleichungen werden für jeden Zeitschritt iterativ angenähert.

Das Simulationsmodell ist in Abbildung 15 mit allen relevanten Parametern zusammengefasst.

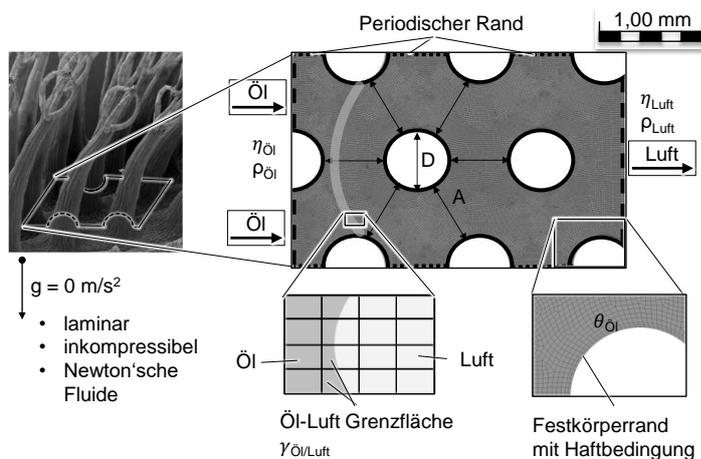


Abbildung 15: Zusammenfassung des Simulationsmodelles.

Zusammenfassung des Simulationsmodelles zur Untersuchung der ÖladSORPTIONSFähigkeit mit wichtigen Einflussgrößen und Berechnungsparametern.

2.5.5 Parametervariation und Zusammenfassung

Aus Untersuchungen an biologischen und technischen Oberflächen wurde deutlich, dass verschiedene Material- und Strukturparameter einen Einfluss auf die ÖladSORPTIONSFähigkeit haben (Barthlott et al., 2020; Zeiger et al., 2016). Aus diesen wurden folgende Parameter für die simulative Untersuchung des horizontalen Öltransportes abgeleitet und entsprechende Simulationsmodelle aufgebaut:

- Ölkontaktwinkel an den Festkörperändern der Kreise ($\theta_{öl}$)
- Viskosität des Öles ($\eta_{öl}$)
- Abstand der Kreise zueinander (A)
- Durchmesser der Kreise (D)

3 Ergebnisse

3.1 Die biologischen Vorbilder

3.1.1 Öl-Transport

Die Transportgeschwindigkeit lässt sich über die Ableitung der zurückgelegten Strecke nach der Zeit darstellen (Abbildung 16). Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die vertikale Transportgeschwindigkeit der Pflanzenoberflächen mit zunehmender Viskosität der Öle sinkt. So wurde das Heizöl von allen untersuchten Pflanzenoberflächen mit Abstand am schnellsten transportiert und das Motoröl am langsamsten. Generell war die Transportgeschwindigkeit am Anfang am schnellsten. Mit zunehmender Höhe nimmt die Transportgeschwindigkeit in allen Proben ab. Die erreichte Transporthöhe schwankt dabei in Abhängigkeit von der Ölart und Pflanzenoberfläche.

Von den untersuchten Pflanzenoberflächen adsorbieren und transportieren die Samenschoten von *Fibigia* sowie die Blätter von *Pistia* die meisten Ölarten am schnellsten. Im Fall von Heizöl und Bilgenwasser auch *Helianthemum*. *Salvinia* zeigt dagegen für die meisten Öltypen den langsamsten Transport. Die Transportgeschwindigkeit an den Oberflächen variiert über die Breite der Blätter teilweise stark, was vermutlich in den zum Randbereich hin abweichenden Strukturparametern begründet liegt.

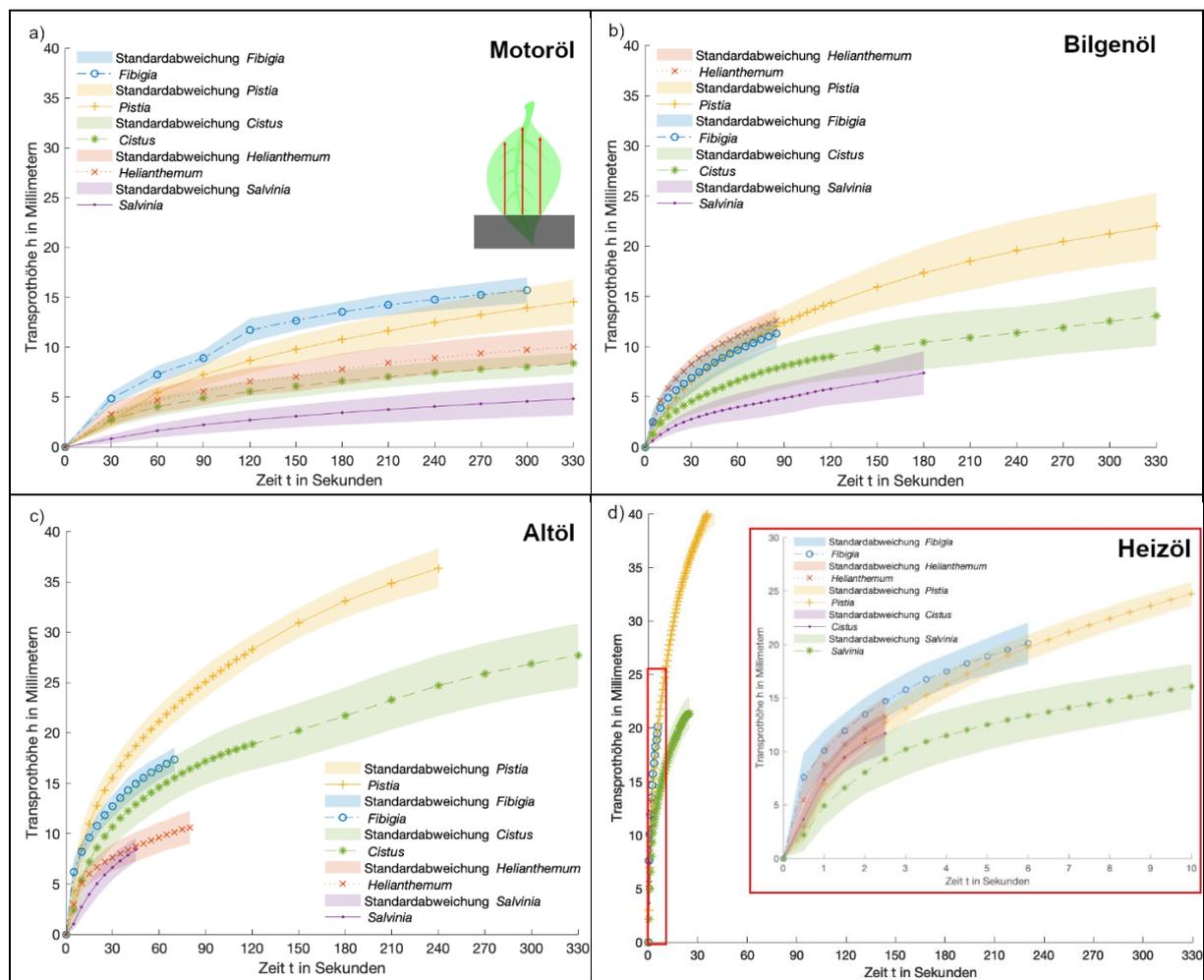


Abbildung 16: Vertikaler Öl-Transport an biologischen Oberflächen. Vertikaler Transport von Motoröl, Bilgenöl, Altöl und Heizöl durch *Salvinia*, *Pistia*, *Helianthemum*, *Cistus* und *Fibigia*. a) Motoröl, b) Bilgenöl, c) Altöl, d) Heizöl

Die Blätter von *Cistus* und *Pistia* sind deutlich länger als die der anderen Pflanzen, daher können über einen längeren Zeitraum andere Transporthöhen erreicht werden.

Tabelle 7 zeigt die maximal erreichten Transporthöhen für verschiedene Ölartern für *Pistia* und *Cistus*.

Tabelle 7: Maximal ermittelte vertikale Transporthöhe der verschiedenen Ölartern an den Blattoberflächen von *Cistus* und *Pistia*.

Öl	<i>Cistus</i>		<i>Pistia</i>	
	Transporthöhe [mm]	Zeit [s]	Transporthöhe [mm]	Zeit [s]
Motoröl	25,4 ± 2,5	1440,0	30,7 ± 2,1	1800,0
Bilgenöl	26,1 ± 2,4	1890,0	34,1 ± 6,1	1195,0
Altöl	32,6 ± 4,3	595,0	36,8 ± 2,0	250,0
Heizöl	40,8 ± 2,5	90,0	40,8 ± 1,8	40,5

3.1.2 ÖladSORPTIONSKAPAZITÄT

Die ÖladSORPTIONSKAPAZITÄT zeigt erhebliche Unterschiede zwischen den Arten (Abbildung 17). Die höchste Ölaufnahmekapazität zeigten über alle Ölartern hinweg, mit ca. 900 bis 1000 g/cm² die Blätter von *Salvinia*. Die geringste Ölaufnahmekapazität wurde für *Cistus* und *Helianthemum* mit 300 bis 650 g/cm² gemessen. *Fibigia* und *Pistia* lagen von einer Ausnahme abgesehen mit in der Regel 650 bis 800 g/cm² im oberen mittleren Bereich (Ausnahme *Pistia* bei Heizöl ca. 450 g/cm²). Für die meisten Pflanzenoberflächen war die Ölaufnahmekapazität für das dünnflüssige Heizöl deutlich geringer als für das viskose Motoröl.

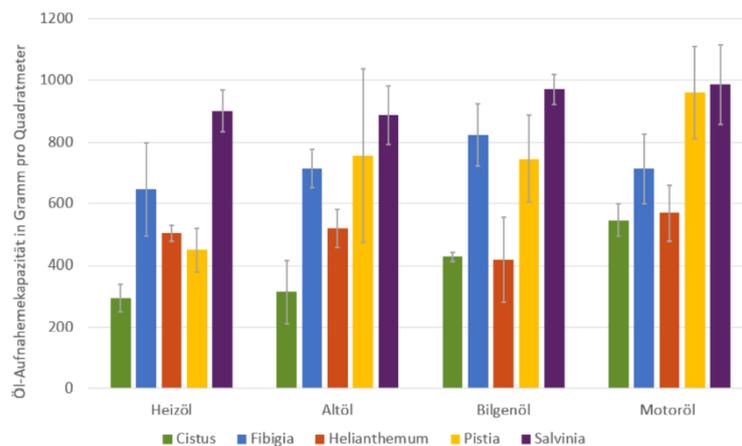


Abbildung 17: Ölaufnahmekapazität der biologischen Oberflächen.
Ölaufnahmekapazität von *Cistus*, *Fibigia*, *Helianthemum*, *Pistia* und *Salvinia* für Heiz-, Alt-, Bilgen- und Motoröl.

3.2 Technische Oberflächen - Screening

Insgesamt wurden 20 Textilien mit einer Punktzahl höher als 9 bewertet (siehe Anhang) und weiter hinsichtlich ÖladSORPTIONSKAPAZITÄT und Transporteigenschaften untersucht. Die drei vielversprechendsten Textilien wurden für weitere Versuche ausgewählt, um den Untersuchungsraum ausreichend zu verkleinern. Es handelt sich um zwei Abstandstextilien und ein Velours (Tabelle 8).

Tabelle 8: Bewertung der Vorversuche mit Proben, die für alle weiteren Untersuchungen ausgewählt wurden.

Probenr.	Textilart	V1	V2	V3	V4	Gesamt
BOA-003	Abstandstextil	2	2	2	6	12
BOA-047	Abstandstextil	2	2	2	6	12
BOA-054	Velours	2	2	1	4	9

3.2.1 ÖladSORPTIONSKAPAZITÄT

Die ÖladSORPTIONSKAPAZITÄT für Motoröl schwankt für die untersuchten Textilien mit Werten zwischen 0,5 g/cm² bis 1 g/cm² erheblich (Abbildung 18). Die höchsten Werte zeigt das Glasfasertextil BOA-002, welches sehr lange Polfäden aufweist. Die geringsten Werte zeigen dagegen 2-dimensionale Textilien und solche mit sehr kurzen Polfäden. Für die im Screening untersuchten Textilien besteht ein deutlicher Zusammenhang zur Faserlänge und der ÖladSORPTIONSKAPAZITÄT (Abbildung 19).

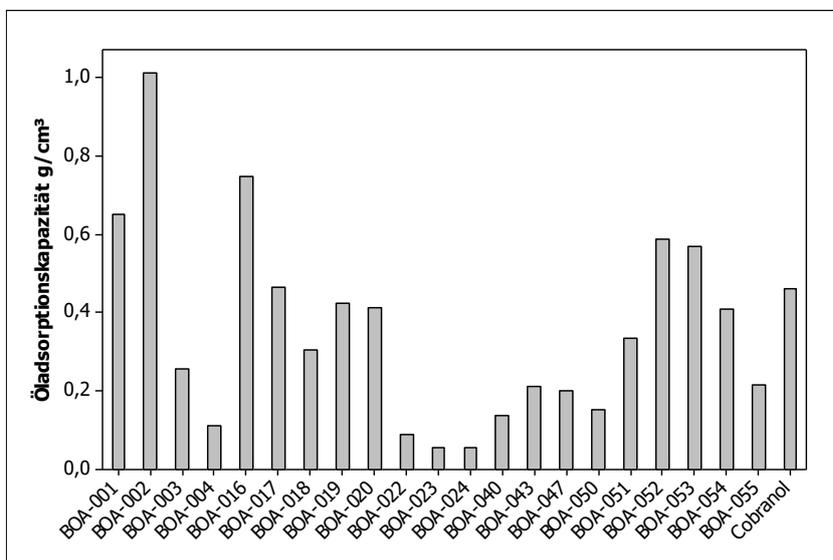


Abbildung 18:
ÖladSORPTIONSKAPAZITÄT
für Motoröl der im
Screening
berücksichtigten
Textilien.

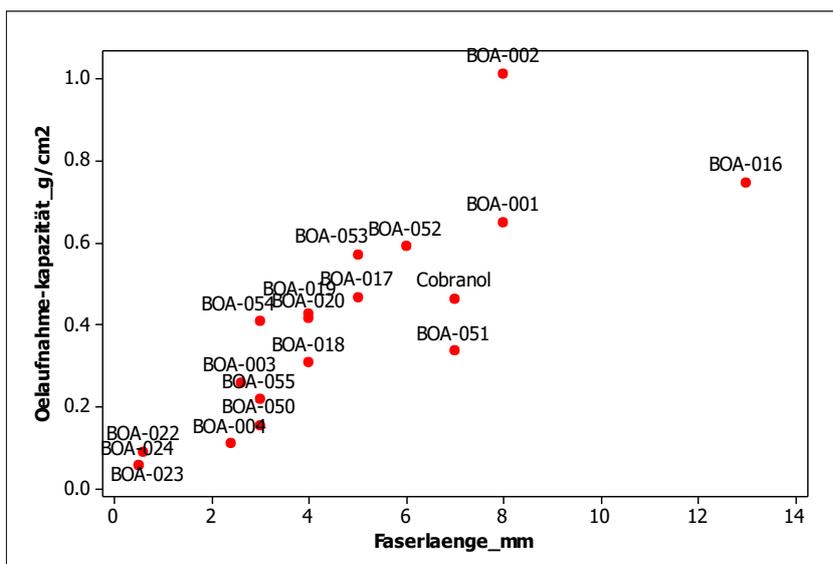


Abbildung 19:
Zusammenhang
zwischen der
Ölaufnahmekapazität
für Motoröl und der
Faserlänge.

3.2.2 Horizontaler Transport

Abbildung 20 zeigt die Transportgeschwindigkeit im horizontalen Transport wie in Kapitel 2.4.2 untersucht. Die höchsten Transportgeschwindigkeiten zeigen BOA-003 und BOA-047 mit 0,45 und 0,4 g/h. Bei beiden handelt es sich um Abstandstextilien (vgl. Anhang). Das Glasfasertextil BOA-002 und Veloure, wie z.B. BOA-054, zeigen nur mittlere Transportgeschwindigkeiten. Die geringsten Transportgeschwindigkeiten weisen dagegen BOA-001 (Glasfasertextil), BOA-040 (weitgehend 2-dimensionale Struktur) und Cobranol (Referenz) auf. Ein Zusammenhang zwischen geometrischen Parametern, wie Faserabstand und -durchmesser und Transportgeschwindigkeit wurde für die verschiedenartigen Textilien in der Gesamtschau nicht beobachtet.

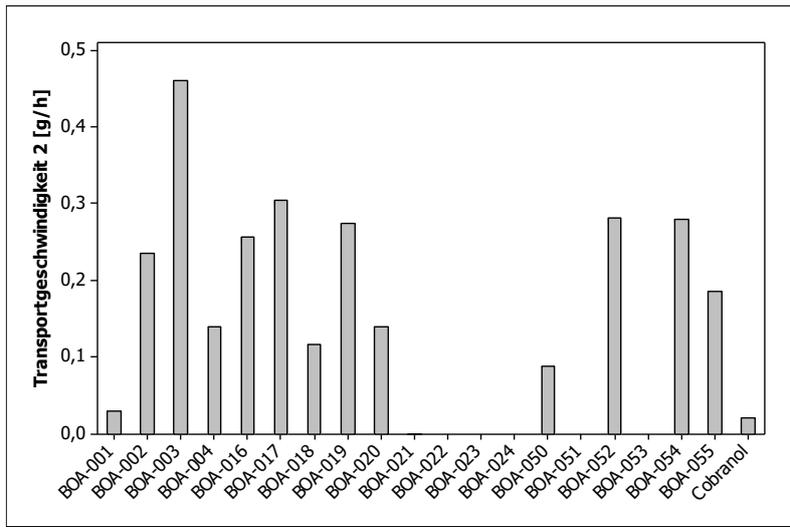


Abbildung 20: Horizontale Öl-Transportgeschwindigkeit.

Geschwindigkeit des horizontalen Transportes von Motoröl der im Rahmen des Screenings getesteten technischen Textilien.

3.2.3 Vertikaler Transport

In diesem Teilversuch des Screenings wurde der Transport in vertikale Richtung untersucht, wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben. Die höchste Transporthöhe wurde bei dem Abstandstextil BOA-047 mit ca. 70 mm gemessen. Mittlere Transporthöhen können bei Kletttextilien wie BOA-057 gezeigt werden. Tendenziell war eine Abhängigkeit der vertikalen Transportgeschwindigkeit vom Faserabstand zu erkennen. Der Faserdurchmesser und die Faserlänge scheinen keinen Einfluss darauf zu haben.

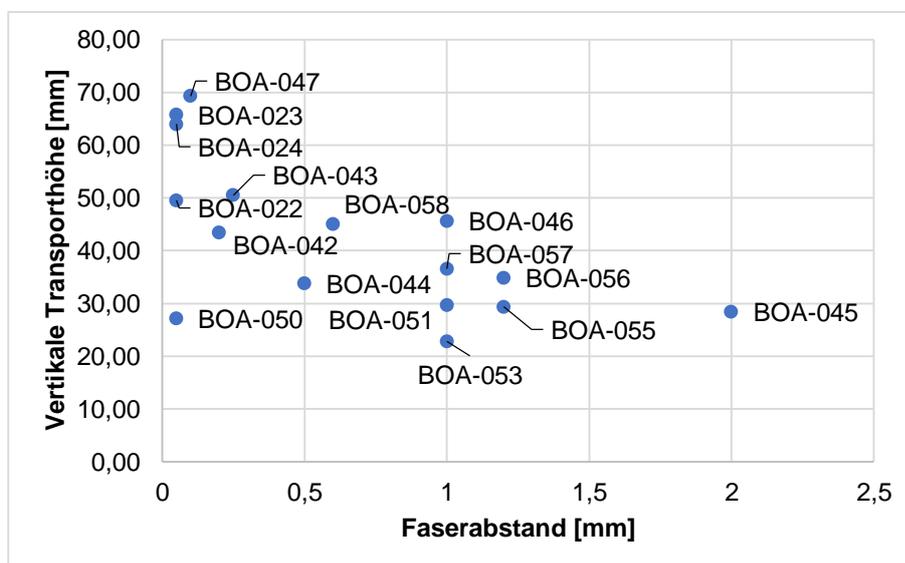


Abbildung 21: Transporthöhe Vertikaltransport.

Transporthöhe der im Rahmen des Screenings getesteten Funktionstextilien bei vertikalem Transport von Motoröl.

3.3 Technische Oberflächen - Simulation

Die Öltransportgeschwindigkeit von Altöl in Abhängigkeit von dem Ölkontaktwinkel ist in Abbildung 22 dargestellt. Das Intervall der Transportgeschwindigkeit für Altöl bei einem Durchmesser und Abstand der Kreise von 0,60 mm nach 1 s Fließzeit reicht von 2,68 mm/s bei einem Ölkontaktwinkel von 1° bis zu 0 mm/s bei einem Ölkontaktwinkel von 90°. Der Öltransport findet bei Kontaktwinkeln zwischen 1° und 35° statt. Die Öltransportgeschwindigkeit schwankt zwischen den Kontaktwinkeln von 1°, 20° (2,64 mm/s) und 25° (2,51 mm/s) geringfügig, nimmt jedoch ab 25° stark ab. Die Transportgeschwindigkeit bei 30° (2,00 mm/s) war ca. 20,32 % kleiner als bei 25° und ca. 58,50 % größer als bei 35° (0,83 mm/s). Ab einem Kontaktwinkel von 40° war für Altöl kein nennenswerter Transport mehr zu beobachten.

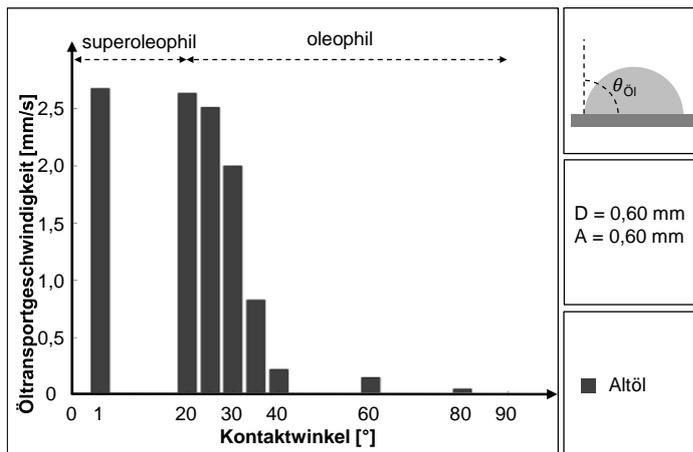


Abbildung 22: Transportgeschwindigkeit von Altöl in Abhängigkeit des Ölkontaktwinkels bei konstanten Strukturparametern.

Aus diesen Daten wurde der Zusammenhang zwischen der Öltransportgeschwindigkeit und dem Ölkontaktwinkel bei konstanter Festkörperstruktur deutlich. Der Öltransport ist schneller, je kleiner der Ölkontaktwinkel ist. Im superoleophilen Bereich ist der Einfluss des Ölkontaktwinkels gering. In Abbildung 23 ist die Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Viskosität bei 1° und 20° Ölkontaktwinkel dargestellt. Für alle untersuchten Öle findet auf der abstrahierten *Salvinia molesta* Oberfläche

sowohl bei 1° als auch bei 20° Ölkontaktwinkel der Öltransport statt. Die Öltransportgeschwindigkeiten unterscheiden sich in Abhängigkeit von dem Ölkontaktwinkel und von dem betrachteten Öl. Nachfolgend sind die Ergebnisse für einen Ölkontaktwinkel von 20° im Bericht aufgeführt. Die ebenfalls untersuchten sehr ähnlichen Ergebnisse für 1° befinden sich im Anhang

Die Transportgeschwindigkeit von Heizöl beträgt 51,06 mm/s bei 1° sowie 46,03 mm/s bei 20° Ölkontaktwinkel. Die Transportgeschwindigkeiten von Alt-, Bilgen-, Motoröl und „engine-oil“ liegen im Bereich von 3,09 mm/s (Altöl) bis 0,35 mm/s („engine-oil“) bei 1° sowie im Bereich von 2,58 mm/s (Altöl) bis 0,35 mm/s („engine-oil“) bei 20°. Somit ist die Transportgeschwindigkeit von Heizöl ca. 17 (Altöl) bis 145 („engine-oil“) Mal schneller bei 1° und ca. 18 (Altöl) bis 132 („engine-oil“) Mal schneller bei 20°.

In Abbildung 24 sind die Transportgeschwindigkeiten aller Öle in Abhängigkeit von den Abständen bei 20° Ölkontaktwinkel dargestellt. Zusätzlich werden die Ergebnisse ohne Heizöl gesondert in Abbildung 25 bei 20° Ölkontaktwinkel aufgezeigt.

Für Abstände zwischen 0,10 mm bis einschließlich 0,60 mm werden alle untersuchten Öle transportiert. Dies gilt sowohl bei 1° als auch bei 20° Ölkontaktwinkel. Für die Abstände 0,80 mm und 1,00 mm wird Heizöl bei beiden Ölkontaktwinkeln transportiert, für die restlichen Öle (Alt-, Bilgen-, Motoröl und „engine-oil“) kein nennenswerter Transport zu beobachten. Das bedeutet, dass in der simulierten Zeit die Bewegung der Öl-Luft Grenzfläche zu Beginn in der Geometrie stagniert, da die umliegenden Kreisränder nicht erreicht werden können. Obwohl kein Öltransport stattfindet, werden theoretische Öltransportgeschwindigkeiten größer als Null ermittelt, da die Fließkante über den betrachteten Zeitraum im Rechengelände verbleibt.

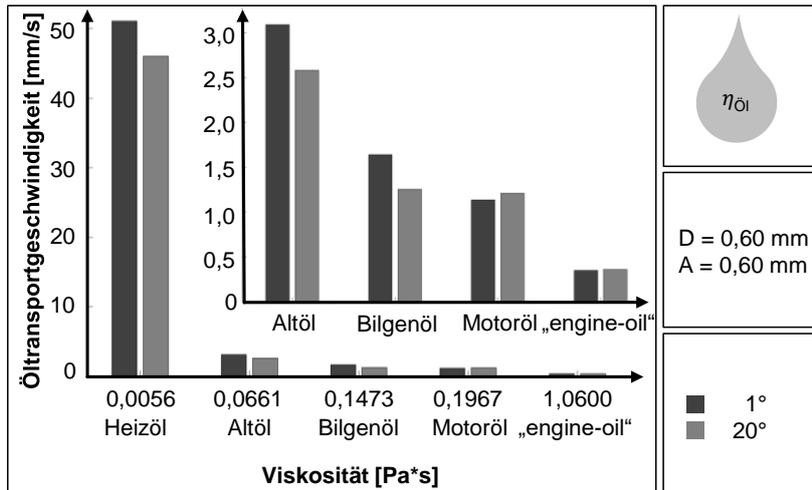


Abbildung 23:
Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Viskosität.

Bei 1° und 20°
 Ölkontaktwinkel sowie bei
 konstanten
 Strukturparametern.

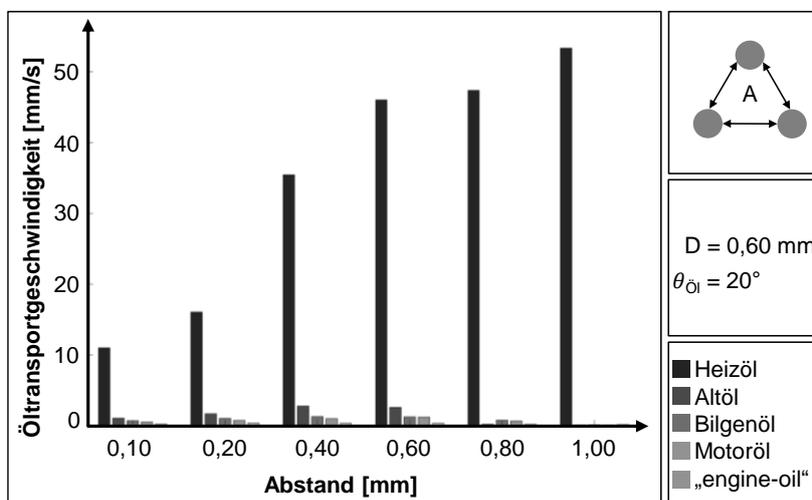


Abbildung 24:
Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand.

Bei 20° Ölkontaktwinkel sowie
 einem Durchmesser von
 0,60 mm. Darstellung für alle
 Öle.

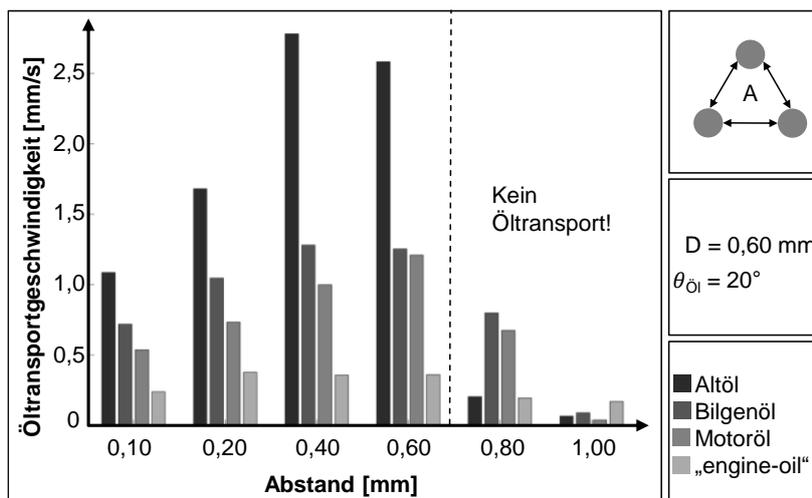


Abbildung 25:
Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit von dem Abstand.

Bei 20° Ölkontaktwinkel sowie
 einem Durchmesser von 0,60
 mm. Darstellung ohne Heizöl.

Für den untersuchten Bereich ($0,10 \text{ mm} \leq A \leq 1,00 \text{ mm}$ und $D = 0,60 \text{ mm}$) liegt der optimale Abstand für den Öltransport bei $0,40 \text{ mm}$ bis $0,60 \text{ mm}$ bzw. für Heizöl bei $0,60 \text{ mm}$ bis $1,00 \text{ mm}$. Unterhalb des optimalen Abstandes wird der Transport mit abnehmendem Abstand langsamer, findet jedoch statt. Oberhalb des optimalen

Abstandes findet kein nennenswerter Transport statt, wobei für Heizöl keine Aussage getroffen werden kann. Der optimale Abstand für Heizöl stimmt mit der oberen Grenze des simulierten Bereiches ($A = 1,00 \text{ mm}$) überein, könnte jedoch höher liegen.

Diese Beobachtungen lassen vermuten, dass für Viskositäten zwischen $0,0661 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ und $1,0600 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ das optimale Verhältnis zwischen Abstand und Durchmesser (A/D) bei ca. $0,67 \leq A/D \leq 1,00$ liegt. Es ist anzunehmen, dass der Öltransport für ca. $0,17 \leq A/D \leq 0,67$ mit abnehmendem Verhältnis langsamer wird und für ca. $A/D \geq 1,33$ nicht mehr stattfindet. Außerdem ist anzunehmen, dass bei kleineren Viskositäten das optimale Verhältnis bei höheren Werten liegen kann.

Zur verbesserten Darstellung dieser Beobachtungen werden die Öltransportgeschwindigkeiten bei 20° über A/D aufgetragen und mit einer quadratischen Funktion angenähert. Die Genauigkeit (R^2 Wert) der Ausgleichskurven liegt bei $0,7544$ (Altöl), $0,9967$ (Bilgenöl), $0,9595$ (Motoröl), $0,7324$ („engine-oil“). Aus den Ausgleichskurven ergeben sich die statistischen Optima für A/D zu ca. $0,73$ (Altöl), $0,77$ (Bilgenöl), $0,81$ (Motoröl), $0,71$ („engine-oil“). Das mittlere statistische Optimum von A/D für die Viskositäten zwischen $0,0661 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ und $1,0600 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ beträgt ca. $0,76$ und liegt damit in dem geschätzten Bereich von $0,67 \leq A/D \leq 1,00$.

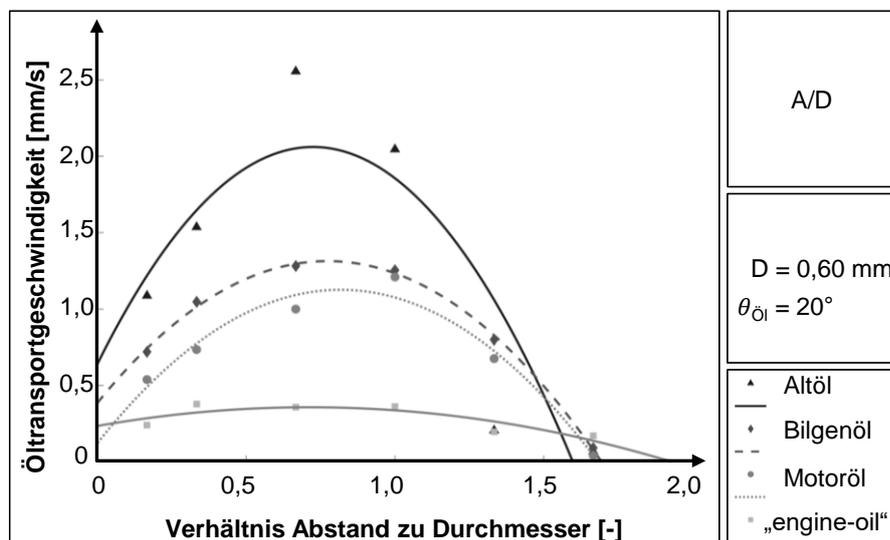


Abbildung 26: Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit von dem Verhältnis von Abstand zu Durchmesser (A/D).

Messpunkte und quadratische Ausgleichsfunktion der Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit von dem Verhältnis von Abstand zu Durchmesser (A/D). Darstellung ohne Heizöl.

Aus den simulativen Untersuchungen wurde deutlich, dass das verwendete Textil superoleophile Benetzungseigenschaften besitzt. Unter 20° ist der Einfluss des Ölkontaktwinkels als gering einzuschätzen. Bei Ölkontaktwinkeln über 20° wird der Öltransport stark eingeschränkt. Idealerweise sollte das gewählte Material für die Textilherstellung vollständig mit Öl benetzbar sein. Es konnte für Öle mit Viskositäten zwischen $0,0056 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ bis $1,0600 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ein Rückgang in der horizontalen Öltransportgeschwindigkeit mit steigender Viskosität beobachtet werden. Dies sollte je nach Anwendungsfall des textilen Öladsorbers berücksichtigt werden, da die Viskosität material- und temperaturabhängig ist.

Aus einem Bereich der Faserdurchmesser zwischen $0,10 \text{ mm}$ und $0,60 \text{ mm}$ eignen sich für den horizontalen Öltransport Durchmesser von $0,60 \text{ mm}$. Im untersuchten Bereich konnten alle Öle tendenziell bei größeren Faserdurchmessern schneller transportiert werden. Allerdings sollten die Faserdurchmesser nicht im Einzelnen, sondern im Zusammenspiel mit den Faserabständen betrachtet werden. Dafür wurde in der Arbeit das Verhältnis von Abstand zu Durchmesser (A/D) eingeführt.

Öle, deren Viskositäten zwischen $0,0661 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ und $1,0600 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ liegen, werden für $0,67 \leq A/D \leq 1,00$ horizontal schneller transportiert als für $A/D \leq 0,67$. Bei $A/D \geq 1,33$, $A/D \geq 1,71$ und $A/D \geq 1,33$ mit den Faserdurchmessern von $0,60 \text{ mm}$, $0,35 \text{ mm}$ und $0,10 \text{ mm}$ respektive findet bei diesen Viskositäten kein nennenswerter Öltransport statt. Öle mit Viskositäten die bei ca. $0,0056 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ liegen, können auch bei größeren Verhältnissen von Abstand zu Durchmesser transportiert werden. Für $0,35 \text{ mm}$ und $0,10 \text{ mm}$ Faserdurchmesser liegt das hier ermittelte Optimum bei $A/D = 1,00$. Bei einem Faserdurchmesser von $0,60 \text{ mm}$ beträgt das Optimum ca. $A/D = 1,64$.

Es ist zu beachten, dass die Anforderung an A/D für den vertikalen und horizontalen Öltransport wohlmöglich unterschiedlich ausfallen könnten. Während kleine Faserabstände essenziell sind für den vertikalen, kapillaren Transport entgegen der Schwerkraft, könnten ebendiese unvorteilhaft für den horizontalen Öltransport aufgrund von Reibungswiderständen an den Fasern sein. Außerdem wurde in der Simulation ein superhydrophobes Material vorausgesetzt, sodass nur Phaseninteraktion zwischen Festkörper, Luft und Öl betrachtet wurden. Wohlmöglich können die hier vorgeschlagenen Wertebereiche für Abstand und A/D dazu führen, dass eine Lufthaltung unter Wasser alleine durch die Faserstruktur nicht mehr möglich ist. Die Abstände könnten zu groß werden, als dass eine Benetzung im Cassie Zustand möglich ist. In dem Fall empfiehlt sich eine chemische Hydrophobierung der Fasern oder des Textils.

3.4 Performance ausgewählter technischer Textilien

3.4.1 Kontinuierliche und diskontinuierliche Langzeitversuche

Diese Versuche wurden mit den technischen Textilien BOA-003 und BOA-047 durchgeführt, die im Screening die besten Transporteigenschaften zeigten.

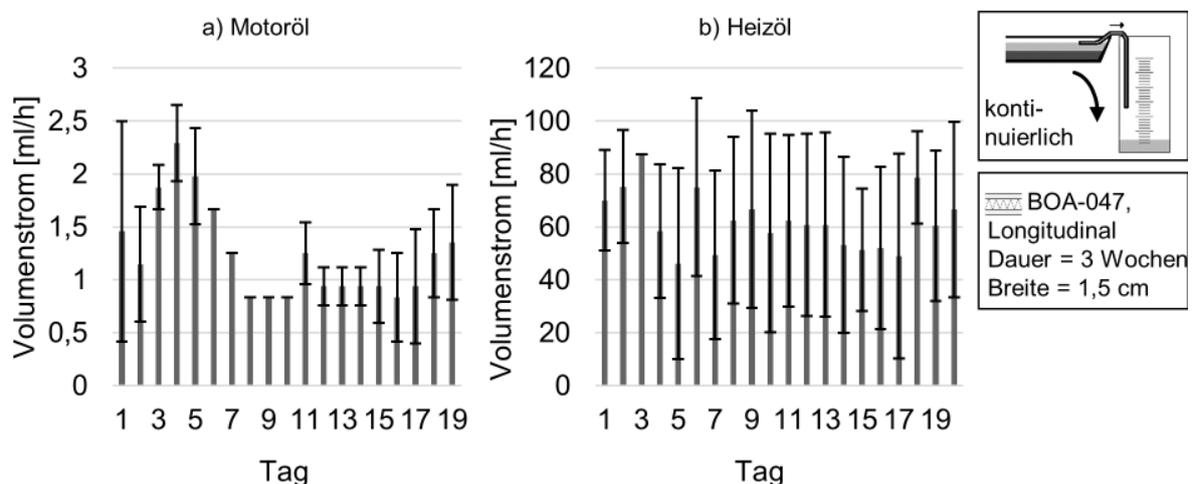


Abbildung 27: Vergleich des horizontalen Transport von Heiz- und Motoröl.

Horizontaler Transport von Heizöl (a) und Motoröl (b) durch das Funktionstextil BOA-047 (Streifenbreite 15 mm) im kontinuierlichen Versuch über 3 Wochen.

Im dargestellten Versuchsdesign transportiert BOA-047 bei 15 mm Streifenbreite Heizöl mit $62 \pm 32 \text{ ml/h}$ (Mittel \pm s.d.). Dabei war die Transportgeschwindigkeit zwar gewissen Schwankungen unterworfen, ein ab- oder zunehmender Trend war jedoch nicht feststellbar. Motoröl wurde dagegen wesentlich langsamer transportiert, hier beträgt die mittlere Transportgeschwindigkeit nur $1,24 \pm 0,56 \text{ ml/h}$ (Abbildung 27). An

einigen Proben wurde beobachtet, dass nicht nur Öl, sondern auch Wasser mittransportiert wurde. Dieses setzte sich als getrennte Phase in den Messzylindern ab. Teilweise wurde deutlich mehr Wasser als Öl transportiert. Der Wassertransport wurde nur bei einzelnen Textilien nach frühestens 14 Tagen Versuchsdauer beobachtet.

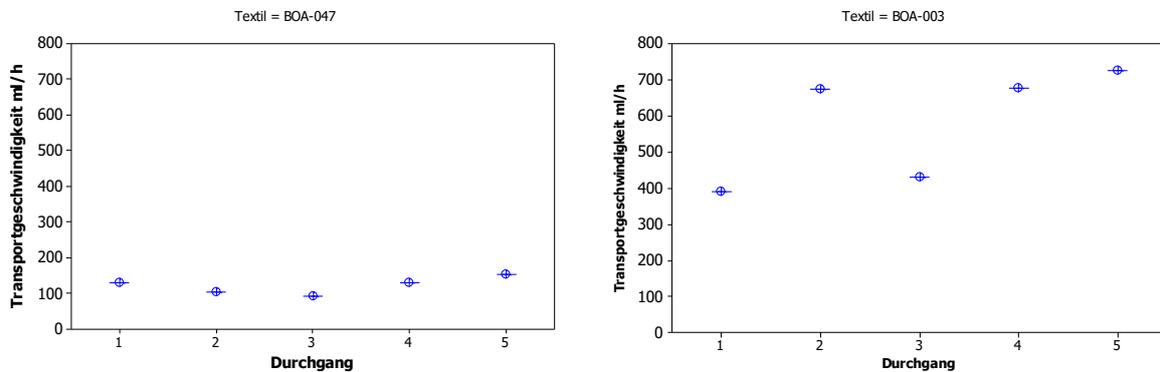


Abbildung 28: Horizontaler Transport von Heizöl durch BOA-047 und BOA-003.

Horizontaler Transport von Heizöl durch die technischen Textilien BOA-047 (links) und BOA-003 (rechts) im diskontinuierlichen Versuch über 9 Tage.

Der diskontinuierliche Transportversuch für Heizöl wurde mit 5 Durchgängen über 9 Tage verteilt durchgeführt. Für BOA-047 war die mittlere Transportgeschwindigkeit mit 122 ± 11 ml/h fast doppelt so hoch wie im kontinuierlichen Transportversuch. Für BOA-003 betrug die mittlere Transportgeschwindigkeit 580 ± 70 ml/h. Damit lag sie für BOA-003 mehr als 4-mal höher als für BOA-047. Die Schwankungen zwischen den einzelnen Durchgängen waren für BOA-003 allerdings erheblich (Abbildung 28). Sie könnten im Zusammenhang mit den zum jeweiligen Zeitpunkt gemessenen Temperaturen stehen.

Für Diesel wurde der diskontinuierliche Transportversuch für BOA-047 über 31 Durchgänge durchgeführt. Der höchste Volumenstrom ($362,5 \pm 80,15$ ml/h) wurde beim zweiten Durchgang und der niedrigste Volumenstrom ($180 \pm 31,89$ ml/h) im Durchgang 29 gemessen. Insgesamt war eine leicht sinkende Tendenz zu erkennen, die aber statistisch nicht signifikant ist (Abbildung 29). Bei einigen Proben wurde nach 14 Durchläufen der Transport von Wasser gleichzeitig zum Öltransport beobachtet.

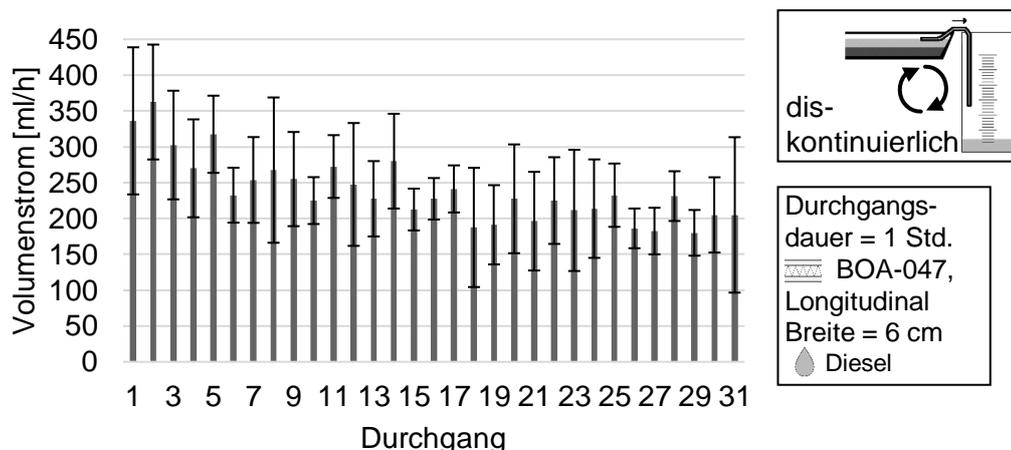


Abbildung 29: Horizontaler Transport von Diesel durch BOA-047.

Horizontaler Transport von Diesel durch das technische Textil BOA-047 im diskontinuierlichen Versuch über 31 Durchgänge.

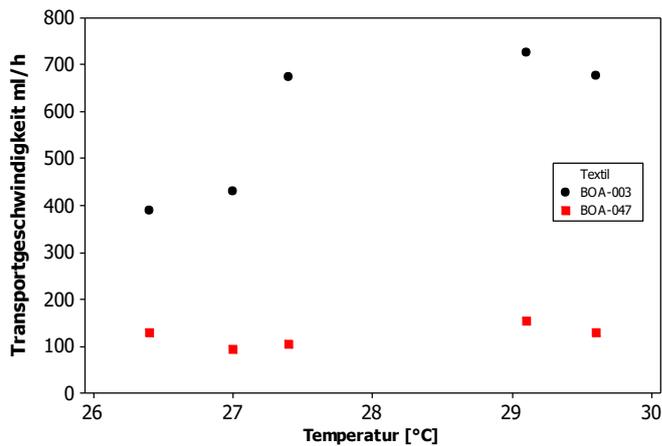


Abbildung 30: Zusammenhang zwischen Temperatur und Transportgeschwindigkeit im diskontinuierlichen Transportversuch mit Heizöl.

Kontinuierliche Langzeitversuche mit BOA-003 erwiesen sich aufgrund der extrem schnellen Transportgeschwindigkeit als nicht praktikabel. Dagegen wurde Motoröl von BOA-003 im beschriebenen Versuchsdesign nicht transportiert.

3.4.2 Einfluss der Ölart auf den Öltransport

Neben der Ausrichtung des Textils hat auch die Ölart einen großen Einfluss auf den Volumenstrom. Der höchste Volumenstrom wurde bei Diesel und Heizöl gemessen. Bei Altöl wurde ein Volumenstrom von $32,5 \pm 11,04$ ml/h beobachtet, während der Volumenstrom bei Bilgenöl mit $0,25 \pm 0,19$ ml/h am geringsten war. Bei den Messungen mit Bilgenöl war auch zu beobachten, dass sich eine Feststoffschicht im Behälter absetzt. Teilweise war diese Schicht auch auf den Textilien zu finden, ein Einfluss der Schicht auf die Textilien war jedoch nicht feststellbar. Die höchsten Volumenströme werden bei BOA-003 und Heizöl gemessen, die allerdings je nach Probe starken Schwankungen unterliegen. Insgesamt werden bei allen anderen Ölen mit BOA-047 die höheren Volumenströme gemessen. Zudem treten bei BOA-047 geringere Schwankungen zwischen den Proben auf (Abbildung 31).

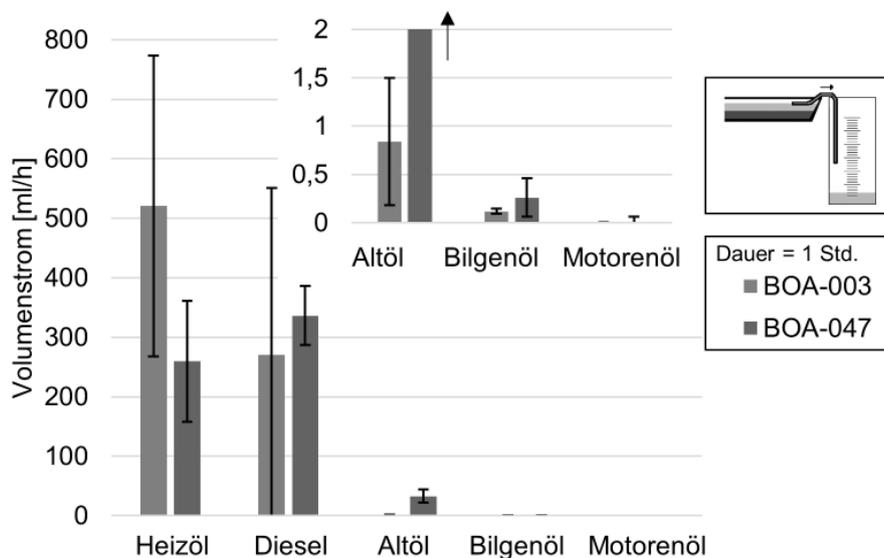


Abbildung 31: Volumenstrom in Abhängigkeit der untersuchten Ölarten.

3.4.3 Geometrien und Anordnung der technischen Textilien

Die Transportgeschwindigkeit korreliert annähernd mit der Streifenbreite (Abbildung 32, links). So beträgt die Transportgeschwindigkeit der 7,5 mm breiten Streifen $0,69 \pm 0,1$ ml/Minute und für die 15 mm breiten Streifen $1,19 \pm 0,05$ ml/Minute. Weiterhin transportiert das kleine Dreieck, welches ebenfalls eine Streifenbreite von 15 mm im unteren Bereich aufwies, mit $1,65 \pm 0,08$ ml/Minute deutlich mehr Öl als der Streifen ohne verbreiterten oberen Bereich. Das große Dreiecke, welches doppelt so breit war wie das kleinere, transportiert mit $3,15 \pm 0,22$ ml/min fast doppelt so viel Heizöl.

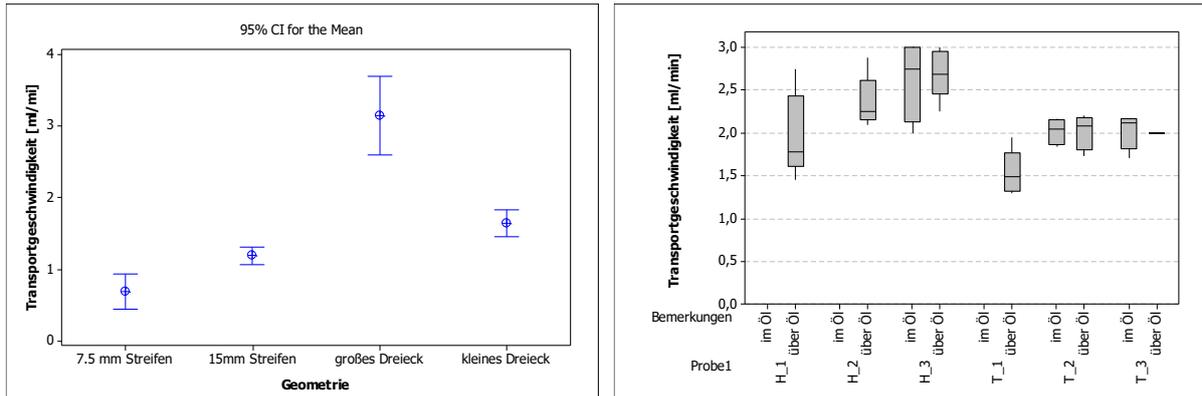


Abbildung 32: Transportgeschwindigkeit von Heizöl durch das Funktionstextil BOA-047 mit unterschiedlichen Geometrien (links) und Überhanglängen (rechts).

Abbildung 32 (rechts) stellt den Einfluss der Überhanglänge auf die Transportgeschwindigkeit dar. Die Textilien mit der geringsten Überhanglänge weisen den langsamsten Öltransport auf. Die Transportgeschwindigkeit nimmt dann mit zunehmender Überhanglänge zu. Ob die Streifen dabei ins Öl hineinragen hat dabei keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Öltransports. Tendenziell scheinen die höher gelagerten Proben schneller zu transportieren als die niedriger gelagerten.

Neben der äußeren Geometrie der Textilien wurde die Maschenausrichtung der Textilien zur Transportrichtung untersucht. Die Proben BOA-003 und BOA-047 sind anisotrop und es wurde eine Ausrichtung in Maschenrichtung und orthogonal zur Maschenrichtung unterschieden. Bei beiden Textilarten wurde das Öl schneller transportiert, wenn der Öltransport in Maschenrichtung erfolgt. Bei BOA-047 war es ein Unterschied von ca. 60,9 % und bei BOA-003 89,7 % (Abbildung 33).

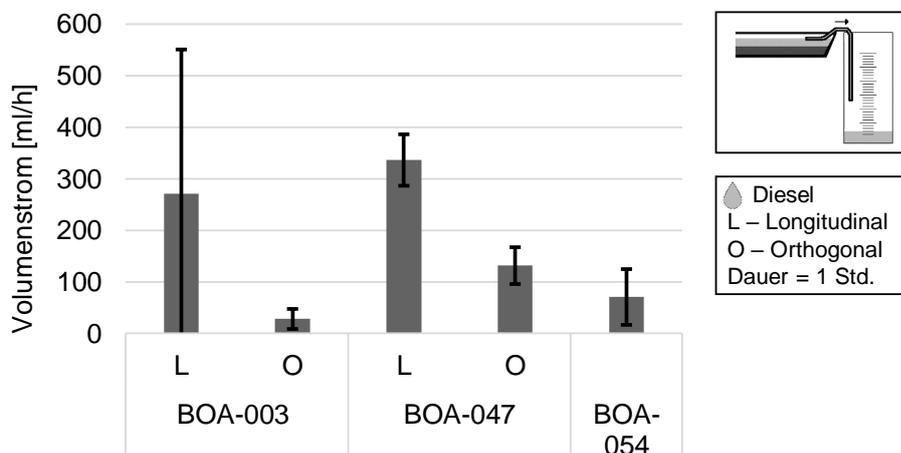


Abbildung 33: Gemessener Volumenstrom im Kurzzeitversuch.
Messdauer 1h, mit 4 Durchgängen.
Gemessen an BOA-003 und BOA-047 längs (L) und quer (O) zur Maschenrichtung mit Diesel.

3.4.4 Hydrophobierung der Textilien

Zur Beschichtung von Textilien stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. In einem Kurzzeitversuch mit jeweils einer Stunde Laufzeit wurde untersucht, welchen Einfluss die Beschichtung auf den Öltransport hat. Dazu wurden BOA-047 getränkt, besprüht und unbehandelt getestet (Vorgehen nach 2.1.3). Vor Durchführung der Versuche wurde in einem Nebenversuch eine unbehandelte Textilprobe in Wasser untergetaucht. Erst ab einer Wassertiefe von ca. 1 cm dringt Wasser in das Textil ein. Es zeigt eine hydrophobe Benetzungseigenschaft und es wurde ein Wasserkontaktwinkel von ca. 120° gemessen. Für den Transport war eine Beschichtung der technischen Textilien nicht notwendig, da der Transport für die unbeschichteten, besprühten und getränkten Textilien sehr ähnlich war. Weder in Längs- noch in Querrichtung war eine deutliche Tendenz erkennbar. Bei keiner Probe wurde Wasser transportiert.

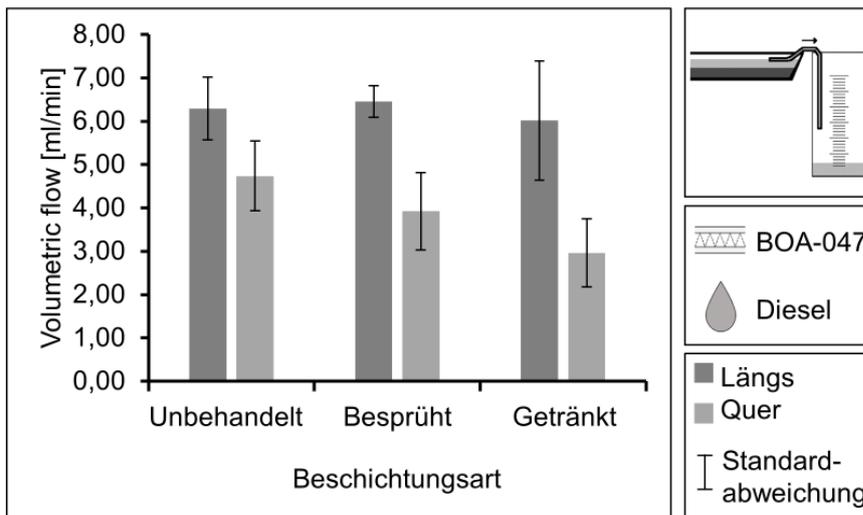


Abbildung 34:
Volumenstrom [ml/min] bei BOA-047 mit Diesel im unbeschichteten Zustand, mit Tegotop besprüht und getränkt.

3.4.5 Transportvorgang

Zunächst war das Öl in horizontaler sowie vertikaler Richtung nur in den Deckschichten zu erkennen. Im Polbereich war das Öl erst zeitversetzt zu erkennen. Dabei erschien es von der Seite betrachtet erst grau und dann vollständig schwarz. In vertikaler Richtung erschien das Öl innerhalb der ersten Minute auf derselben Höhe. Im zeitlichen Verlauf erhöhte sich der Unterschied zwischen den Steighöhen innerhalb der Deckschichten und des Polbereiches bis er nach 10 min ca. 36,8 % betrug. Im horizontalen Versuch betrug der Unterschied 24,8 %. Der Unterschied zwischen den originalen und aufgeschnittenen Proben betrug in vertikale Richtung 0,2 % und in horizontale Richtung 5,6 % (Abbildung 35).

Die meisten Transportvorgänge von Flüssigkeiten in Textilien basieren auf Kapillarkräften. Der Flüssigkeitenfluss durch ein poröses System wird als ein Netzwerk vieler Kapillare betrachtet und lässt sich mit der Lucas-Washburn-Gleichung beschreiben (Formel 1). Die Steighöhe lässt sich zudem als Funktion der Zeit beschreiben, indem man die Differentialgleichung löst (Formel 2). Die Schwerkraft kann dabei vernachlässigt werden, wenn der Transport horizontal verläuft, die Steighöhe h und der Radius r sehr klein ist.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\gamma_{LG} r \cos(\theta)}{4 \eta h} - \frac{r^2 \rho_L g}{8 \eta} \quad (1)$$

$$h(t) = \sqrt{\frac{r \gamma_{LG} \cos(\theta) t}{2 \eta}} \quad (2)$$

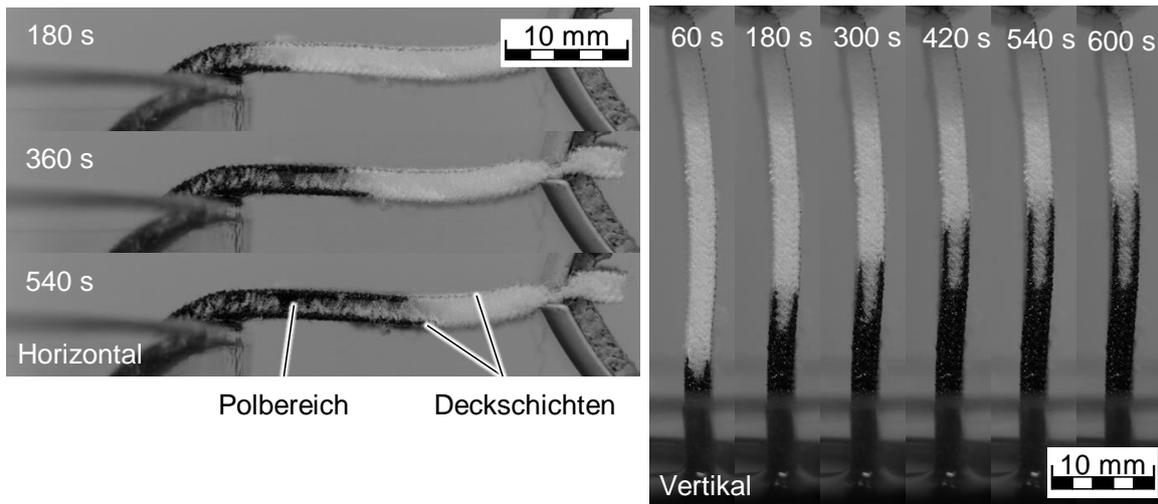


Abbildung 35: Altöltransport in BOA-047 in horizontaler und vertikaler Richtung.

Im Vergleich zu den nach Formel 2 erwarteten Steighöhe liegt die gemessene Geschwindigkeit in horizontaler Richtung zunächst unter der errechneten Geschwindigkeit. Nach ca. 400 s liegt die Geschwindigkeit in der Deckschicht über der Errechneten. Die Geschwindigkeit im Polbereich war immer geringer als erwartet. In vertikaler sowie horizontaler Richtung war der Unterschied zwischen der Geschwindigkeit in den Deckschichten und in dem aufgetrennten Textil gering. Die Geschwindigkeit im Polbereich liegt auch in vertikaler Richtung unter den errechneten Werten (Formel 2). Tendenziell erscheint der Geschwindigkeitsverlauf in horizontaler Richtung linear und in vertikaler Richtung eher logarithmisch mit einer Stagnation.

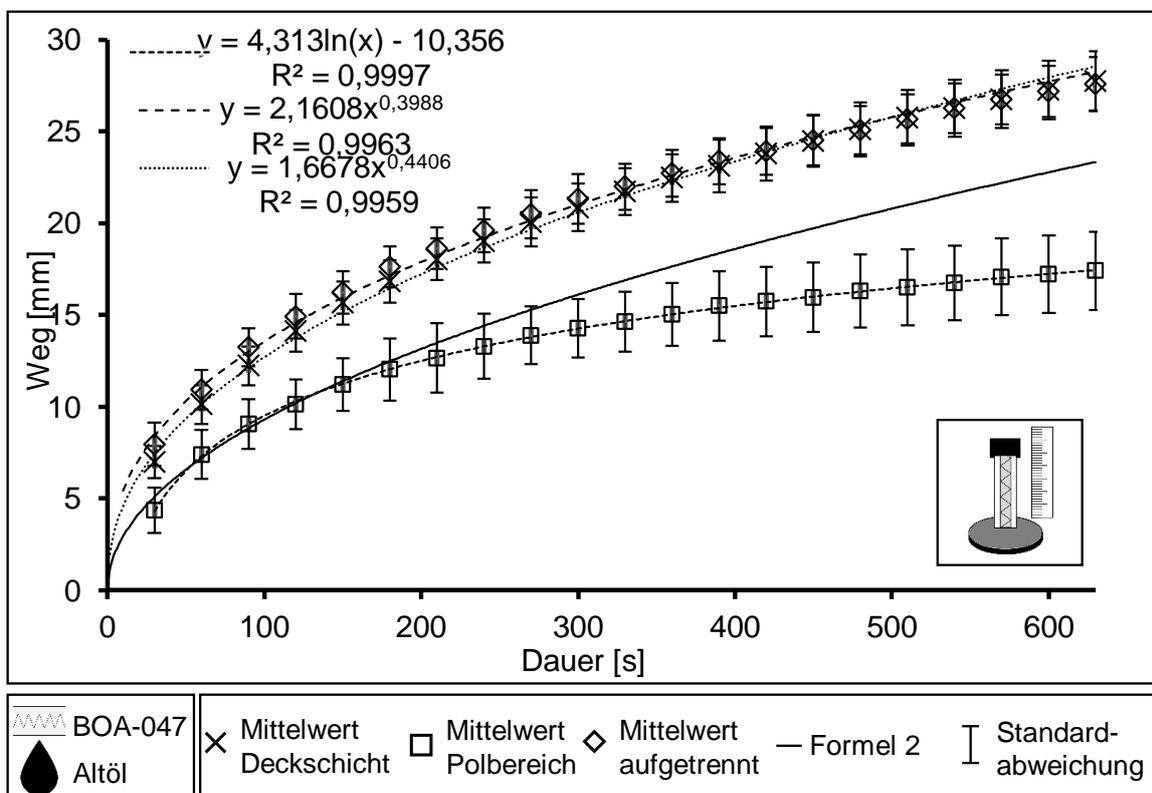


Abbildung 36: Öltransportwege im Querschnitt von BOA-047 in vertikaler Richtung.

3.5 Validierung der Simulationsergebnisse

3.5.1 3D-Abformungen

Ausgehend von den simulativen Ergebnissen wurden zur Validierung Geometrien erstellt. Diese bestehen aus einer Grundplatte von 15*30 mm² und hexagonal angeordneten Zylindern von 1 mm Höhe und Wertebereichen für Abstände und Durchmesser zwischen 0,4 mm und 1 mm. (Abbildung 37)

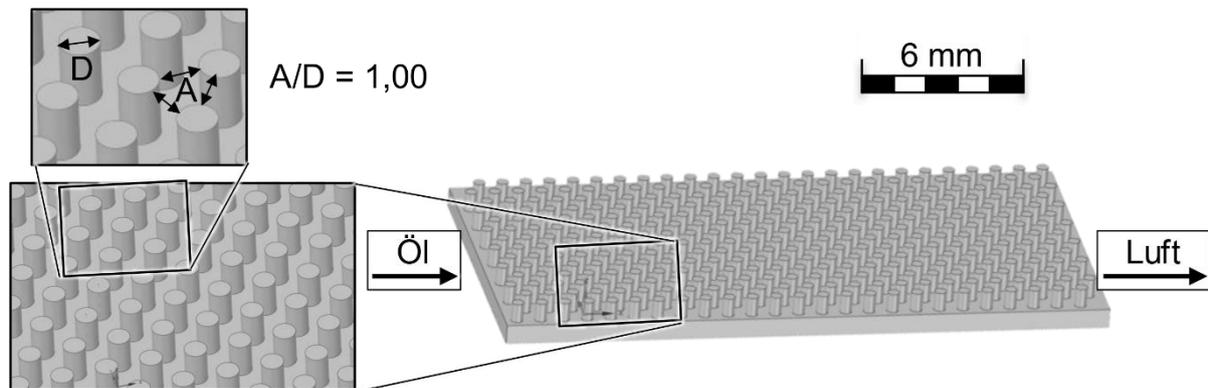


Abbildung 37: Geometrie eines 3D Drucks für ein Validierungsexperiment.

Die Versuchsobjekte wurden mittels SLA-Drucker aus Resin von der Heimbach GmbH gedruckt. Zusätzlich wurden mittels Abformung Silikonmuster der oben gezeigten Geometrien erstellt. Die verschiedenen Proben wurden verschiedenen Versuchen mit und ohne Hydrophobierung mittels Tegotop unterzogen. Die Ergebnisse liegen für Altöl alle im Bereich von $< 0,2$ mm/s (Abbildung 38).

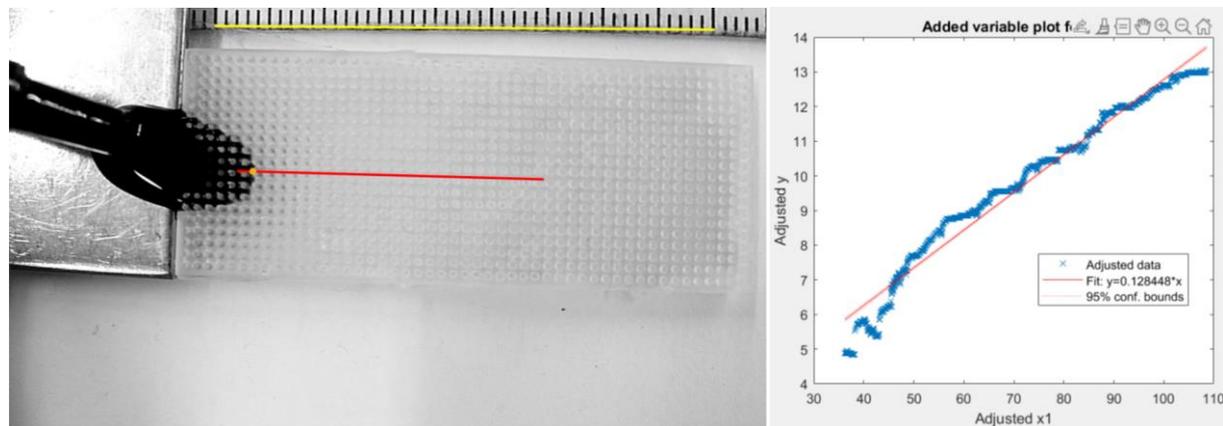


Abbildung 38: Horizontaler Öltransport von Altöl durch den 3D-Druck.

3.5.2 Ausgewählte Textilien

Die Ergebnisse der Simulation wurden an einem Textil mit Altöl validiert. Es wurde eines der Textilien verwendet, die in Vorversuchen am besten abgeschnitten hatten (BOA-003). Für die Validierung wurde ein Abstandsgewirk der Firma Müller Textil GmbH mit monofilen Polfäden mit einem Durchmesser von 60 µm und einem mittleren Abstand von 650 µm bei einer mittleren absoluten Abweichung von 400 µm verwendet. Das Abstandsgewebe hat eine gewebte Ober- und Unterschicht, die wesentlich dichter ist (Multifilament mit einem Durchmesser von 20 µm) als die Polfäden. Mit einer Kamera (Fujifilm X-T3) mit Makroobjektivring wurde der Adsorptionsprozess mit 60

Bildern pro Sekunde aus der Aufsicht aufgenommen. Hier befand sich Altöl in einer Petrischale und bei Kontakt mit dem horizontal angebrachten Textil wurde das schwarze Öl durch das helle Textil transportiert. Das Lineal neben dem Textil ermöglicht eine maßstabsgetreue Auswertung der Fließkantenposition über die Zeit mittels Matlab (Abbildung 39).

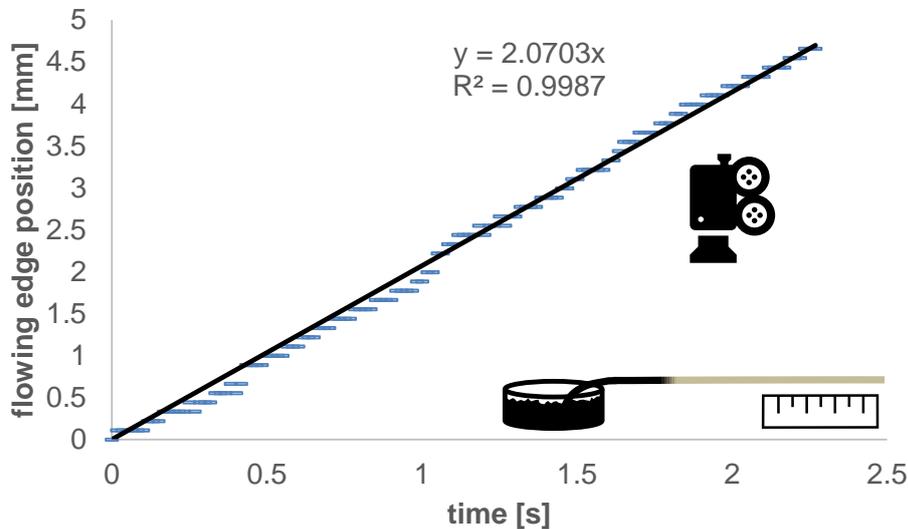


Abbildung 39:
Position der Ölfließkante über die Zeit bei der Adsorption mit linearem Trend.

Die Steigung von 2 mm/s passt gut zu dem in den Simulationen ermittelten Geschwindigkeitsbereich (siehe Abbildung 20). Allerdings gibt es im Textil eine sehr heterogene Verteilung der Abstände zwischen der Deckschicht und den Stehfäden auf der einen Seite, aber auch innerhalb der Stehfadenfilamente. So haben beispielsweise die lokalen Fadenverdichtungen einen durchschnittlichen Abstand von 35 µm. Daher ist ein direkter Vergleich mit den Simulationsparametern schwierig und es sollten weitere Tests zur Validierung, z.B. mit 3D-Drucken, durchgeführt werden.

4 Diskussion

4.1 Diskussion der Ergebnisse

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Funktionstextil identifiziert, das hervorragende Eigenschaften für die Öl-Wassertrennung aufwies. Ein Funktionstextil von 6 cm Streifenbreite konnte dabei bis zu einem halben Liter Öl in der Stunde von der Wasseroberfläche in einen Sammelbehälter transportieren.

Die Funktionstextilien BOA-047 und BOA-003, beides kommerziell erhältliche Abstandstextilien, wurden im Rahmen eines umfangreichen Screenings identifiziert. Sie transportierten Motoröl in horizontaler Richtung bis zu 22-mal schneller als die anderen Textilien des Screening-Versuches. Die Ausrichtung der Funktionstextilien hatte dabei einen erheblichen Einfluss. Bei Orientierung des Textils orthogonal zur Maschenrichtung wurde 61 % (BOA-047) bzw. 90 % (BOA-003) mehr Öl transportiert als in Querrichtung. Die Ursache liegt in der herstellungsbedingten Anisotropie der Abstandstextilien, die je nach Maschenrichtung zu unterschiedlichen Faserabständen und -winkeln führt. Auch im Textilquerschnitt erfolgte der Öltransport nicht gleichmäßig. Vielmehr transportierten zunächst die Deckflächen das Öl, anschließend füllte sich auch der dazwischenliegende Bereich des Textils. Auch das könnte durch die geringeren Faserabstände bedingt sein, die zu erhöhten Kapillarkräften führen dürften.

Einen erheblichen Einfluss auf den Öltransport hatte auch die Art des zu transportierenden Öls. Prinzipiell wurden Öle mit geringer Viskosität (< 10 cP) wie Diesel oder Heizöl deutlich schneller transportiert als Öle mit hoher Viskosität (> 100 cP), wie Altöl, Bilgenöl oder Motoröl. Dabei war ein direkter Zusammenhang zwischen Viskosität und Transportgeschwindigkeit zu beobachten. So transportierte das Funktionstextil BOA-047 Heizöl (Viskosität 5,6 cP) um den Faktor 50 schneller als Motoröl (Viskosität 196,7 cP). Da die Temperatur einen deutlichen Einfluss auf die Viskosität von Flüssigkeiten hatte, war bei höheren Temperaturen ein Anstieg der Transportgeschwindigkeit zu erwarten. Im Vergleich der beiden Funktionstextilien transportierte BOA-047 alle untersuchten Ölartern mit Ausnahme von Heizöl schneller als BOA-003. Heizöl wurde dagegen von BOA-003 (520 ml/h) etwa doppelt so schnell transportiert wie durch BOA-047 (260 ml/h). Die Streuung von BOA-003 war jedoch für Heizöl mit 253 ml/h und für Diesel mit 280 ml/h im Vergleich zu BOA-047 sehr hoch. Hinsichtlich des Einsatzes im BOA erscheint das Funktionstextil BOA-047 für den Einsatz in Industrie und Umweltschutz am besten geeignet, da es universell für alle Öltypen eingesetzt werden kann und die Transportgeschwindigkeit kontinuierlich ist. Sollte in speziellen Fällen die Trennung von Wasser und Heizöl das Problem sein, sollte jedoch der Einsatz von BOA-003 in Erwägung gezogen werden.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Funktionstextilien sowohl für den kontinuierlichen als auch im diskontinuierlichen Einsatz geeignet sind. Dementsprechend sind keine Probleme zu erwarten, wenn Öl nur gelegentlich auf der Wasseroberfläche vorhanden ist. Dies ermöglicht somit auch den präventiven Einsatz auf Gewässern, die nur durch gelegentlichen temporären Öleintrag gefährdet sind. Das ist bspw. in Hafengebieten der Fall. Bei einem diskontinuierlichen Einsatz der Funktionstextilien ist jedoch besonders auf eine dauerhafte Hydrophobierung zu achten. Die Versuche zeigen zwar, dass auch nicht hydrophobierte Textilien reines Öl gut transportieren können, jedoch wurde beobachtet, dass an nicht hydrophobierten Proben nach dem Abtransport des Öls Wasser transportiert wurde. Letzteres würde zur Vermischung von Wasser und Öl im Sammelbehälter führen. Für den Anwendungsfall positiv ist, dass auch bei Anwesenheit von Kontaminationen wie Pollen nicht weniger Öl transportiert wurde. Zudem scheint es sich nicht negativ auszuwirken, wenn sich feste Bestandteile z.B. bei Bilgenöl am Textil absetzen, solange das Textil weiterhin mit Öl benetzt ist.

Der Versuchsaufbau zum horizontalen Transport entsprach weitestgehend der geplanten Anwendung im BOA. Zusätzlich wurden Versuche zum vertikalen Transport von Motoröl durchgeführt. Diese zeigten maximale Transporthöhen für die Textilien des Screenings zwischen 20 und 70 mm. Die höchste Transporthöhe erreichte dabei das Funktionstextil BOA-047, also das Funktionstextil, das auch beim horizontalen Transport die höchste Transportgeschwindigkeit erreichte. Ein direkter Vergleich der Transportgeschwindigkeit der Funktionstextilien mit den wesentlich kleineren biologischen Vorbildern ist schwierig, da letztere nicht die gleichen Probengrößen erreichen und damit nicht den gleichen Versuchsaufbau zum Horizontaltransport erlauben. Die Ergebnisse zum vertikalen Transport erlauben ebenfalls aufgrund der unterschiedlichen Probendimensionen nur einen sehr groben Vergleich. Die Transporthöhe beim vertikalen Transport von Motoröl erreichte in den biologischen Proben maximal 31 mm (*Pistia*) und lag somit deutlich unter dem Wert von 70 mm, welche das Funktionstextil BOA-047 erreichte. Dies legt auf den ersten Blick nahe, dass BOA-047 das Öl deutlich besser transportiert als die untersuchten biologischen Vorbilder. Allerdings weisen viele der Proben, wie zum Beispiel *Pistia* und *Cistus* geringere Längen auf, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beeinträchtigt. Ein weiterer Parameter ist die Ölhaltekapazität. Diese lag bei den biologischen Proben zwischen etwa 300 und 1000 g/m², das entspricht 0,03 und 0,1 g/cm². Über die betrachteten Funktionstextilien schwankte

die Ölhaltekapazität dagegen zwischen $< 0,1$ und 1 g/cm^2 , wobei sie $0,25 \text{ g/cm}^2$ für BOA-003 und $0,2 \text{ g/cm}^2$ für BOA-047 betrug. Die technischen Oberflächen zeigten jedoch deutlich, dass kein Zusammenhang zwischen der Ölhaltekapazität und der Öltransportgeschwindigkeit besteht. So zeigte beispielsweise das Glasfasertextil BOA-002, welches mit 1 g/cm^2 die höchste Ölhaltekapazität aufwies, nur eine vergleichsweise geringe Transportgeschwindigkeit. Folglich erwies sich der Parameter „Ölhaltekapazität“ als Auswahlkriterium für die BOA-Funktionstextilien als wenig geeignet.

4.1.1 Diskussion Simulationsergebnisse

Aus den Ergebnissen der Simulation lässt sich ableiten, dass der Öltransport bei Kontaktwinkeln zwischen 1° und 35° stattfindet. Der Öltransport ist schneller, je kleiner der Ölkontaktwinkel ist. Im (super-) oleophilen Bereich ist der Einfluss des Ölkontaktwinkels gering (Abbildung 22). Diese Ergebnisse passen gut zu den Beobachtungen bei den biologischen Vorbildern. Dieser Zusammenhang lässt sich mit der Kapillarität erklären. Die Faserzwischenräume entsprechen Kapillaren, durch die das Öl aufgrund der Benetzung der Oberfläche transportiert wurde. Die treibende Kraft für den Öltransport ist hierbei der Krümmungsdruck an der Öl-Luft Grenzfläche. Der Krümmungsdruck ist abhängig von dem Flüssigkeitskontaktwinkel in der Kapillare und wird maximal bei einer vollständigen Benetzung der Kapillarwände, d.h. einem Kontaktwinkel von Null (Hale et. al., 2014; Kissa, 1996).

Die Öltransportgeschwindigkeit sinkt mit zunehmender Viskosität (Abbildung 23). Dieses Verhalten lässt sich mit dem Newton'schen Reibungsgesetz erklären. Das Gesetz gilt für die laminare Strömung Newton'scher Fluide. Nach diesem wird zum Bewegen von Fluiden mit höheren Viskositäten eine höhere Kraft benötigt als bei Fluiden mit niedrigeren Viskositäten. Dies ist auf die innere Reibung des Fluids zurückzuführen, die entgegen der bewegenden Kraft wirkt. Die innere Reibung ist größer bei höheren Viskositäten (Rapp, 2017).

Bei kleineren Abständen steigt zwar der Krümmungsdruck, die Transportgeschwindigkeit nimmt aber wegen Reibungswiderständen ab (Abbildung 25). Bei größeren Abständen nimmt der Krümmungsdruck für einen kapillaren Öltransport ab. Im Extremfall kann das Öl die nächstliegenden Haare nicht benetzen. Der Maximalabstand, ab dem kein Öltransport mehr stattfindet, scheint dabei von der Viskosität abhängig zu sein. Des Weiteren zeigt die simulative Untersuchung, dass für einen optimalen Abstand allgemein bei größeren Durchmessern das Öl schneller transportiert wird. Zwar besitzen die Kreise mit größeren Durchmessern einen größeren Festkörperumfang, an dem Reibung auftreten kann, allerdings werden in den Simulationsvarianten mit kleineren Kreisen insgesamt mehr Kreise und damit mehr Festkörperumfänge abgebildet. Infolgedessen wirken mehr Reibungskräfte in den Simulationsvarianten mit kleineren Kreisen, was zu einem langsameren Öltransport führt.

4.2 Diskussion der Methoden

Mit Hilfe des Screenings von 54 Textilien konnten das Spektrum abgesteckt und die vielversprechendsten Funktionstextilien identifiziert werden. Die ausgewählten Funktionstextilien wurden dann unter anwendungsrelevanten Bedingungen auf ihre relevanten Eigenschaften hin untersucht. Bei diesen Versuchen galt es verschiedene methodische Probleme zu überwinden. So zeigte sich beispielsweise bei den horizontalen Transportversuchen, dass eine Änderung des Flüssigkeitsspiegels in Verbindung mit dem Abtransport des Öls zu veränderten Versuchsbedingungen führte. Die von dem Öl zu überwindende Höhe sollte daher möglichst konstant gehalten werden. Dies wurde nach diversen Vorversuchen letztlich durch eine automatische

Ölnachfüllung mit einem zusätzlichen Behälter erreicht. Ein anderes Problem war die Gewährleistung von gleichen Versuchsbedingungen beim Einsatz unterschiedlicher Ölarten. So wurde Heizöl sehr viel schneller transportiert als das deutlich viskosere Motoröl. Letztlich wurden Heizöl und Diesel so schnell transportiert, dass es eine versuchsmäßige Betreuung alle 4-5 Stunden erforderlich gemacht hätte, was letztlich einen Langzeitversuch personell nahezu unmöglich machte. Dem Problem konnte letztlich durch Reduzierung der Streifenbreite, größere Vorratsbehälter und flexible Zeitplanung begegnet werden. Durch den Versuchsaufbau herrschen am Textil für den Transport unterschiedliche Kräfte vor (Abbildung 40). Wenn der Versuchsaufbau angepasst wird, ist dies in Betracht zu ziehen.

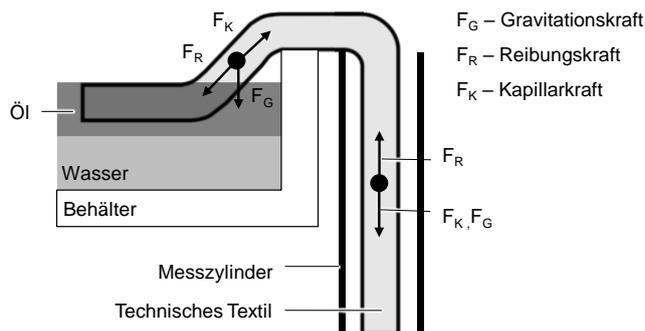


Abbildung 40: Schematische Übersicht über die beim Öltransport vorherrschenden Kräfte.

Bei der simulativen Untersuchung des biologischen Vorbilds wurden CFD-Simulationen an vereinfachten Geometrien durchgeführt. Die Vereinfachung war notwendig, um die Strukturen in computerisierte Modelle zu übertragen, die in annehmbarer Zeit (4-5 h) berechenbar waren. Bei der Vereinfachung wurde darauf geachtet, dass relevante Strukturen mitberücksichtigt werden. Die durchgeführten 2D-Simulationen wurden auch in die dritte Dimension erweitert, wodurch aus den Kreisen Zylinder werden, ähnlich der 3D-Drucke. Die simulativen Ergebnisse unterschieden sich nicht signifikant von den 2D-Ergebnissen, so dass die Variationen aufgrund der Recheneffizienz in 2D durchgeführt wurden.

Die für die Validierung ermittelten Geschwindigkeiten des Öltransports durch die 3D-Drucke lagen in der gleichen Größenordnung wie in der Simulation, sind jedoch insgesamt geringer als die simulativen Ergebnisse erwarten ließen. Dies trat unabhängig von den Druckmaterialien (Resin bzw. Silikon) und einer Beschichtung mit bzw. ohne Tegotop auf. Auch ein Einfluss der Schwerkraft konnte nicht nachgewiesen werden. Die Transportgeschwindigkeit des Textils lag sehr nahe an den simulativen Ergebnissen. Allerdings weisen die Abstandstextilien eine hohe Varianz von verschiedenen Abständen und Durchmessern auf, die eine Vergleichbarkeit mit den fixen Parametern in der Simulation erschweren. Nichtsdestotrotz können qualitative Aussagen zum Transportverhalten mittels der Simulation getroffen werden, die rein experimentell nicht möglich waren.

4.3 Bewertung in ökologischer, technologischer und ökonomischer Hinsicht

Die neue Technologie besitzt ein hohes Potential für den Schutz der Gewässer vor Ölverschmutzungen und damit einhergehend den Schutz von Arten, deren Habitaten und Trinkwasser. Die Wiederverwendbarkeit der Funktionstextilien bei wiederholtem Vorhandensein von Öl sowie der passive Transport ohne zusätzliche Energiezufuhr machen die Technologie auch unter Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekten interessant. Im Rahmen schneller Umweltänderungen hat das Projekt somit eine neue Möglichkeit

aufgezeigt, mit zum Erhalt wichtiger und gefährdeter Lebensräume nachhaltig beizutragen. Dabei sind Fragen der Entsorgung der Funktionstextilien und Möglichkeiten eines umweltfreundlichen Recyclings zu klären. Es fällt jedoch im Vergleich zu herkömmlichen Absorptionsmaterialien durch den Transport des Öls in einen Behälter weniger kontaminiertes Material an. Insgesamt bietet die untersuchte Technologie eine nachhaltige Alternative zu konventionellen Methoden zur Öl-Wasser-Reinigung.

Technologisch, sind bis zur Erreichung der Produktreife noch mehrere wichtige Schritte notwendig. Dazu zählen vor allem die Erreichung einer dauerhaft stabilen Hydrophobierung der Funktionstextilien sowie die Entwicklung des optimalen Designs des BOA für die Anwendung. Dabei gilt es u.a. eine stabile Lage im Gewässer auch bei ungünstiger Witterung und eine möglichst niedrig über dem Wasserspiegel liegende Einführung der Funktionstextilien zu gewährleisten. Auch eine optimale Befestigung der Funktionstextilien ohne Störung des Transportgeschehens ist erforderlich. Die ideale Streifenbreite und -geometrie müssen ebenfalls ermittelt werden.

Neben dem Einsatz im Gewässerschutz ist auch ein Einsatz zur Trennung von öligen Abwässern in Schiffen oder bei industriellen Anwendungen ein potentielles Anwendungsfeld. Es sollte geprüft werden, ob auch eine Trennung von Emulsionen durch die neue Technologie möglich ist. Prinzipiell sind Abstandstextilien im Verhältnis zu anderen Textilien wie beispielsweise Geweben relativ teuer. Hinsichtlich einer ökonomischen Optimierung sollte geprüft werden, ob hier durch weitere Optimierung des Funktionstextils Kosteneinsparungen möglich sind.

5 Öffentlichkeitsarbeit und Publikationen

5.1 Tagungen, Messen, weitere Vorträge und Veröffentlichungen (N/I)

Das Projekt wurde der Fachöffentlichkeit auf renommierten Konferenzen und Messen sowie im Rahmen eingeladener Fachvorträge vorgestellt. Aufgrund der Corona-Pandemie wurden 2020 und 2021 nur wenige Konferenzen durchgeführt.

Hannover Messe 2019 (01.-05.04.2019) Lufthaltende Oberflächen unter Wasser: Reibungsreduktion, Öladsorption und Sensorik ([Flyer](#))

Filtech Konferenz (22.10.2019) Bionics in Application: Superhydrophobic functional textiles for the removal of oil contamination from water

17th National and 3rd International The Recent Progress Symposium on Textile Technology and Chemistry, Bursa (20.-22.11.2019) Biomimetic oil removal by a functional textile using simulative parameter determination

Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Limnologie DGL (online-Vortrag am 30.09.2021 in Leipzig) Bionischer Öladsorber nach dem Vorbild des Schwimmfarns *Salvinia*

Aus dem Projekt gingen drei Fachartikel hervor, welche in renommierten Zeitschriften veröffentlicht bzw. eingereicht wurden:

Barthlott, W., Moosmann, M., Noll, I., Akdere, M., Wagner, J., Roling, N., Koepchen-Thomä, L., Azad, M. A. K., Klopp, K., Gries, T. & M. Mail (2020): Adsorption and transport of oil on biological and biomimetic superhydrophobic surfaces – a novel technique for oil-water separation – 15 pp., *Phil Trans. Roy. Soc. A*. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2019.0447>

Wagner, J., Akdere, M., Gürbüz, K., Beek, L., Klopp, K., Ditsche, P., Mail, M., Barthlott, W. & T. Gries (2022): Bionic oil adsorbing and transporting surfaces: A simulative determination of parameters for functional textiles. *Applied Surface Science*, submitted.

Beek, L., Ditsche, P., Akdere, M., Mail, M., Schmandt, E., Klopp, K., Gries, T. & W. Barthlott (2022): Separation of oil from water surfaces by bio-inspired technical textiles, *Journal of Industrial Textiles*, in preparation.

Das große Interesse an den herausragenden Fähigkeiten der biologischen Vorbilder, wie *Salvinia*, und auch der industriellen Nutzung wird auch darin deutlich, dass diese bereits in Buchkapiteln und dem Internet-Lexikon Wikipedia Berücksichtigung finden:

Welf Wawers: Bionik – Bionisches Konstruieren verstehen und anwenden – Springer 2022,
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-31873-4>

Artikel zu *Salvinia* in Internetlexika:
https://en.wikipedia.org/wiki/Salvinia#Salvinia_effect

5.2 Medien

Für die Öffentlichkeitsarbeit wurden drei Videos erstellt. Das erste [Video](#) zeigt dabei die Ölaufnahme durch das biologische Vorbild, ein *Salvinia*-Blatt. Während im zweiten [Video](#) die Funktionsweise des Bionischen Ölsammlers BOA demonstriert wird. Im dritten [Video](#) ist die Aufnahme eines Öltropfens durch das BOA-Textil zu sehen. Im Rahmen dieses Projektes erschienen verschiedene nationale und internationale Pressemitteilungen, in deren Folge sind insgesamt ca. 100 Zeitungsartikel erschienen. Darunter befanden sich:

Deutsch

<https://www.uni-bonn.de/neues/022-2020>

<https://provendis.info/aktuelles/presse/artikelansicht/vorbild-natur-oel-von-wasserOberflaechen-nachhaltig-entfernen>

<https://www.labo.de/wasseranalytik/bionik-fuer-die-umwelt-oel-aus-gewaessern-mit-funktionstextilien-entfernen.htm>

Aachener Zeitung: https://www.aachener-zeitung.de/wirtschaft/rwth-uni-bonn-und-die-duerener-heimbach-gruppe-forschen-zusammen_aid-52939721

ITA Homepage: https://www.ita.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaxpjxgo

LinkedIn: <https://www.linkedin.com/school/textiltechnikaachen/posts/?feedView=all>

<https://green-up-your-future.de/01-1-salvinia-effekt/>

Englisch

<https://www.uni-bonn.de/news/022-2020>

<https://www.azocleantech.com/news.aspx?newsID=26978>

<https://www.chemengonline.com/bio-inspired-textiles-recover-oil-water/>

<https://www.sciencedaily.com/releases/2020/02/200203141448.htm>

<https://www.technologynetworks.com/applied-sciences/news/improved-removal-of-oil-pollution-inspired-by-plants-330344>

<https://www.tevone.com/research-news/2314-hydrophobic-textile-adsorbs-and-transport-oil>

Französisch:

<https://www.modeintextile.fr/une-nouvelle-methode-pour-eliminer-le-petrole-de-leau/>

Portugiesisch

<https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/cienciaesaude/2020/02/cientistas-descobrem-samambaia-capaz-de-absorver-oleo-derramado-no-mar.html>

Weiterhin berichteten NTV und RTL unter dem Titel „Die Natur als Vorbild“ im Oktober 2021 auch über den BOA und die Bionik-Arbeiten an Lotus und *Salvinia* an der Universität Bonn.

[Bionik: Die Natur als Vorbild - diese Tiere und Pflanzen unterstützen uns im Alltag \(rtl.de\)](#)

6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieses Projektes wurden zwei hoch effiziente Funktionstextilien für den Einsatz im BOA identifiziert. Diese ermöglichen, genau wie ihre biologischen Vorbilder, die Trennung von Öl und Wasser, wobei das Öl ohne Anwendung zusätzlicher Energie passiv in einen Sammelbehälter weiter transportiert wird. Die Funktionstextilien mit einer Streifenbreiten von 6 cm können dabei bis zu einem ½ Liter Öl pro Stunde von der Wasseroberfläche abtransportieren. Diese Funktionstextilien funktionieren auch unter anwendungsnahen Bedingungen wie unregelmäßig vorhandenen Ölverschmutzungen oder zusätzlich vorhandenen Kontaminationen. Für die Industriereife sollte eine dauerhaft haltbare Hydrophobierung entwickelt werden. Das Design des BOA muss unter Berücksichtigung der jeweiligen Anwendungsbedingungen noch optimiert werden. Die Projektergebnisse zeigen, dass mit der BOA-Technologie eine neue, energiesparende und nachhaltige innovative Technik der Öl-Wasser-Trennung zur Verfügung gestellt wird, welche sowohl vorbeugend in Gewässern als auch bei akut auftretenden Ölhavarien kleineren Umfangs eingesetzt werden kann. Darüber hinaus bietet diese innovative Technik Potential für die Öl-Wasser-Trennung im Bereich der Schifffahrt oder in industriellen Anlagen.

7 Literaturverzeichnis

- American Petroleum Institute (2016) Options for Minimizing Environmental Impacts of Inland Spill Response. *Technical Report* 425, October 2016
<http://www.oilspillprevention.org/~media/Oil-Spill-Prevention/spillprevention/r-and-d/alternative-response-technologies/1142.pdf>
- ANSYS (2020) ANSYS Fluent Theory guide. Release 20.2. Aufl. - Canonsburg, PA
- Atlas, R.M., Hazen, T.C. (2011) Oil biodegradation and bioremediation: a tale of the two worst spills in U.S. history. *Environ Sci Technol*, **45**(16): p. 6709-15.
- Barthlott, W., Wiersch, S., Čolić, Z.; Koch, K. (2009) Classification of trichome types within species of the water fern *Salvinia*, and ontogeny of the egg-beater trichomes *Botany* 87, H. 9, p. 830–836
- Barthlott, W., Rafiqpoor, M.D., Erdelen, W.R. (2016) Bionics and Biodiversity – Bio-inspired Technical Innovation for a Sustainable Future. In *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction - Biological Design and Integrative Structures* (eds Knippers, J., Nickel, K.G., Speck, T.), pp. 11-55. Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Barthlott, W., Schimmel, T., Wiersch, S., Koch, K., Brede, M., Barczewski, M., Walheim, S., Weis, A., Kaltenmaier, A., Leder, A., Bohn, H.F. (2010) The salvinia paradox: superhydrophobic surfaces with hydrophilic pins for air retention under water. *Adv Mater.*, **22**(21), p. 2325-8.
- Barthlott, W., Rafiqpoor, M.D., Erdelen, W.R. (2016) Biomimetic Research for Architecture and Building Construction: Biological Design and Integrative Structures. in Knippers, J., Nickel, K., Speck (Eds): *Bionics and Biodiversity – Bio-inspired Technical Innovation for a Sustainable Future*, **8**, p. 11-55.
- Barthlott, W., Mail, M., Neinhuis, C. (2016) Superhydrophobic hierarchically structured surfaces in biology: evolution, structural principles and biomimetic applications *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 374, H. 2073, S. 1–40

- Barthlott, W., Mail, M., Bushan, B., Koch, K. (2017) Plant Surfaces: Structures and Functions for Biomimetic Innovations. *Nano-Micro Letters*, **9**(23)
<http://link.springer.com/article/10.1007/s40820-016-0125-1>
- Barthlott, W., Moosmann, M., Noll, I., Akdere, M., Wagner, J., Røling, N., Koepchen-Thomä, L., Azad, M. A. K., Klopp, K., Gries, T., Mail, M. (2020) Adsorption and transport of oil on biological and biomimetic superhydrophobic surfaces – a novel technique for oil-water separation – 15 pp., *Phil Trans. Roy. Soc. A*. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2019.0447>
- Beckermann, M., Poremba, K., Colijn, F. (1999) Untersuchungen zur Auswirkung der Pallas-Havarie auf die Bakterio- und Phytoplantengemeinschaft des Wattenmeeres. *Berichte, Forschungs- u. Technologiezentrum Westküste d. Univ. Kiel*, **20** (32).
- Beek, L., Ditsche, P., Akdere, M., Mail, M., Schmandt, E., Klopp, K., Gries, T., Barthlott, W. (2022) Separation of oil from water surfaces by bio-inspired technical textiles, *Journal of Industrial Textiles*, in Preparation.
- Bhattacharyya, D., Jumawan, A. B., Grieves, R. B., Harris, L. R. (1979) Ultrafiltration Characteristics of Oil-Detergent-Water Systems: Membrane Fouling Mechanisms *Separation Science and Technology* **14**(6)
<https://doi.org/10.1080/01496397908068474>
- Bhattacharyya, S., Klerks, P.L., Nyman, J.A. (2003) Toxicity to freshwater organisms from oils and oil spill chemical treatments in laboratory microcosms. *Environmental Pollution*, **122**(2), p. 205-215.
- Brown, P.S., Bushan, B. (2015) Mechanically durable, superoleophobic coatings prepared by layer-by-layer technique for anti-smudge and oil-water separation. *Scientific Reports* volume 5, Article number: 8701 (2015) <https://www.nature.com/articles/srep08701>
- Davidson, W.F., Lee, K., Cogswell, A. (Eds.) (2006) *Oil Spill Response: A Global Perspective*.
- DE 10 2018 118 139.6 (2019) Vorrichtung und Verfahren zum Aufnehmen von Öl von einer Wasseroberfläche. Erfinder Barthlott, Moosmann, Mail, Anmelder Universität Bonn, Patentanmeldung vom 2019-07-25. [DPMA, international Nachmeldungen EP3827129A1; US2021238818A1; WO2020021031A1](#)
- DITF (2018) ÖLMANTA: Innovation nach dem Vorbild der Natur. DITF Report, 1/18
- Fingas, M. (Ed.) (2012) *The basics of oil spill cleanup*. 3 ed. Broken: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Fingas, M. (Ed.) (2015) *Handbook of Oil Spill Science and Technology*, John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ. 728.
- Gandyra, D. (2014) *Der Salvinia-Effekt: Lufthaltung an biologischen und biomimetischen Oberflächen* Karlsruhe, Karlsruher Instituts für Technologie, Dissertation
- Gandyra, D., Walheim, S., Gorb, S., Ditsche, P., Barthlott, W., Schimmel, T. (2020) Air retention under Water by the floating fern *Salvinia*: the crucial role of a trapped air layer as a pneumatic spring. - *Nano-Micro Small* (Wiley-VCH)
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/smll.202003425>
- Green, J., Trett, M.W. (Eds.) (1989) *the Fate and Effects of Oil in Freshwater*. Springer Netherlands.
- Hale, R., Ranjan, R.; Hidrovo, C (2014) Capillary flow through rectangular micropillar arrays, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **75**, S. 710–717

- Herwig, H., Schmandt, B. (2018) Strömungsmechanik. 4., erweiterte Auflage. Aufl. - Berlin: Springer Vieweg
- Hiscock, K. (2014) Marine Biodiversity Conservation: A Practical Approach. *Routledge*
- Hollebone, B. (2017) Oil Physical Properties. Oil Spill Science and Technology. Aufl.: Elsevier, S. 185–207
- Kissa, E. (1998) Wetting and Wicking, *Textile Research Journal* 1, S. 660–668
- Koch, K., Blecher, I., König, G., Kehraus, S., Barthlott, W. (2009) The superhydrophilic and superoleophilic leaf surface of *Ruellia devosiana* (Acanthaceae): a biological model for spreading of water and oil on surfaces. *Functional Plant Biology* 36: 330-350, DOI: 10.1071/FP08295 .
- Körbahti, B.K., Artut, K. (2010) Electrochemical oil/water demulsification and purification of bilge water using Pt/Ir electrodes. *Desalination* 258(1-3): 219-228, DOI: [10.1016/j.desal.2010.03.008](https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.03.008) .
- Lecheler, S. (2018) Numerische Strömungsberechnung. 4. Aufl. - Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Mayser, M. (2013) Air layers under water on the fern *Salvinia* – Stability and biomimetic applications Bonn, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Dissertation.
- Mayser, M., Barthlott, W. (2014) Layers of air in the water beneath the floating fern *Salvinia* are ex-posed to fluctuations in pressure Integrative and comparative biology 54, H. 6, S. 1001–1007.
- Melskotte, M., Brede, M., Mail, M., Mayser, M., Leder, A., Barthlott, W. (2020) Luft haltende Schiffsbeschichtung nach biologischem Vorbild: pp. 204-209 in: Bernotat, A. & J. Bertling (2020): *Prototype Nature*, Fraunhofer Umsicht and Folkwang Universität der Künste. Verlag Laufen, Oberhausen, ISBN 978-3-87468-393-7, DOI: 10.24406/umsicht-n-531984.
- Nordvik, A.B. et al. (1996) Oil and water separation in marine oil spill clean-up operations. *Spill Science & Technology Bulletin*, 3(3): p. 107-122.
- Prince, R.C. (2015) Oil spill dispersants: boon or bane? *Environ Sci Technol*, 49(11), p. 6376-84.
- Rapp, B. (2017) *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics.*, 1. Aufl., Elsevier
- Statistika (2021) <https://de.statista.com/themen/1378/textil-und-bekleidungsindustrie-in-deutschland/#dossierKeyfigures> .
- Solga, A., Cerman, Z., Striffler, B., Spaeth, M.; Barthlott, W. (2007) The dream of staying clean: Lotus and biomimetic surfaces *Bioinspiration & biomimetics* 2, H. 4, p. 126-34.
- Tomaszewska, M. A., Karakulski, K. (2005) Treatment of bilge water using a combination of ultrafiltration and reverse osmosis *Desalination*. 185 (1–3), p 203-212 <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.03.078> .
- Toyota, K., McNabb, N., Spyropoulos, D., Iguchi, T., Kohno, S. (2017) Toxic effects of chemical dispersant Corexit 9500 on water flea *Daphnia magna*, *J Appl Toxicol*, 37(2), p. 201-206.
- Transportation Research Board and National Research Council (2003) *Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects*. Washington, DC: The National Academies Press.

- United States Environmental Protection Agency (EPA) (2015), Sensitivity of Freshwater Habitats, <https://archive.epa.gov/emergencies/content/learning/web/html/freshwat.html> (abgerufen am 13.12.2017).
- Vandermeulen, J. H., Hrudey, S.E. (Eds.) (1987) Oil in Freshwater: Chemistry, Biology, Countermeasure Technology. Proceedings of the Symposium of Oil Pollution in Freshwater, Edmonton, Alberta, Canada. Elsevier.
- Wagner, J., Akdere, M., Gürbüz, K., Beek, L., Klopp, K., Ditsche, P., Mail, M., Barthlott, W. & T. Gries (2022) Bionic oil adsorbing and transporting surfaces: A simulative determination of parameters for functional textiles, [Applied Surface Science, submitted](#)
- Warm, H.-J. und Köppke, K.-E. (2007) Schutz von neuen und bestehenden Anlagen und Betriebsbereichen gegen natürliche, umgebungsbedingte Gefahrenquellen, insbesondere Hochwasser (Untersuchung vor- und nachsorgender Maßnahmen), Umweltbundesamt, ISSN 1862-4804.
- Weis, J.S. (2014) Marine Pollution: What Everyone Needs to Know? *Oxford University Press*.
- White, H.K., Lyons, S.L., Harrison, S.J., Findley, D. M., Liu, Y., Kujawinski, E. B. (2014) Long-Term Persistence of Dispersants following the Deepwater Horizon Oil Spill, *Environmental Science & Technology Letters* **1**(7), p. 295-299.
- Wu, L., Zhang, J., Li, B., Wang, A. (2014). Mechanical- and oil-durable superhydrophobic polyester materials for selective oil absorption and oil/water separation. *J Colloid Interface Sci*, **413**, p. 112-7.
- Wu, Z.Y., Li, C., Liang, HW., Zhang, Y.N, Wang, X., Chen, J.F., Hong Yu, S. (2014) Carbon nanofiber aerogels for emergent cleanup of oil spillage and chemical leakage under harsh conditions. *Sci Rep* **4**, 407, <https://doi.org/10.1038/srep04079>.
- Zeiger, C., Rodrigues da Silva, I.C., Mail, M., Kavalenka, M.N., Barthlott, W., Hölscher, H. (2016) Microstructures of superhydrophobic plant leaves - inspiration for efficient oil spill cleanup materials. *Bioinspir Biomim*, **11**(5), p. 056003.

Anhang

Anhang 1 Übersicht über die im Screening verwendeten Funktionstextilien

Anhang 2 Flyer Hannover Messe 2020

Anhang 3 Simulationsergebnisse für Ölkontaktwinkel von 01°

Videos

["Bionischer Ölsammler BOA"](#) © Barthlott, Moosman & Mail 2018 and 2020

[Oil adsorption and transport on a submerged leaf of Pistia stratiotes](#)

[Oil adsorption and transport of oil on a leaf of Salvinia](#)

[Oil adsorption and transport on a submerged textile flock](#)

[Oil adsorption on a stripe of a functional textile, transport up to 0.5 liter fuel per hour](#)

[Floating bioinspired technical Adsorber BOA for removal of oil spill from water surfaces](#)

Anhang 1: Übersicht über die im Screening verwendeten Funktionstextilien

Gesamtübersicht der Bewertung der Vorversuche

Probennr.:	V1	V2	V3	V4	Gesamtpunkte
BOA-001	2	1	2	1*2	7
BOA-002	2	2	2	1*2	8
BOA-003	2	2	2	3*2	12
BOA-004	2	1	1	2*2	8
BOA-005	2	2	2	1*2	8
BOA-006	2	2	2	1*2	8
BOA-007	2	2	1	1*2	7
BOA-008	2	2	1	1*2	7
BOA-009	2	1	2	0*2	5
BOA-010	2	2	2	1*2	8
BOA-011	2	2	1	1*2	7
BOA-012	2	1	2	0*2	5
BOA-013	2	1	2	0*2	5
BOA-014	2	1	2	0*2	5
BOA-015	2	2	2	0*2	6
BOA-016	2	2	2	1*2	8
BOA-017	2	2	2	1*2	8
BOA-018	2	2	2	1*2	8
BOA-019	2	2	2	1*2	8
BOA-020	2	2	2	1*2	8
BOA-021	2	2	2	1*2	8
BOA-022	2	2	2	3*2	12
BOA-023	2	2	2	3*2	12
BOA-024	2	2	2	3*2	12
BOA-025	2	2	2	1*2	8
BOA-026	2	2	2	1*2	8
BOA-027	2	2	2	2*2	10
BOA-028	2	2	2	2*2	10
BOA-029	2	2	2	2*2	10
BOA-030	2	2	2	1*2	8
BOA-031	2	2	2	0*2	6
BOA-032	2	2	2	1*2	8
BOA-033	2	2	2	1*2	8
BOA-034	2	2	2	0*2	6
BOA-035	2	2	1	1*2	7
BOA-036	2	2	2	1*2	8
BOA-037	2	2	2	0*2	6
BOA-038	2	2	2	0*2	6
BOA-039	2	2	1	1*2	7
BOA-040	2	2	2	3*2	12
BOA-041	2	2	2	0*2	6
BOA-042	2	2	2	2*2	10
BOA-043	2	2	2	2*2	10
BOA-044	2	2	1	2*2	9
BOA-045	2	2	1	2*2	9
BOA-046	2	2	2	2*2	10

BOA-047	2	2	2	3*2	12
BOA-048	2	2	1	0*2	5
BOA-049	2	2	1	0*2	5
BOA-050	2	2	2	2*2	10
BOA-051	2	2	2	2*2	10
BOA-052	2	2	2	0*2	6
BOA-053	2	2	2	2*2	10
BOA-054	2	2	1	2*2	9
BOA-055	2	2	2	2*2	10
BOA-056	2	2	2	2*2	10
BOA-057	2	2	2	2*2	10
BOA-058	2	2	2	2*2	10
BOA-059	2	2	2	1*2	8

Lufthaltende Oberflächen unter Wasser: Reibungsreduktion, ÖladSORPTION und Sensorik



Der Schwimmfarn *Salvinia molesta*. Schneebesenförmige Haare auf der Blattoberseite schließen eine Luftschicht ein. Hydrophile Spitzen halten das Wasser auf Distanz und stabilisieren die Luftschicht.

Einige Pflanzen und Tiere verfügen über eine erstaunliche Eigenschaft: Sie sind *superhydrophob* (wasserabweisend) durch hierarchisch strukturierte Oberflächen. Nach unserer Entdeckung des Lotus-Effektes beschäftigen wir uns seit 2002 mit permanent unter Wasser lufthaltenden Oberflächen von ganz bestimmten aquatischen Organismen.

Unsere Arbeiten an superhydrophoben Oberflächen wurden unter anderem mit dem Deutschen Umweltpreis, dem Beckurts-Preis und 2019 mit dem Validierungspreis des BMBF ausgezeichnet.

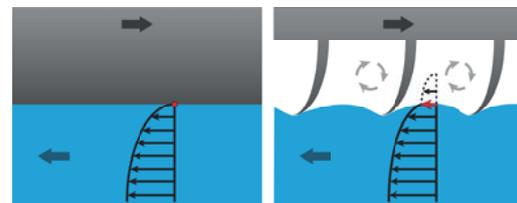
Untergetaucht gelangt bei einigen Arten kein Wasser zwischen die Oberflächen-Strukturen, wodurch eine Luftschicht u. U. jahrelang eingeschlossen und dauerhaft festgehalten wird. Diese Fähigkeit wird als „Salvinia®-Effekt“ bezeichnet.

Durch systematische Analyse verschiedener Arten im Rahmen mehrerer 2002 - 2017 durch das Bundesministerium für Bildung

und Forschung (BMBF) geförderter Forschungsvorhaben identifizierten wir die Schwimmfarne *Salvinia* und die Rückenschwimmer *Notonecta* als optimale Vorbilder für die Entwicklung bionischer, dauerhaft lufthaltender Oberflächen.

Reibungsreduktion

Bionische, dauerhaft lufthaltende Oberflächen sind von großem Interesse. Sie können zur Reduktion der Reibung zwischen einer Festkörperoberfläche und einer darüber strömenden Flüssigkeit eingesetzt werden. Die Luftschicht fungiert als Gleitfilm (passive Air Lubrication).



Eines der größten Anwendungspotenziale für lufthaltende Oberflächen liegt in der Schifffahrt. Eine Luftschicht zwischen einer Festkörperoberfläche und Wasser fungiert als Gleitfilm. Die Reibung ist erheblich reduziert.

Das Anwendungspotential ist erheblich. Wichtigster Bereich ist die Schifffahrt. Wir konnten zeigen, dass hier Einsparungen von bis zu 32,5 Millionen Tonnen Treibstoff und somit etwa 130 Millionen Tonnen CO₂ (etwa 0,5 % des weltweiten CO₂-Ausstoßes) jährlich erzielt werden können.

An Prototypen konnten wir, in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Strömungsmechanik in Rostock, bereits eine Reibungsreduktion von bis zu 30% nachweisen.

AirGrids - Neue Technologie für bionische lufthaltende Oberflächen



Schema der lufthaltenden AirGrids-Oberflächen und Prototyp unter Wasser.

Die von uns entwickelte und zum Patent angemeldete AirGrids-Technologie beschreibt ein völlig neuartiges Konstruktionsprinzip zur Herstellung unter Wasser lufthaltender Oberflächen.

Das Prinzip beruht auf superhydrophoben Gittern die in definiertem Abstand zu einer Oberfläche gehalten werden. Zwischen Oberfläche und Gitter wird eine Luftschicht eingeschlossen, die als

Gleitfilm fungiert. Die Vorteile dieser Technik sind die kostengünstige Herstellung, die hohe Stabilität und vor allem die mögliche Kombination mit der etablierten aktiven Air Lubrication (Micro-Bubbles) Technik.

Öladsorption

Eine weitere erstaunliche Eigenschaft der Schwimmfarn *Salvinia* ist ihre Fähigkeit Öl an der Oberfläche zu adsorbieren und zu transportieren.

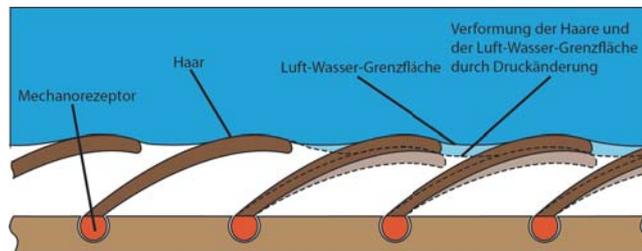
Kommt die Oberfläche mit auf der Wasseroberfläche schwimmendem Öl in Kontakt, wird dieses adsorbiert, ersetzt die Luftschicht und wird auf der Oberfläche weitergeleitet.



Öl-Adsorption an *Salvinia*. Kommt das Blatt mit dem im Wasser schwimmenden Öl in Kontakt, wird das Öl an der Oberfläche adsorbiert und transportiert.

Auf bionischen, z.B. textilbasierten, Oberflächen ermöglicht dies die Entwicklung einer neuartigen passiven und umweltfreundlichen Technologie zur Beseitigung von Ölverschmutzungen auf Gewässeroberflächen, die auch präventiv zur Gewässerreinigung eingesetzt werden kann. Dieses Prinzip wird aktuell im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekts gemeinsam mit der RWTH Aachen und der Heimbach GmbH untersucht und Textil-Prototypen für die Anwendung entwickelt. Wir suchen Kooperationspartner für die Herstellung der Ölsammlerapparaturen.

Sensorik



Der Rückenschwimmer *Notonecta*. Mit einer Doppelstruktur aus unterschiedlichen Haaren und Härchen hält er dauerhaft eine Luftschicht unter Wasser. Mechanorezeptoren an der Basis der langen Haare registrieren ihre durch Druckschwankungen hervorgerufenen Bewegungen.

Am Rückenschwimmer *Notonecta* zeigt sich ein weiteres Anwendungsgebiet für lufthaltende Oberflächen: Ein innovatives Konstruktionsprinzip für Druck- und Strömungssensoren.

Durch Druckänderung wird die Luftschicht expandiert bzw. komprimiert und der Grenzflächenverlauf zwischen Luft und Wasser verändert sich. Die Haare bewegen sich mit der Grenzfläche. Diese druckabhängige Bewegung wird durch Mechanorezeptoren an der Haarbasis registriert. Untersuchungen an ersten technischen Prototypen zeigten die erstaunliche Empfindlichkeit des Systems. Es eröffnet neue Möglichkeiten zur Konstruktion hochempfindlicher, ortssensitiver Hydrophone.

Weiterführende Publikationen

Barthlott, W.; Mail, M.; Bhushan, B. & K. Koch (2017). Plant Surfaces: Structures and Functions for Biomimetic Innovations. *Nano-Micro Lett.* 9:23. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40820-016-0125-1>

Barthlott, W.; Mail, M. & C. Neinhuis (2016). Superhydrophobic hierarchically structured surfaces in biology: evolution, structural principles and biomimetic applications. *Phil. Trans. R. Soc. A* 374: 20160191. <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rsta.2016.0191>

Busch, J.; Barthlott, W.; Brede, M.; Terlau, W. & M. Mail (2018). Bionics and green technology in maritime shipping: an assessment of the effect of *Salvinia* air-layer hull coatings for drag and fuel reduction. *Phil. Trans. R. Soc. A* 377: 20180263. <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsta.2018.0263>

Barthlott, W.; Moosmann, M.; Noll, I.; Akdere, M.; Wagner, J.; Roling, N.; Koepchen-Thomä, L.; Azad, M. A. K.; Klopp, K.; Gries, T.; Mail, M. (2020). Adsorption and superficial transport of oil on biological and bionic superhydrophobic surfaces: a novel technique for oil-water separation. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378: 20190447. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0447>

Mail, M.; Klein, A.; Bleckmann, H.; Schmitz, A.; Scherer, T.; Rühr, P. T.; Lovric, G.; Fröhlingdorf, R.; Gorb, S. N. & W. Barthlott (2018). A new bioinspired method for pressure and flow sensing based on the underwater air-retaining surface of the backswimmer *Notonecta*. *Beilstein J. Nanotechnol.* 9, 3039–3047. <https://www.beilstein-journals.org/bjnano/articles/9/282>

Mail, M.; Moosmann, M.; Häger, P. & W. Barthlott (2019). Air retaining grids – A novel technology to maintain stable air layers under water for drag reduction. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci.* DOI 10.1098/rsta.2019.0126

www.nees.uni-bonn.de / www.lotus-salvinia.de

Anhang 3: Simulationsergebnisse für Ölkontaktwinkel von 01°

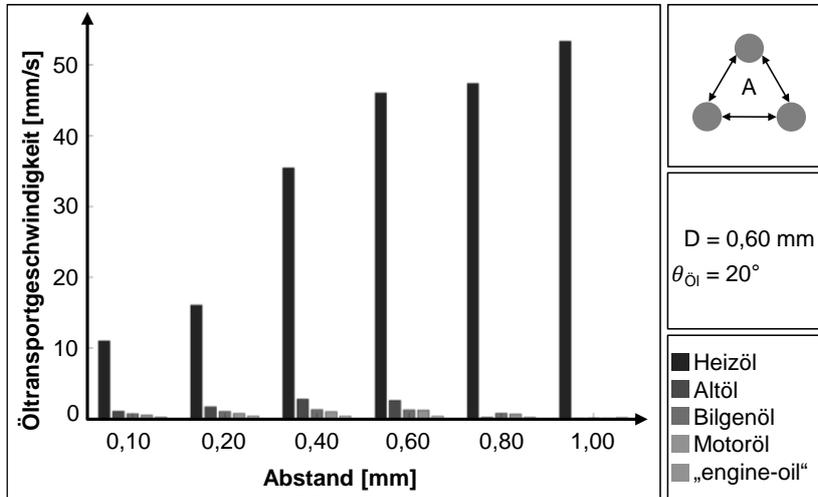


Abbildung A3.1: Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Abstands.

Bei 1° Ölkontaktwinkel, sowie einem Durchmesser von 0,60 mm. Darstellung für alle Öle.

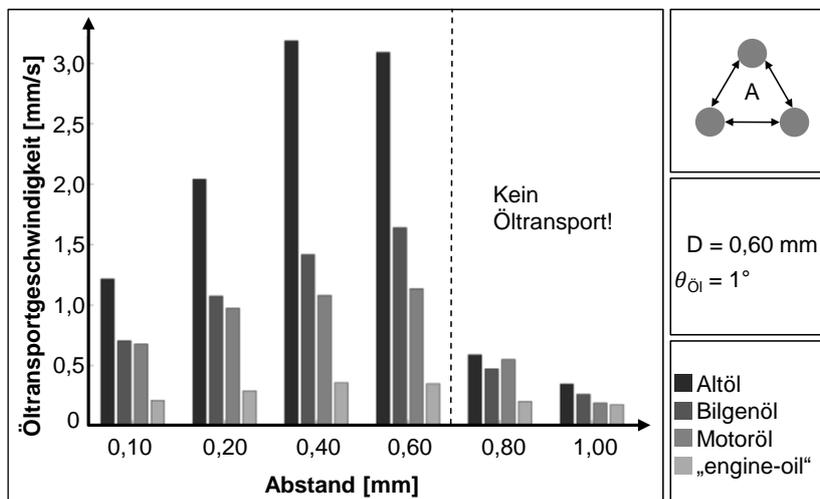


Abbildung A3.2: Öltransportgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Abstands.

Bei 1° Ölkontaktwinkel sowie einem Durchmesser von 0,60 mm. Darstellung ohne Heizöl.