

Projekttitlel:

Herstellung und Untersuchung biologisch abbaubarer medizinischer Gesichtsmasken

Teilnehmerinnen: Antonia Bockhorn (17), Antonia Heinrich (17), Julia Richter (18)

Erarbeitungsort: Jena

Projektbetreuerin: Dr. Christina Walther

Thema des Projekts: biologisch abbaubare medizinische Gesichtsmasken

Fachgebiet: Arbeitswelt

Wettbewerbssparte: Jugend Forscht

Bundesland: Thüringen

Wettbewerbsjahr: 2023

Kurzfassung

Im Rahmen der Arbeit untersuchten wir unterschiedliche Vliesmaterialien auf ihre biologische Abbaubarkeit und Eignung als Filterschicht in einer medizinischen Gesichtsmaske. Im ersten Versuch erfolgte die eigenständige Herstellung eines Nassvlieses und eines Elektrospinnvlieses. Dem folgte die vergleichende licht- und rasterelektronenmikroskopische Beurteilung des strukturellen Aufbaus von sechs verschiedenen Vliesproben. Im dritten Teilexperiment wurde die biologische Abbaubarkeit unter Laborbedingungen untersucht. Die Vliesproben wurden diesbezüglich im Rahmen von zwei Versuchsreihen in einem Sapromaten über eine Zeitspanne von drei Monaten überprüft. Zeitgleich erfolgte ein Kompostierversuch, der die Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen prüfen sollte. Im fünften Teilexperiment erfolgte die Bewertung der Filterleistung der Vliese. Bei allen Untersuchungen diente eine nicht biologisch abbaubare medizinische Gesichtsmaske als Vergleichsprobe.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	- 1 -
2 Methoden	- 2 -
2.1 Versuch A	- 2 -
2.2 Versuch B	- 2 -
2.3 Versuch C	- 3 -
2.4 Versuch D	- 3 -
2.5 Versuch E	- 5 -
3 Ergebnisse	- 5 -
3.1 Versuch A	- 6 -
3.2 Versuch B	- 7 -
3.3 Versuch C	- 8 -
3.4 Versuch D	- 9 -
3.5 Versuch E	- 10 -
4 Auswertung	- 12 -
5 Fehlerbetrachtung	- 14 -
6 Zusammenfassung	- 14 -
Literaturverzeichnis	- 15 -
Abbildungsverzeichnis	- 15 -
Tabellenverzeichnis	- 16 -
Unterstützungsleistung	- 16 -
Anhang	- 17 -

1 Einleitung

Im März 2020 ruft die World Health Organisation (WHO) eine Pandemie auf Grund des sich weltweit rasant verbreitenden SARS-CoV-2-Virus aus. Dieses hochansteckende Virus verbreitet sich über Tröpfchen und Aerosole, welche die Menschen beim Niesen, Sprechen und Atmen sowie im Kontakt mit anderen Menschen ausstoßen. Bei den abgesonderten Partikeln unterscheidet man zwischen groben ($>5 \mu\text{m}$) und feinen Partikeln ($<5 \mu\text{m}$).¹ Grobe Partikel setzen sich in der Luft innerhalb einer Stunde ab und können somit keine Infektion mehr auslösen. Feine Partikel hingegen persistieren in schlecht belüfteten Räumen bis zu 16 Stunden in Form von Aerosolen in der Luft. Infolge ihrer Einatmung können sie eine Infektion auslösen. Das Tragen von Mund-Nasen-Bedeckungen ist daher ein verpflichtender Bestandteil des gesellschaftlichen Infektionsschutzes geworden. Die Verwendung von medizinischen Gesichtsmasken dient dem Schutz vor der Einatmung von feinen Aerosolen.² Wie Studien der WHO aus dem Jahr 2020 zeigen, können Gesichts- und Atemschutzmasken die Verbreitung des SARS-CoV-2-Virus um bis zu 85 % reduzieren.³ Zur Eingrenzung des pandemischen Infektionsgeschehens ist daher das Tragen von Gesichtsmasken essenziell. Die Entsorgung dieser stellt jedoch eine erhebliche Belastung für die Umwelt dar und wird voraussichtlich noch viele Generationen vor große Herausforderungen stellen. Nach Untersuchungen der University of Southern Denmark und der Princeton University werden von der Weltbevölkerung monatlich etwa 129 Milliarden Gesichtsmasken genutzt und anschließend entsorgt.⁴ Diese Menge entspricht circa 451 500 t Müll. Breitet man die Masse monatlich entsorgter Masken wie einen Teppich auf der Erdoberfläche aus, so würde dieser etwa die dreifache Größe von Singapur umfassen.⁵ Insofern ist der monatliche Verbrauch von medizinischen Gesichtsmasken mit dem von Plastikflaschen vergleichbar. Während 25 % dieser recycelt werden, liegen bislang keine Informationen zu Recyclingmöglichkeiten von medizinischen Gesichtsmasken in wissenschaftlichen Veröffentlichungen vor.⁶ Da sie gegenwärtig nicht biologisch abgebaut werden, bleiben medizinische Gesichtsmasken bei unsachgemäßer Entsorgung in Form von Mikro- und Nanoplastikpartikeln in der Umwelt zurück. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, einen Beitrag zum Umweltschutz zu leisten. Dies wollen wir erreichen, indem wir weniger umweltbelastende Alternativen zu nicht biologisch abbaubaren medizinischen Gesichtsmasken untersuchen, um die Plastikmüll- und Mikroplastikbelastung der Umwelt zu verringern. Im Zentrum steht dabei die Forschungsfrage: „Inwiefern eignen sich verschiedene Vliesmaterialien für die Herstellung biologisch abbaubarer medizinischer Gesichtsmasken?“. Dabei sollen folgende Hypothesen anhand unserer selbst hergestellten Auswahl an natürlichen Polymeren beantwortet werden:

1. Die ausgewählten natürlichen Polymere sind nicht nur unter Laborbedingungen, sondern auch unter natürlichen Bedingungen in einem Kompostiersversuch biologisch abbaubar.
2. Verschiedene Herstellungsweisen von Vliesen beeinflussen die Eigenschaften dieser hinsichtlich der biologischen Abbaubarkeit und Filterleistung.
3. Vliese aus natürlichen Polymeren weisen eine bakterielle Filterleistung von $\geq 95 \%$ auf.

¹ Vgl. Campos, R. K. et al.: Decontamination of SARS-CoV-2 and Other RNA Viruses from N95 Level Meltblown Polypropylene Fabric Using Heat under Different Humidities. S. 1.

² Vgl. Ebd.

³ Vgl. Ebd.

⁴ Vgl. Genbo, X. et al.: Preventing masks becoming the next plastic problem. S. 1ff.

⁵ Vgl. Ebd.

⁶ Vgl. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7297173/>.

2 Methoden

2.1 Versuch A

Aufgabe:

Wie kann ein dichtes und stabiles Nassvlies hergestellt werden? Welche Mischungsverhältnisse von CE- und PLA- Fasern bilden das dichteste und stabilste Vlies?

Geräte und Materialien:

PLA- und CE-Fasern; Wasser; Feinwaage; Pinzette; Löschpapier; Papierblattbildner; Trocknungsmaschine

Durchführung:

Für die Vliesherstellung wurden etwa fünf cm lange CE- und PLA-Fasern in unterschiedlichen Verhältnissen (1:1, 3:7, 1:9) gemischt. Die Herstellung des Nassvlieses wurde mit einem Papierblattbildner durchgeführt. Mit diesem konnte der großtechnische Wet-Laid-Prozess mit kleineren Probemengen nachgestellt werden, dieser Versuchsaufbau wurde uns vom TITK zur Verfügung gestellt. Die Durchführung, die Auswahl der Fasern und die Mischverhältnisse erfolgte durch uns. Dafür wurde der *Pulper* mit 40 l Wasser gefüllt und 100 g der Fasermischung eingestreut (Abb. 3). Das Wasser im Zylinder wurde mit 2500 Umdrehungen pro Minute gerührt. Dabei war zu beachten, dass sich die Fasern nicht am Zylinderrand absetzten und durch zu langes Rühren eine Verklumpung eintrat. Waren die Fasern nach 45 s im Wasser gleichmäßig verteilt, wurde das Wasser über ein Ventil mit hoher Geschwindigkeit aus dem *Pulper* abgelassen. Die Fasern sanken in einer unregelmäßigen Struktur auf ein Sieb am Boden des *Pulpers*. Anschließend wurde das Nassvlies mit einem Luftsauger am Boden des *Pulpers* verdichtet (Abb. 4). Das fertige Vlies wurde nun gepresst und auf ein Löschpapier gestürzt (Abb. 5). Dabei war zu beachten, dass das Vlies auf die glatte Seite des Löschpapiers abgelegt wurde, um einen schnelleren Trocknungsprozess zu ermöglichen. Die Trocknung erfolgte bei einer Temperatur von 100 °C. Um den Vliesen einen stabileren Verbund zu geben, wurden diese gebügelt, damit der PLA-Anteil im Vlies die Fasern zusammenschmolz. Insgesamt wurden je Mischverhältnis drei Vliese hergestellt.

2.2 Versuch B

Aufgabe:

Welche Struktur besitzen die Vliese? Gibt es Besonderheiten im Aufbau? Wie groß ist der Faserdurchmesser der Proben?

Geräte und Materialien:

Proben 1, 2, 3, 4, 5, 6; Probeträger; Carbontape; Pinzette; Silikonhandschuhe; Sputtergerät L207 des Zentrums für Angewandte Forschung Jena; 7 REM Sigma VP von Zeiss, Jena

Durchführung:

Die Vliesproben wurden zunächst im LM betrachtet und weiterführend im REM. Für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung wurden die Proben mit einem „carbon tape“ auf einem Probeträger befestigt (Abb. 7, 8) und mit einem Sputtergerät L207 des Zentrums für Angewandte Forschung Jena im Vakuum mit Gold bedampft. Für die Durchführung der Untersuchung wurde das REM Sigma VP von Zeiss, Jena, verwendet.

2.3 Versuch C

Aufgabe:

Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit von vier verschiedenen Vliesproben unter Laborbedingungen (Temperatur von $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, O_2 , Druck) in einem definierten Zeitfenster in einem Sapromaten

Geräte und Materialien:

Sapromat; Probe 1, 2, 3, 4, 5, 6; O_2 ; CO_2 ; Wasser; Mikroorganismen

Durchführung:

Der Versuch zur biologischen Abbaubarkeit unter Laborbedingungen erfolgte mit Hilfe des Sapromaten. Der Abbau lief innerhalb einer definierten Zeitspanne ab, in der die Temperatur, der O_2 -Gehalt und die Feuchtigkeit konstant überwacht wurden. Zudem waren Mikroorganismen und Pilze anwesend. Wodurch eine kontinuierliche Messung des Gasstoffwechsels der Mikroorganismen und der Abbaugeschwindigkeiten der Proben innerhalb eines geschlossenen Systems stattfinden konnte. Die organischen Stoffe wurden durch Stoffwechselvorgänge oxidativ abgebaut. Für diese biochemischen Oxidationen war die Zugabe einer bestimmten O_2 -Menge bedeutsam, welche als biochemischer O_2 -Bedarf bezeichnet wird. Anhand des O_2 -Bedarfs konnte auf den *Energieumsatz* einer Probe geschlossen werden. Da die Löslichkeit von O_2 in Wasser gering ist, musste die O_2 -Menge hinzugefügt werden, die von den Mikroorganismen durch biochemische Oxidationen entzogen wurde. Das Hinzufügen war essenziell, da bei minimalem O_2 -Gehalt *anaerobe* Abbauprozesse, also Fäulnisprozesse, erfolgt wären. Der Abbauprozess würde sich unter diesen Bedingungen deutlich verlangsamen. Schlussendlich mussten die Stoffproben zu mehr als 90 % Wasser, CO_2 , mineralischen Salzen, weiteren Elementen und einer neuen Biomasse abgebaut worden sein. Um eine Probe als biologisch abbaubar zu bezeichnen, muss eine umfassende Umwandlung der Proben erfolgen. Das heißt, dass eine vollständige Überführung des Stoffes in die Mineralisierungsendprodukte vorliegen muss. Der Ablauf der Sapromatmessung ist vor allem abhängig von der Zusammensetzung und Menge der organischen Stoffe, aber auch von der Art und Anzahl der vorhandenen Mikroorganismen. Ein geschlossenes System zur Messung bildet je ein Reaktionsgefäß mit integriertem CO_2 -Absorbergefäß, einem Druckindikator und einem O_2 -Erzeuger, die durch Schläuche miteinander verbunden sind (Abb. 26). Im Reaktionsgefäß befindet sich das mit Mikroorganismen versetzte Wasser und die zu untersuchende Probe. Dieser Inhalt wird durch einen Rührstab durchmischt, damit die Probe stetig O_2 aufnehmen kann. Für die mikrobiellen Abbauprozesse wird O_2 verbraucht und gleichzeitig entsteht CO_2 . Das freigesetzte CO_2 bindet an den Absorber. Da der Druck im geschlossenen System durch den O_2 -Verbrauch fällt, wird die O_2 -Menge gemessen, die hinzugefügt werden muss, um den Druck konstant zu halten.⁷ Als Vergleichsprobe wird das Prüfmedium Glucose genutzt, welches zeigt, ob der Abbauprozess erfolgreich stattfindet.

2.4 Versuch D

Aufgabe:

⁷ Vgl. <https://www.selutec.de/umwelttechnik/respirometer.php>.

Untersuchung von sechs verschiedenen Proben aus Kunststofffasern in festgelegten Zeitspannen und unter konstanten Bedingungen (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) in mikrobiell aktiver Komposterde. In regelmäßigen Zeitabständen werden die Proben visuell, lichtmikroskopisch und durch die Bestimmung der Masseänderung beurteilt.⁸

Geräte und Materialien:

Glasbehälter mit Deckel mit einem Fassungsvermögen von 1 l; Lichtmikroskop; Analysewaage mit einer Fehlergrenze von 0,1 mg; Petrischale; Bodenfeuchtmessgerät; Pinsel; Wasserzerstäuber; Mikrobiell aktive Komposterde; Zellstoffstreifen; Probe 1, 2, 3, 4, 5, 6; Wasser

Versuchsaufbau:



Abbildung 1: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Versuchsgefäße vor Eingrabung der Versuchsproben



Abbildung 2: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Gefüllte Versuchsgefäße mit eingegrabenen Versuchsproben

Durchführung:

Die Vorbereitung der Prüfkörper (siehe Tabelle 1) erfolgte unter Raumtemperatur. Es wurden quadratische Proben von (25 ± 1) mm x (25 ± 1) mm für die Massebestimmung zugeschnitten und mit der Analysewaage gewogen. Die Gläser wurden mit mikrobiell aktiver Komposterde gefüllt. In jedes Glas wurde ein Zellstoff-Teststreifen von (25 ± 1) mm x (25 ± 1) mm Größe zur Kontrolle der mikrobiellen Aktivität der Komposterde und der verschiedenen Proben beigelegt. Die Eingrabbtiefe betrug in jedem Glas $7 \pm 0,5$ cm, welche der Mitte des Glases entsprach. Die präparierten Gläser wurden in einen Raum mit konstanter Temperatur von 18 ± 1 °C gelagert. Um ein Austrocknen der Komposterde zu verhindern, wurde diese regelmäßig befeuchtet. Die Bodenfeuchte wurde mit dem Bodenfeuchtmessgerät in einem zusätzlichen Testglas bestimmt, überprüft und schließlich reguliert. Nach der Probeentnahme aus den Gläsern erfolgte ihre Reinigung mit einem Pinsel, um eine Verfälschung der Masse zu vermeiden. Der Ermittlung der Massedifferenz (siehe Tabelle 4) wurde mit der Formel $\Delta m = m_{\text{nachher}} - m_{\text{vorher}}$ berechnet. Der daraus resultierende Betrag entsprach dem Masseverlust. Des Weiteren

⁸ Vgl. DIN EN ISO 846:2020-11.

erfolgte die visuelle Beurteilung des Abbaugrades durch eine Notenvergabe (siehe Tabelle 2) sowie dessen lichtmikroskopischer Einschätzung.

2.5 Versuch E

Aufgabe:

Ziel der Untersuchung war die Bestimmung der bakteriellen Filterleistung von drei der vier Vliesproben. Dabei sollte die aus den Ergebnissen des Versuch B resultierende Hypothese, dass die Proben 4, 5 und 6, wie herkömmliche Gesichtsmasken, eine Filterleistung $\geq 95\%$ haben, geprüft werden. Das Testverfahren wurde durch das HTTI durchgeführt. Im Ergebnis dieser Teiluntersuchung soll letztlich bestimmt werden, welche Versuchsproben als medizinische Gesichtsmaske geeignet ist.

Geräte und Materialien:

BFE-Prüfgerät (siehe Abb. 32); Baumwollvlies in einer Größe von 10x10 cm; Probe 5 in einer Größe von 10x10 cm; Probe 6 in einer Größe von 10x10 cm; Brutschrank; Bakterium *Staphylococcus aureus*; Gas, dem das Bakterium *Staphylococcus aureus* zugeführt wird; Wachstumsmedium (Agar); Wasser

Durchführung:

Die bakterielle Filterleistung der Proben wurde mit dem BFE-Test ermittelt. Um die Filterleistung eines Vlieses zu bestimmen, wurde die jeweilige Probe zwischen eine Aerosolkammer und eine Kaskadenaufprallvorrichtung eingespannt. Ein mit dem Bakterium *Staphylococcus aureus* angereichertes Gas wurde unter Vakuum durch die Materialprobe in die Kaskadenvorrichtung geleitet. Die konstante Durchflussrate des Gases betrug 28,3 l/min. Die Kaskadenaufprallvorrichtung besteht aus sechs Kaskadenstufen, die jeweils für definierte Partikelgrößen durchlässig sind (Tab. 11). Zwischen den Kaskadenstufen befindet sich je eine Petrischale mit einem Wachstumsmedium (Agar). Im Brutschrank wurden die Petrischalen für 24 Stunden bebrütet. Anschließend wurden die KBE ausgezählt und mit der sogenannten "Positive Hole Conversion"-Tabelle umgerechnet. Die Verteilung der kultivierten Bakterien folgt hierbei der *Gaußschen Glockenverteilung*. *Medizinische Gesichtsmasken des Typ I* müssen mindestens eine Filterleistung von 95 % aufweisen, und *Typ II-Masken* eine Filterleistung von mindestens 98 %.⁹

3 Ergebnisse

In der nachfolgende Tabelle 1 sind die Proben anhand ihrer Materialzusammensetzung aufgelistet.

Tabelle 1: Bezeichnung und Identifikation der Prüfkörper

Probenbezeichnung	Gepprüftes Material
Probe 1	Äußere Schicht der medizinischen Gesichtsmaske aus Polypropylen
Probe 2	Mittlere Schicht der medizinischen Gesichtsmaske aus Polypropylen
Probe 3	Innere Schicht der medizinischen Gesichtsmaske aus Polypropylen
Probe 4	Bakteriencellulose-Vlies
Probe 5	Spinnvlies aus Celluloseacetat auf Baumwollgewebe
Probe 6	Nassvlies aus 70 % Cellulose und 30 % Polymilchsäure

⁹ Vgl. <https://www.nelsonlabs.com/testing/bacterial-viral-filtration-efficiency-bfe-vfe/>.

3.1 Versuch A

Tabelle 2: Versuch B - licht- und rasterelektronenmikroskopische Untersuchung - Faserdurchmesser d der Proben

Nr.d.M.	Probe 1: d in μm	Probe 2: d in μm	Probe 3: d in μm	Probe 4: d in μm	Probe 5: d in μm	Probe 6: d in μm
1	23,71	2,68	24,79	$37,22 \cdot 10^{-3}$	9,77	32,24
2	24,33	3,90	20,49	$31,90 \cdot 10^{-3}$	14,29	29,81
3	22,78	5,82	21,46	$43,39 \cdot 10^{-3}$	9,57	29,73
	23,61	4,13	22,25	$37,5 \cdot 10^{-3}$	11,21	30,59

Während das Vlies, aus 50 % CE und 50 % PLA bestehend, sehr löchrig und nicht stabil verbunden war, wies das Vlies, bestehend aus 30 % CE und 70 % PLA, die dichteste und gleichmäßigste Struktur aller Mischverhältnisse auf. Durch den etwas größeren PLA-Anteil war es möglich, die CE-Fasern zusammenzuschmelzen und eine größere Vliesstabilität zu erreichen. Das Vlies 3 CE: 7 PLA eignete sich auf Grund seiner Struktur und seines Verbundes für die Herstellung einer medizinischen Gesichtsmaske. Das Vlies, bestehend aus 10 % CE und 90 % PLA, wies hingegen keinen stabilen Verbund auf. Die PLA-Faser besaß eine glatte Oberfläche und durch den geringen CE-Anteil hafteten die Fasern nicht aneinander. Alle drei in diesem Verhältnis gemischten Vliesproben waren sehr löchrig, da sich die PLA-Fasern im *Pulper* nicht richtig voneinander getrennt hatten. Daher eignete sich das Mischungsverhältnis von 1 CE: 9 PLA nicht zur Herstellung einer medizinischen Gesichtsmaske; die Löcher von einer Größe bis zu 1 cm^2 wiesen keine Filterleistung auf. Nach dem Bügeln der Vliese war das PLA zu einer festen Platte geschmolzen, durch die es sich nicht atmen ließ. Die Herstellungsweise ermöglichte es nicht, identische Vliese zu erzeugen. Die Fasern wurden im *Pulper* zufällig gemischt und fielen unregelmäßig und willkürlich auf den Siebträger. In zukünftigen Untersuchungen muss geklärt werden, wie stark sich die Struktur bei der Herstellung der Vliese ändern kann und ob dies die Filterleistung beeinflusst. Nassvliese können weiter modifiziert werden, indem die Schnittlänge und Masse der Fasern verändert wird, oder das Fasermaterial mit einem flüssigen oder geschäumten Binder oder einer Bindefaser verstärkt werden. In Folgeuntersuchungen sollte daher geklärt werden, ob es ein geeigneteres Mischverhältnis gibt, mit dem die Filterleistung und der Verbund verbessert werden können.¹⁰

Fehlerbetrachtung:

Die Herstellung der Vliese erfolgte manuell in einer Versuchsmaschine und nicht in einer großtechnischen Anlage. Diese Vorgehensweise hat Einfluss auf die Vliesqualität. Durch die Herstellungsweise war es nicht möglich, identische Vliese zu erzeugen. Da je Mischverhältnis nur drei Vliese hergestellt wurden, sind allgemein gültige Aussagen über verschiedene Mischverhältnisse auf Grund der vorliegenden Versuchsanordnung nicht möglich.

¹⁰ Vortrag; Dr. Katrin Römhild, Projektleiterin Native Polymere Chemische Forschung TITK e.V..

3.2 Versuch B

Die Proben 1, 2 und 3 stammen aus einer medizinischen Gesichtsmaske. Bei der lichtmikroskopischen Betrachtung fiel auf, dass sich die mittlere Vliesschicht (Probe 2) bei einer 300-fachen Vergrößerung deutlich feiner und dichter darstellte als die äußeren Schichten (Probe 1 und 3). Dies bestätigte sich auch bei der Vermessung der Faserdurchmesser. Die äußeren Vliese besaßen Fasern in der gleichen Größenordnung von ungefähr 20 bis 25 μm , während das mittlere Vlies aus Fasern, die um den Faktor 5 dünner waren, bestand. Des Weiteren wurde erkennbar, dass die äußeren Vliese durch ein Spunbond *non-woven* Verfahren hergestellt wurden, da keine gewebten oder regelmäßigen Strukturen sichtbar waren. Die *Melting-Points* bestätigten, dass der Verbund der langen, gleichmäßig zylindrischen Fasern durch den Heißpressprozess erzielt wurden. Die Fasern in Probe 2 zeigten hingegen keine gleichmäßige Struktur. Außerdem entstand der Verbund durch die zuvor flüssigen endlosen Fasern, die typisch für das Meltblownverfahren waren. Die Proben 4 und 5 konnten lichtmikroskopisch nur mit der 100-fachen Vergrößerung beurteilt werden, da auf Grund der hohen Faserdichte zu wenig Licht die Proben durchdrang. Die in Probe 5 erkennbaren Fasern waren dabei nur ein Abdruck des darunterliegenden Vlieses, auf welches das CA aufgesponnen worden war. Beide Proben wurden daher einer weiteren rasterelektronischen Untersuchung unterzogen. Probe 4 zeigte dabei den dichtesten Verbund aller Vliese und einen Faserdurchmesser, der etwa um den Faktor 1 000 kleiner war als der der Fasern aus einer medizinischen Gesichtsmaske. Damit war die Probe 4 das feinste Vlies aller sechs Proben. Die Probe 5 wies eine gewebte Struktur, die von dem Baumwollvlies stammte, auf. Die dünnen unregelmäßigen Fasern waren das aufgesponnene CA, die in etwa der Größenordnung von Probe 1 bis 3 entsprachen. Diese waren ebenfalls in einem Spinnverfahren erzeugt worden. Die Probe 6 bestand aus zwei verschiedenen Faserarten, die ungerichtet im Raum lagen. Die dickere Faser war dabei eine CE- und die dünnere eine PLA-Faser. Beide Fasern lagen in der Größenordnung von Probe 1 und 3. Die REM-Aufnahme zeigte außerdem Regionen auf, in denen PLA-Fasern zu einer scheinbar homogenen Masse verschmolzen waren.

Fehlerbetrachtung:

Sowohl das elektronenmikroskopisch untersuchte Probenareal als auch die für die Messung verwendeten Fasern wurden zufällig ausgewählt. Um ein valides Ergebnis zu erlangen, müssen in zukünftigen mikroskopischen Untersuchungen weitere Vliesareale miteinander verglichen werden. Damit könnte auch die Hypothese, dass alle Vliese regelmäßig aufgebaut sind, zuverlässiger beurteilt werden.

3.3 Versuch C

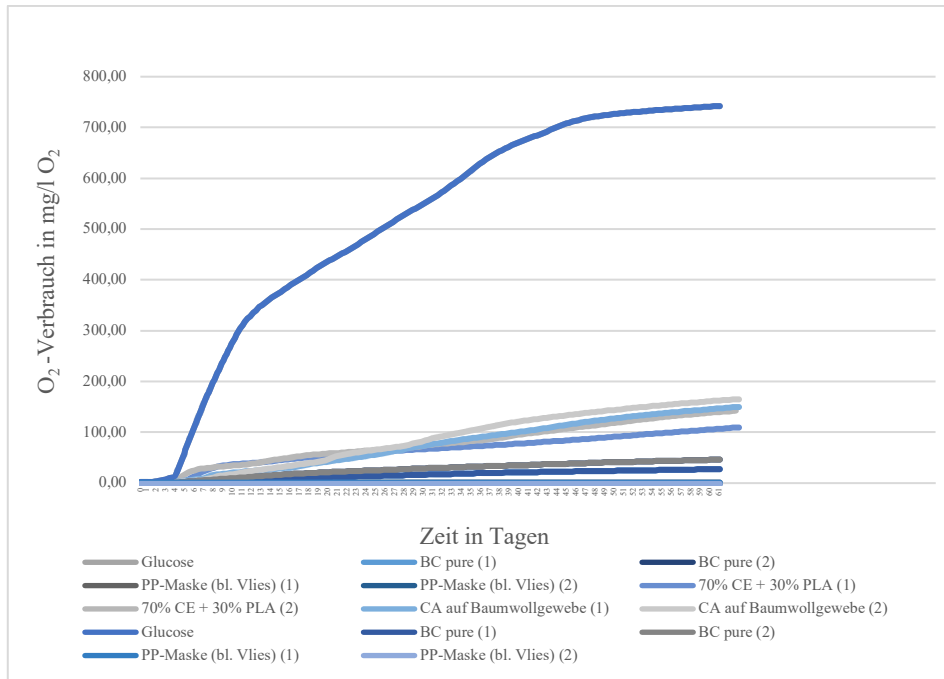


Abbildung 3: Versuch C – Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter Laborbedingungen – Messwerte im Sapromaten im Vergleich

Im ersten Durchgang der Messung unter Laborbedingungen wurde die Abbaubarkeit der Proben 1, 2, 3 und 4 geprüft. Die Proben 1, 2 und 3 wurden nicht separat auf ihre Abbaubarkeit untersucht, sondern als gesamter Maskenkörper. Es war deutlich feststellbar, dass die medizinische Gesichtsmaske nicht biologisch abgebaut wurde. Dies wurde auch durch den Abbaugrad von 0,03 % untermauert. Demgegenüber wurde die Probe 4 biologisch abgebaut. Allerdings betrug der Abbaugrad lediglich 3,11 %. Als Vergleichsprobe diente wiederum das Prüfmedium Glucose, das mit einem Abbaugrad von 69,66 % eine deutlich höhere biologische Abbaubarkeit aufwies. Daher kann geschlussfolgert werden, dass die medizinische Gesichtsmaske, wie bereits vermutet, nicht abbaubar ist. Die Probe 4 wies einen höheren Abbaugrad (3,11 %) auf, der Abbaugrad der Glucose betrug jedoch etwa das 23-fache. Im zweiten Durchgang wurden die Proben 5 und 6 auf ihre *Bioabbaubarkeit* untersucht. Wie bereits auf Grund der Literaturrecherche vermutet wurde, waren beide Proben biologisch abbaubar. Die Probe 5 wies einen Abbaugrad von 13,16 % auf und Probe 6 von 10,13 %. Die Proben 5 und 6 besaßen somit einen deutlich höheren Abbaugrad als Probe 4. Die Glucose wurde erneut als Vergleichsprobe herangezogen, ihr Abbaugrad belief sich auf 54,53 %. Zusammenfassend ließ sich feststellen, dass die Proben 4, 5 und 6 biologisch abbaubar sind. Damit wurde die Vermutung der Literaturrecherche bestätigt, dass diese biologisch abbaubar sind. Des Weiteren konnten verschiedene Abbautendenzen herausgefiltert werden. Probe 5 wies den höchsten Abbaugrad von 13,16 % auf, der etwa viermal höher war als der von Probe 4 (3,11 %). Die Probe 6 besaß einen etwa dreimal so großen Abbaugrad (10,13 %) wie Probe 4.

Fehlerbetrachtung:

Es muss kritisch angemerkt werden, dass bei diesem Versuch keine gleichen Bedingungen bezüglich der Mikroorganismen-Verteilung zwischen den einzelnen geschlossenen Systemen herrschte. Infolgedessen konnten unterschiedliche Abbaugrade resultieren. Zudem gab es bei dem zweiten

Durchgang einen Stromausfall, bei dem die Messung unterbrochen wurde und möglicherweise fehlerhafte Werte gemessen wurden. Weiterhin gliederte sich dieser Versuch in zwei Durchgänge, woraus unterschiedliche Bedingungen resultierten, beispielsweise bezüglich der Mikroorganismen oder des Zeitfensters. Im ersten Durchgang erfolgte eine Messung in einem Zeitraum von nur 61 Tagen, während der zweite Durchgang 63 Tage dauerte. Glucose diente als Referenzmedium zur Überprüfung des Erfolgs des biologischen Abbaus. Da sich beim Abbaugrad der Glucose ebenfalls Schwankungen von circa 15 % beobachten ließen, bedarf es in zukünftigen Untersuchungen einer größeren Anzahl von Messreihen zur biologischen Abbaubarkeit, um valide Aussagen treffen zu können.

3.4 Versuch D

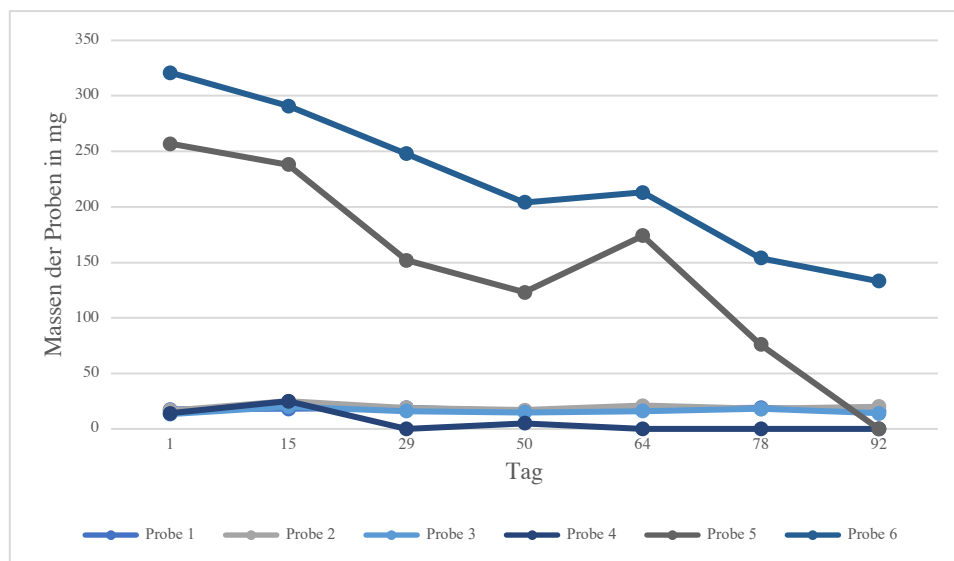


Abbildung 4: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Kompostversuch

Wie schon zuvor vermutet, konnte bei den Proben 1 bis 3 (Abb. 32, 33, 34, 35) kein Materialverlust beobachtet werden. Das Ergebnis bestätigte somit, dass die Proben auf Grund ihres chemischen Aufbaus nicht biologisch abbaubar sind. Bei den Proben 4 bis 6 war hingegen ein Materialverlust deutlich erkennbar (Abb. 32, 36, 37, 38). Dieser betrug bei der Probe 6 sogar 100 %. Besonders auffällig war die Massezunahme, die zwischen der ersten Messung und der vorherigen Grundmessung der Proben auftrat (Abb. 40). Vermutlich war die Ursache dieser Massezunahme das Wasserhaltevermögen der Proben. Vor dem Experiment wurden alle Proben trocken gelagert. Nach dem Eingraben wurden sie einer Bodenfeuchte ausgesetzt, die bei *hygroskopischen* Proben dazu führte, dass sie Wasser banden und damit auch an Masse zunahmen. Bei Probe 4 beispielsweise trat eine Massezunahme von 160 % auf. Wie im Theorieteil ausgeführt (siehe Kapitel 3.2.4), kann BC sehr viel Wasser binden. Das Wasserhaltevermögen der Proben wurde außerdem durch die Bodenfeuchte beeinflusst. Wie Abbildung 39 zeigt, war diese während des Experiments nicht konstant, weshalb davon ausgegangen werden konnte, dass sich der Wassergehalt der Proben und damit die Masse ebenfalls geändert hatte. Der gewählte Versuchsaufbau war für die Untersuchung von BC nicht geeignet. Die BC hatte sich innerhalb von drei bis sieben Tagen abgebaut, weshalb die Periode der Messungen auf 24 h verändert wurde. Außerdem wurde der Versuch mehrfach durchgeführt: Zuerst war die Probe oberhalb und unterhalb mit Erde umgeben, im folgenden Versuch nur noch von unten. Dadurch konnte man den Abbauprozess

auch optisch beobachten. Für zukünftige Versuche mit BC sollte eine genauere Analysewaage mit einer Fehlergrenze von beispielsweise 0,01 mg gewählt werden, um den Masseverlust genauer zu dokumentieren. Des Weiteren sollte man den Versuch mit mehreren Testreihen durchführen, um den Mittelwert über mehrere Proben bilden zu können. Der Versuch wurde nach 92 Tagen abgebrochen, da der Teststreifen aus Zellulose nicht mehr in allen Gläsern gleichmäßig abgebaut wurde. Daher konnte davon ausgehen werden, dass die Erde nicht mehr mikrobiell aktiv war.

Fehlerbetrachtung:

Die Gläser wurden mit kompostierter Erde gleichen Ursprungs gefüllt. Dennoch war nicht auszuschließen, dass eine unterschiedliche Zusammensetzung der Pilz- und Bakterienkulturen in den Gläsern vorlag. Wie anhand der variierenden Messwerte des Bodenfeuchtigkeitmessgerätes beobachtet werden konnte (Abb. 39), waren die Umgebungseinflüsse wie die Temperatur nicht konstant. Insofern konnte davon ausgegangen werden, dass die biologische Abbaubarkeit in allen Gläsern nicht gleich schnell abgelaufen war. Bei den Proben handelte es sich, wie im Kapitel 3 beschrieben, um wasserunlösliche Polymere. Es war daher ausgeschlossen, dass der Masseverlust aus einer Faserauflösung entstand. Der Faserdurchmesser lag, wie in Protokoll B ausgeführt, im Nanometerbereich. Technisch war sehr schwierig, die Komposterde auf Fasern zu untersuchen, die nicht abgebaut wurden, sondern sich aus dem Vlies durch einen Verbundverlust gelöst hatten. Die Fehlergrenze der Analysewaage wurde vom Hersteller mit $\pm 0,1$ mg angegeben. Dies entsprach einem relativen Fehler von 0,04 % bis 1,85 %, sodass Bestimmung des Masseverlustes mehr oder weniger fehlerbehaftet war. Besonders auffällig war das Messergebnis zwischen den Ausgangsproben und den Erdproben. Es zeichnete sich, wie in Tabelle 4 gezeigt, eine eindeutige Zunahme der Masse von bis zu 70 % ab, die das Wasserhaltevermögen der Proben zurückzuführen war. Da BC im Gegensatz zu PP auf Grund der chemischen Struktur mehr Wasser aufnehmen und halten konnte, war die Gewichtszunahme erklärbar. Dieser systematische Fehler beeinflusst die Messungen erheblich. Ein zufälliger Fehler ist hingegen der Wassergehalt in der Erde, der von Umwelteinflüssen wie der Temperatur beeinflusst wurde. Schlussfolgernd war daher festzustellen, dass eine genaue Bestimmung des Masseverlustes mit dem vorliegenden Versuchsaufbau nicht möglich war.

3.5 Versuch E

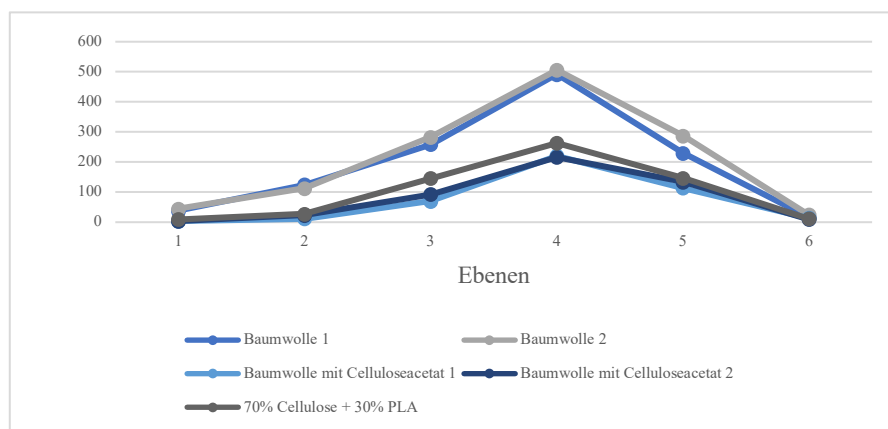


Abbildung 5: Versuch E - Beurteilung der Filterleistung – Bakterielle Filterleistung im Vergleich

Zwei Versuche zur Filterleistung wurden mit den Proben Baumwolle sowie Baumwolle mit CA durchgeführt. Die Abweichungen in den Werten hatten verschiedene Ursachen wie die

unterschiedlichen Faserdichten des auf gesponnenen CA. Die Ebenen 1-6 bezeichneten die verschiedenen *Kaskadenstufen*. Die in der Tabelle 3 dargestellten Werte wurden bereits mit Hilfe der "Positive Hole Conversion"-Tabelle umgerechnet. Die Baumwollprobe wies die niedrigsten Werte der KBE bei Ebene 6 und die höchsten bei Ebene 4 auf. Die gesamte KBE bei Baumwolle 1 betrug 1 158 Einheiten und entsprach demnach einer Filterleistung von 48 %. Baumwolle 2 hatte eine Gesamt-KBE von 1 258 Einheiten und eine bakterielle Filterleistung von 43 %. Die durchschnittliche Filterleistung des Baumwollgewebes konnte mit 45,5 % angenommen werden. Das Baumwollgewebe mit CA sowie das Vlies mit 70 % CE- und 30 % PLA-Anteil erzielten ihre maximale KBE-Rate bei Ebene 4 und die geringste bei Ebene 1. Bei der Baumwollprobe mit CA 1 wurden insgesamt 464 KBE ermittelt, was einer bakteriellen Filterleistung von 79 % entsprach. Die Gesamtzahl von 478 KBE wurde bei der Baumwollprobe mit CA 2 festgestellt, was einer Filterleistung von 78 % entsprach. Die durchschnittliche bakterielle Filterleistung betrug damit 78,5 %. Das Nassvlies aus 70 % CE und 30 % PLA kam auf eine Gesamt-KBE von 604 und hatte somit eine Filterleistung von 73 %. Anhand dieser Werte war zu erkennen, dass das Baumwollgewebe mit CA eine deutlich höhere bakterielle Filterleistung als ein reines Baumwollgewebe aufwies. Die Steigerung der Filterleistung lag dabei bei circa 23 %. Das Baumwollgewebe mit CA hatte mit 78,5 % die beste bakterielle Filterleistung der getesteten Proben. Die zweitbeste Filterleistung mit 73 % wies das Mischvlies aus 70 % CE und 30 % PLA auf, gefolgt von dem reinen Baumwollgewebe mit 45,5 %. Demzufolge erzielte keine der geprüften Proben die erforderliche bakterielle Filterleistung von ≥ 95 %, die für medizinische Gesichtsmasken vorgegeben ist. Die aus der licht- und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung resultierende Hypothese, dass die Proben 4, 5 und 6 wie herkömmliche Gesichtsmasken eine Filterleistung ≥ 95 % haben, konnte durch diesen Versuch demnach nicht bestätigt werden. Aufgrund der deutlichen Steigerung der Filterleistung gegenüber einem reinen Baumwollgewebe ist jedoch der Ansatz gegeben, über weitere wissenschaftliche Arbeiten neue Filtermaterialien auf der Grundlage dieser Untersuchungen zu entwickeln. Ein Ansatz wäre wie bei nicht biologisch abbaubaren Masken üblich, verschiedene Materialien miteinander zu kombinieren, um so die Filterleistung zu steigern. Mit den von uns geprüften Proben wären zum Beispiel Kombinationen aus Baumwollgewebe mit CA oder 70 % CE und 30 % PLA als Innenvlies und je eine Schicht Baumwollgewebe als Außenschichten denkbar. Diese Kombinationen sollten Gegenstand späterer Untersuchungen sein. Eine weitere Möglichkeit wäre es zum Beispiel, die Schichtdicke von CA-Fasern auf dem Baumwollgewebe zu erhöhen und die Rissbildung durch Zusatzstoffe zu minimieren und damit die Filterleistung zu verbessern. Auch die Mischvliesprobe mit 70 % CE und 30 % PLA kann weiter, zum Beispiel über eine bessere Durchmischung der Fasern oder Verwendung von unterschiedlichen Schnittlängen der Fasern bei der Vliesherstellung, optimiert werden.

Fehlerbetrachtung:

Da das angewandte Prüfverfahren mit einem hohen Kostenaufwand verbunden ist, konnten lediglich drei Versuchsproben im HTTI untersucht werden. Von Probe 1, 2 und 3, die den Schichten einer herkömmlichen medizinischen Gesichtsmaske entsprechen, lagen uns bereits die bakteriellen Filterleistungen von 95 % bis 98 % vor. Von Probe 4 konnten wir auf Grund unserer begrenzten finanziellen Mittel keine 10x10 cm große Versuchsprobe erhalten, so dass diese nicht getestet wurde. Daher sind keine Daten zur bakteriellen Filterleistung dieser Probe verfügbar. Neben der Probe 5 und 6 wurde ein reines Baumwollgewebe getestet, um die mögliche Steigerung der Filterleistung durch den Auftrag von CA auf Baumwolle nachweisen zu können. Da das CA mit dem Spinnfaserverfahren auf

das Baumwollgewebe aufgetragen wurde, war dieses teilweise ungleichmäßig verteilt und an einigen Stellen rissig. Die Filterleistung der 10x10 cm großen getesteten Probenbereich ab und kann somit leichte Schwankungen aufweisen. Für Probe 6 sind PLA- und CE-Fasern durchmischt worden und als Vlies abgelegt worden. Hierbei kann das Mengenverhältnis von PLA- und CE-Fasern je nach getestetem Bereich abweichen, so dass die Abweichungen in der Filterleistung Zustandekommen können.

4 Auswertung

Das Ziel dieser Arbeit war es, den chemischen Aufbau und die Herstellung von Vliesen aus synthetischen und natürlichen Polymeren zu untersuchen. Anhand dieser Untersuchungen sollte beurteilt werden, ob sich die ausgewählten Vliese aus natürlichen Polymeren als Alternative für medizinische Gesichtsmasken eignen. In den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit wurde deutlich, dass der chemische Aufbau von Polymeren und die Herstellungsweise von Vliesen das Abbau- und Filterverhalten dieser beeinflusste. Für die Vliese einer nicht biologisch abbaubaren medizinischen Gesichtsmaske (Probe 1, 2 und 3) wurde die Hypothese aufgestellt, dass PP als synthetisches Polymer nicht biologisch abbaubar ist. Diese Hypothese wurde verifiziert, da die Abbaubarkeit im Sapromaten lediglich 0,03 % betrug und im Kompostiersuch ebenfalls keine Tendenz zur biologischen Abbaubarkeit festgestellt wurde. In der mikroskopischen Untersuchung wurde beobachtet, dass die mittlere Schicht (Probe 2) einen um Faktor fünf geringeren Faserdurchmesser im μm -Bereich als die sie umgebenden Schichten aufwies. Da diese Schicht durch die Literatur als die Hauptfilterschicht bezeichnet wurde, konnte davon ausgegangen werden, dass der Faserdurchmesser einen wesentlichen Einfluss auf die Filterleistung eines Vlieses hatte. Die Filterleistung medizinischer Gesichtsmasken beträgt nach der Medizinprodukte-Verordnung¹¹ mindestens 95 %, welcher den Referenzwert der folgenden Proben darstellte. Für die BC (Probe 4) wurde die Hypothese aufgestellt, dass die BC als natürliches Polymer biologisch abbaubar ist. Diese Hypothese wurde bestätigt, da die Abbaubarkeit im Sapromaten 3,11 % betrug und im Kompostiersuch eine Abbaubarkeit von 100 % innerhalb von drei bis sieben Tagen vorlag. In der mikroskopischen Untersuchung konnte ermittelt werden, dass der Faserdurchmesser im nm-Bereich lag. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Probe 1, 2 und 3 wurde vermutet, dass das Vlies eine Filterleistung über 95 % besaß. Diese Hypothese konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüft werden. Für das Baumwollgewebe mit CA (Probe 5) wurde basierend auf der Literaturrecherche die Hypothese aufgestellt, dass dieses als natürliches Polymer biologisch abbaubar ist. Die Hypothese wurde bestätigt, da die Abbaubarkeit im Sapromaten unter Laborbedingungen 13,16 % betrug und im Kompostiersuch eine Tendenz zur Abbaubarkeit innerhalb von 13 Wochen nachgewiesen wurde. In der mikroskopischen Untersuchung konnte festgestellt werden, dass sich der Faserdurchmesser im μm -Bereich bewegte. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Probe 1, 2 und 3 konnte die Vermutung aufgestellt werden, dass das Vlies die gleiche Filterleistung besaß. Diese Hypothese wurde widerlegt, da die ermittelte Filterleistung 78 % bis 79 % betrug. Eine mögliche Ursache dafür waren die verschiedenen Vliesstrukturen, die aus den unterschiedlichen Herstellungsverfahren resultierten. Im Gegensatz zur Probe 2, die mit dem Meltblown-Verfahren erzeugt

¹¹ Vgl.

https://www.bfarm.de/SharedDocs/Risikoinformationen/Medizinprodukte/DE/schutzmasken_sonderzulassung.html

wurde, basierte die Probe 5 auf dem Web- und Spinnvliesverfahren. Darüber hinaus wurde die hohe Filterleistung der medizinischen Gesichtsmaske durch drei Vliesschichten erzielt und konnte daher nicht zum direkten Vergleich der Filterleistung von Probe 5 herangezogen werden. Des Weiteren konnte auf Grund des Herstellungsverfahrens der CA-Beschichtung nicht gewährleistet werden, dass die CA-Menge gleichmäßig aufgetragen wurde. Deshalb konnte die Filterleistung an den verschiedenen Stellen der Vliesfläche variieren. Für das Mischvlies aus 70 % CE- und 30 % PLA-Fasern (Probe 6) wurde aus der Literaturrecherche die Hypothese formuliert, dass das Mischvlies aus natürlichen Polymeren biologisch abbaubar war. Die Hypothese wurde bestätigt, da die Abbaubarkeit im Sapromaten unter Laborbedingungen 10,13 % betrug und im Kompostiersuch eine Tendenz zur Abbaubarkeit innerhalb von drei Tagen festgestellt wurde. In der mikroskopischen Untersuchung konnte festgestellt werden, dass der Faserdurchmesser im μm -Bereich lag. Verglichen mit den Ergebnissen von Probe 1, 2 und 3 konnte die Vermutung aufgestellt werden, dass das Vlies eine gleiche Filterleistung besaß. Diese Hypothese wurde widerlegt, da die ermittelte Filterleistung nur 73 % betrug. Ursächlich dafür könnte eine andere Vliesstruktur der Probe 6 gewesen sein. Im Gegensatz zu Probe 2, die mit dem Meltblown-Verfahren hergestellt wurde, erfolgte die Herstellung der Probe 6 mit dem Nassvliesverfahren. Die Fasern wurden bei diesem Herstellungsverfahren lediglich gelegt, was zu einer ungleichmäßigen Verteilung dieser führte. Zudem wird die hohe Filterleistung der medizinischen Gesichtsmaske durch drei Vliesschichten erzielt und konnte dementsprechend nicht als direkter Vergleichswert für die Filterleistung der Probe 6 dienen. Unsere Forschungsfrage lässt sich mit diesen Ergebnissen wie folgt beantworten:

1. Die getesteten Vliesproben eignen sich auf Grund ihres chemischen Aufbaus und ihrer Herstellungsweise nicht als biologisch abbaubare Alternativen zu medizinischen Gesichtsmasken, weil sie keine ausreichenden Filterleistungen aufweisen.
2. Alle getesteten Vliesproben erfüllen die gewünschte Eigenschaft der biologischen Abbaubarkeit.
3. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur der chemische Aufbau der Fasern unter dem Mikroskop sowie die Herstellung des Vlieses betrachtet. Diese Parameter sind jedoch nicht ausreichend, um die biologische Abbaubarkeit und Filterleistung der Vliesproben vollständig und allgemeingültig zu erklären. Eine solche Untersuchung hätte sowohl den Rahmen der Arbeit als auch die methodischen Kompetenzen überschritten.
4. Der Versuch zur biologischen Abbaubarkeit wurde nicht bis zum vollständigen Abbau der Vliese durchgeführt. Es kann somit nur die Tendenz zur biologischen Abbaubarkeit bestimmt werden. Diese lässt jedoch keine Aussage über das zukünftige Abbauverhalten der Vliesproben zu.
5. Da nur eine beschränkte Auswahl an natürlichen Polymeren untersucht wird, können aus den Ergebnissen nur empirische Schlussfolgerungen und keine allgemeingültigen Aussagen zur Eignung natürlicher Polymere als Alternativen zu medizinischen Gesichtsmasken getroffen werden.
6. In der vorliegenden Arbeit wird jeweils nur eine Vliesschicht bezüglich ihrer Faserstruktur, Filterleistung und biologischen Abbaubarkeit als Alternative zur medizinischen Gesichtsmaske, die aus drei Schichten besteht, untersucht.
7. Zukünftige Studien sollten verschiedene Kombinationen von Vliesschichten untersuchen, um den Forderungen an medizinischen Gesichtsmasken gerecht zu werden. Die Auswahl weiterer

natürlicher Polymere sollte kriterienorientiert erfolgen. Dabei sollten die chemischen Eigenschaften der natürlichen Polymere, denen der synthetischen Polymere ähneln.

8. Die Hypothese, dass die Eigenschaften der Vliese aus natürlichen Polymeren, denen aus synthetischen Polymeren entsprechen, sollte dabei überprüft werden.
9. Da die Kriterien der biologischen Abbaubarkeit und Filterleistung nur zwei Parameter für die Zulassung medizinischer Gesichtsmasken sind, müssen weiterführend auch Merkmale wie die Hautverträglichkeit und die antibakteriellen Eigenschaften beurteilt werden. Sollte nach weiteren Forschungen eine geeignete Alternative für nicht biologisch abbaubare Masken gefunden sein, erfolgt das Zulassungsverfahren (siehe Anhang S. 44f.).

Obwohl mit der vorliegenden Arbeit keine geeignete Alternative zu nicht biologisch abbaubaren medizinischen Gesichtsmasken gefunden werden konnte, sollten sich zukünftige Forschungen auf Basis dieser Erhebungen der Suche nach einer biologisch abbaubaren Alternative annehmen, um Infektionsschutz und Umweltschutz zugunsten der Menschen in Einklang zu bringen.

5 Fehlerbetrachtung

Die Auswahl der Vliesproben erfolgte nicht nach zuvor festgelegten Kriterien, sodass der Versuchsaufbau nicht für alle Proben geeignet war. Ein Beispiel dafür stellte im Versuch D das BC-Vlies dar, welches sich auf Grund der geringen Masse und der feinen Faserstruktur mit den uns zur Verfügung stehenden Mitteln ungenau messen lies. Die für medizinische Gesichtsmasken festgelegte Filterleistung von $\geq 95\%$ basierte auf der Kombination von drei Vliesschichten. In der vorliegenden Seminarfacharbeit wurden die biologisch abbaubaren Referenzproben lediglich als einzelne Filterschichten betrachtet. Daher waren die ermittelten Werte nicht vergleichbar. Die Forschungsfrage konnte mit den von uns durchgeführten Experimenten nicht vollständig beantwortet werden, da weitere Zulassungskriterien wie die *Zytotoxizität* und Atmungsaktivität nicht betrachtet wurden. Darüber hinaus sollte berücksichtigt werden, dass es sich bei den hergestellten Versuchsproben um Filtervliese und nicht um verkaufsfähige Gesichtsmasken handelt.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit sollte untersucht werden, ob sich Vliese aus natürlichen Polymeren als eine Schicht in einer biologisch abbaubaren medizinischen Gesichtsmaske eignen können. Es wurden drei Vliese aus einer herkömmlichen medizinischen Gesichtsmaske als Vergleichsproben untersucht, welche aus PP-Fasern bestanden und mit dem Meltblownverfahren oder dem Elektrospleinverfahren hergestellt wurden. Des Weiteren wurden drei Vliese aus natürlichen Polymeren untersucht. Das erste Vlies bestand aus BC und wurde durch das Bakterium *Acetobacter xylinum* hergestellt. Das zweite Vlies bestand aus einem Baumwollgewebe auf welches CA-Fasern mit dem Elektrospleinvliesverfahren aufgesponnen wurde. Das dritte Vlies bestand aus 70% CE-Fasern und 30% PLA-Fasern und wurde durch das Nassvliesverfahren hergestellt. In der Arbeit wurden die Eigenschaften des räumlichen Aufbaus, der biologischen Abbaubarkeit und der Filterleistung der Proben betrachtet. Es konnte festgestellt werden, dass die Eigenschaften eines Vlieses abhängig von dem chemischen Aufbau der Fasern sowie der Herstellungsweise der Vliese sind. Die These, ob die untersuchten Vliesproben sich als biologisch abbaubare Alternativen zu medizinischen Gesichtsmasken eignen, konnte widerlegt werden.

Literaturverzeichnis

Zeitschriften und wissenschaftliche Artikel

Campos, R. K.; Jin, J.; Rafael Grace H.; Zhao, M.; Liao, L.; Simmons, G.; Chu, S.; Weaver, S., C.; Chiu, W.; Cui, Y.: Decontamination of SARS-CoV-2 and Other RNA Viruses from N95 Level Meltblown Polypropylene Fabric Using Heat under Different Humidities. In: ACS Nano. 2020. Seite 1.

Genbo, X.; Ren, Z. J.: Preventing masks becoming the next plastic problem. In: Front. Environ. Sci. Eng. o.O. 2021.

Internetquellen

Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte: Hinweise für Hersteller, Importeure und Vertreiber zur Sonderzulassung von medizinischen Gesichtsmasken sowie partikelfiltrierenden Halbmasken (FFP2 und FFP3), https://www.bfarm.de/SharedDocs/Risikoinformationen/Medizinprodukte/DE/schutzmasken_sonderzulassung.html. besucht am: 02.12.2022

Nelson Labs A Sotera Health company: Bacterial and Viral Filtration Efficiency (BFE/VFE), <https://www.nelsonlabs.com/testing/bacterial-viral-filtration-efficiency-bfe-vfe/>. besucht am: 02.12.2022

Oluniji, O. F.; Elvis, D. O.: Covid-19 face masks: A potential source of microplastic fibers in the environment, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7297173/>. besucht am: 02.12.2022

Selutec Steuer-, Elektro-, Labor-, und Umwelttechnik: Respirometer von SELUTEC GmbH Umwelttechnik – Respirometer, <https://www.selutec.de/umwelttechnik/respirometer.php>. besucht am 14.02.2022

Andere:

DIN EN ISO 846:2020-11.

Vortrag; Karl, N., Aufbau eines BFE-Prüfgeräts, HTTI.

Vortrag; Römhild, K., Funktionsweise eines Sapromaten, TITK Rudolstadt e.V.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Versuchsgefäße vor Eingrabung der Versuchsproben.....	4
Abbildung 2: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Gefüllte Versuchsgefäße mit eingegrabenen Versuchsproben	4
Abbildung 3: Versuch C – Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter Laborbedingungen – Messwerte im Sapromaten im Vergleich	8
Abbildung 4: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Kompostiersversuch	9

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezeichnung und Identifikation der Prüfkörper - 5 -
Tabelle 2: Versuch B - licht- und rasterelektronenmikroskopische Untersuchung - Faserdurchmesser d der Proben - 6 -

Unterstützungsleistung

Dr. Christina Walther, Projektleiterin des Schülerforschungszentrums Jena, hat uns bei der Erstellung unserer Arbeit unterstützt. Sie hat uns die Materialien für den Versuch zur biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen sowie Räumlichkeiten zur Versuchsdurchführung zur Verfügung gestellt und Kontakte vermittelt.

Dr. Katrin Römhild, Projektleiterin Native Polymere Chemische Forschung, Thüringischen Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung Rudolstadt e. V., Rudolstadt, hat uns bei der Erstellung unserer Arbeit unterstützt. Sie half uns bei der Auswahl der natürlichen Polymere sowie der Herstellung und Zusammenstellung der Vliese.

Nadja Karl, Product Manager Biomedical, Hohenstein Laboratories GmbH & Co. KG, Boenningheim, hat uns bei der Erstellung unserer Arbeit unterstützt. Sie half uns bei der Prüfung der Filterleistung der Vliesproben.

Steffi Stumpf, Dipl.-Biol., Institut für Organische Chemie und Makromolekulare Chemie, Jena, hat uns bei der Erstellung unserer Arbeit unterstützt. Sie half uns bei der Durchführung der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung der Vliesmaterialien.

Dr. Andreas Koschella, Chemiker, Institut für Organische Chemie und Makromolekulare Chemie, Jena, hat uns bei der Erstellung unserer Arbeit unterstützt. Er half uns bei chemischen Verständnisfragen und organisierte das Bakteriencellulose-Vlies.

Anhang

1 Versuch B – Lichtmikroskopische Aufnahmen der Vliese.....	- 17 -
2 Versuch B - REM-Aufnahmen der Vliese.....	- 18 -
3 Versuch D – Messwerte.....	- 19 -
4 Versuch D – Lichtmikroskopische Dokumentation des Zersetzungsprozesses.....	- 23 -
5 Abbildungsverzeichnis	- 28 -
6 Tabellenverzeichnis	- 29 -

1 Versuch B – Lichtmikroskopische Aufnahmen der Vliese

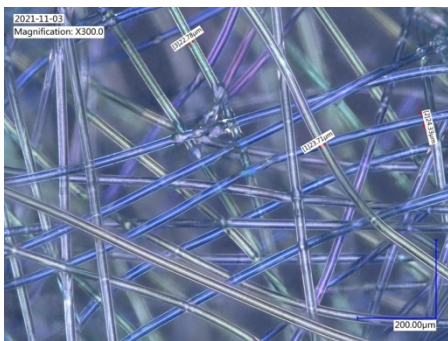


Abb. 1: Versuch B - Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 1 bei 300-facher Vergrößerung

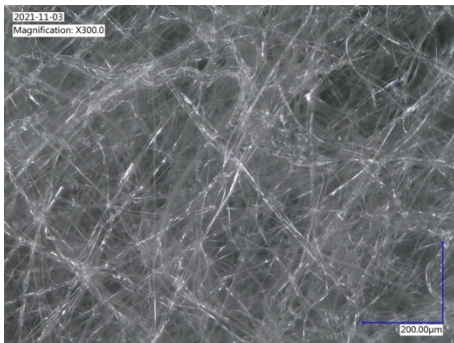


Abb. 2: Versuch B - Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 2 bei 300-facher Vergrößerung

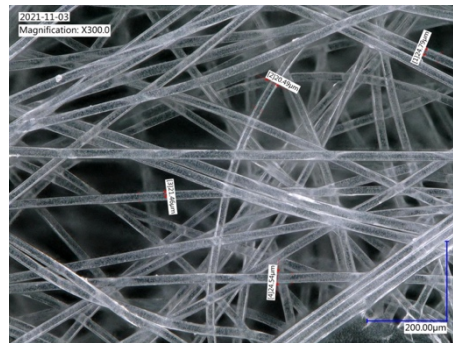


Abb. 3: Versuch B - Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 3 bei 300-facher Vergrößerung

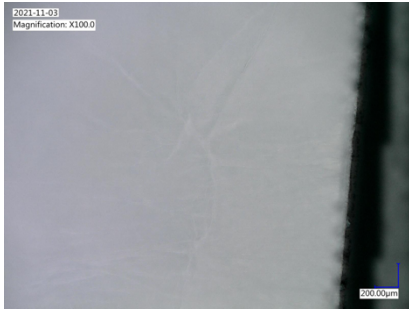


Abb. 4: Versuch B - Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 4 bei 100-facher Vergrößerung

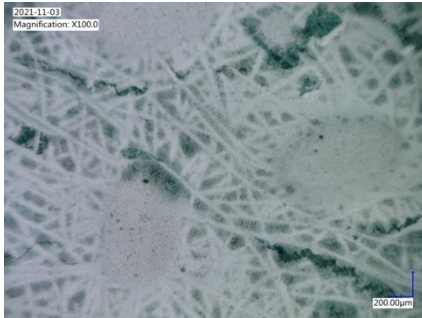


Abb. 5: Versuch B - Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 5 bei 100-facher Vergrößerung

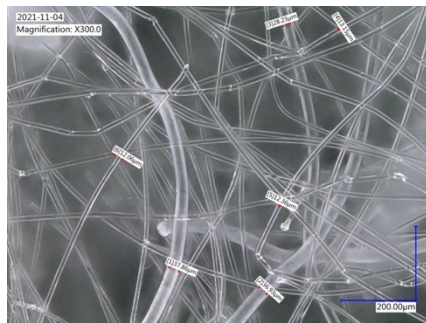


Abb. 6: Versuch B Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 6 bei 300-facher Vergrößerung

2 Versuch B - REM-Aufnahmen der Vliese

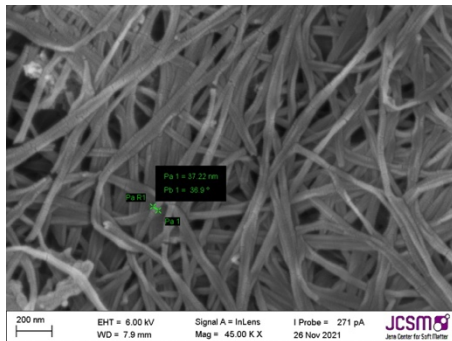


Abb. 7: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 4 bei 45 000-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 7,9 mm

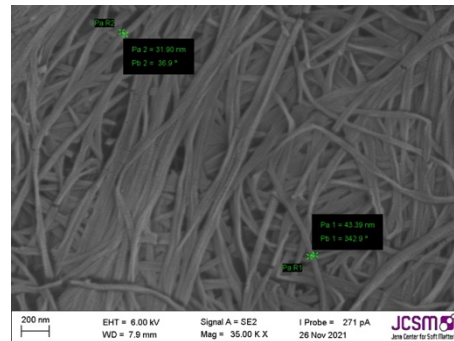


Abb. 8: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 4 bei 35 000-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 7,9 mm

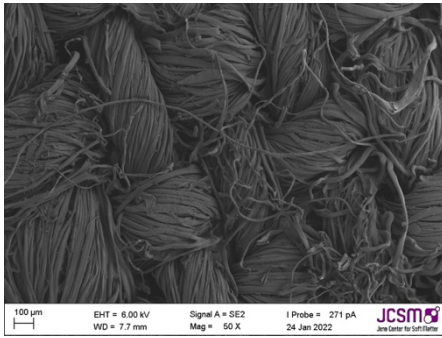


Abb. 9: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 5 bei 50-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 7,7 mm

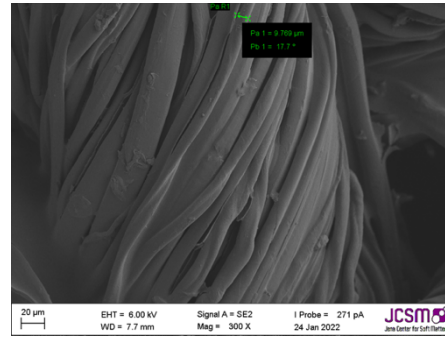


Abb. 10: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 5 bei 300-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 7,7 mm

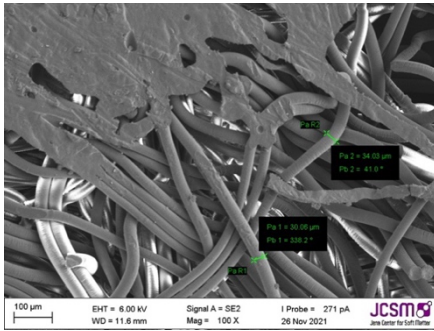


Abb. 11: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 6 bei 100-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 11,6 mm

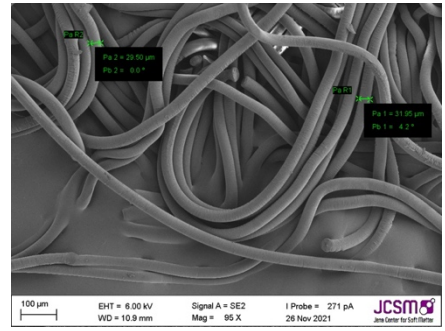


Abb. 12: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 6 bei 95-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 10,9 mm

3 Versuch D – Messwerte

Tab. 1: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Noten zur visuellen Bewertung der Proben

Note	Bewertung
1	Eine Veränderung ist weder mit dem Mikroskop noch mit bloßem Auge erkennbar.
2	Eine Veränderung ist mit dem Mikroskop deutlich erkennbar jedoch nicht mit bloßem Auge.
3	Eine Veränderung ist sowohl mikroskopisch als auch mit bloßem Auge deutlich erkennbar.

Tab. 2: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Ausgangsmasse der Proben

Nr. d. M.	mp 1 (in mg)	mp 2 (in mg)	mp 3 (in mg)	mp 4 (in mg)	mp5 (in mg)	mp 6 (in mg)	mZellstoff (in mg)
1	13	15	14	6	158	188	37
2	14	16	14	5	158	190	36
3	16	16	15	7	157	188	34

4	15	14	13	5	157	188	36
5	15	17	14	4	157	186	35
\bar{m}	14,6	15	14	5,4	157,4	188	35,6

Tab. 3: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Massedifferenzen in %

Tag	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6
1	119,86	110,00	95,00	259,26	163,28	170,75
15	123,29	166,67	142,86	462,97	151,21	154,79
29	130,14	126,67	114,29	92,59	96,57	131,92
50	109,59	113,33	107,14	-	78,15	108,51
64	123,29	140,00	114,29	-	111,82	113,3
78	130,29	120,00	128,57	-	48,28	81,92
92	109,59	133,33	100	-	-	70,75

Probe 1:

Tab. 4: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 1

Tag	Datum	Bodenfeucht e-differenz (in hPa)	\bar{m} Probe (in mg)	Visuelle Beurteilung - Probe	\bar{m} Test (in mg)	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 1	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 2
1	05.01.22	-	17,5	1	112	3	3
15	19.01.22	-100	18	1	37	3	3
29	02.02.22	-150	19	1	45	3	3
50	23.02.22	-280	16	1	48	3	3
64	09.03.22	-300	18	1	59	3	3
78	23.03.22	-250	19	1	60	3	3
92	06.04.22	-240	16	1	77	3	3

Probe 2:

Tab. 5: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 2

Tag	Datum	Bodenfeucht e-differenz (in hPa)	\bar{m} Probe (in mg)	Visuelle Beurteilung - Probe	\bar{m} Test (in mg)	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 1	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 2
1	05.01.22	-	16,5	1	103	3	3

15	19.01.22	-100	25	1	-	3	3
29	02.02.22	-150	19	1	76	3	3
50	23.02.22	-280	17	1	56	3	3
64	09.03.22	-300	21	1	-	3	3
78	23.03.22	-250	18	1	46	3	3
92	06.04.22	-240	20	1	105	3	3

Tab. 6: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 3

Tag	Datum	Bodenfeuchte-differenz (in hPa)	\bar{m} Probe (in mg)	Visuelle Beurteilung - Probe	\bar{m} Test (in mg)	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 1	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 2
1	05.01.22	-	13,3	1	99	3	3
15	19.01.22	-100	20	1	65	3	3
29	02.02.22	-150	16	1	67	3	3
50	23.02.22	-280	15	1	-	3	3
64	09.03.22	-300	16	1	59	3	3
78	23.03.22	-250	18	1	44	3	3
92	06.04.22	-240	14	1	83	3	3

Tab. 7: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 4

Tag	Datum	Bodenfeuchte-differenz (in hPa)	\bar{m} Probe (in mg)	Visuelle Beurteilung - Probe	\bar{m} Test (in mg)	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 1	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 2
1	05.01.22	-	14 oder -	1	108	3	3
Neuer Versuch Tag 1	19.01.22	-100	25		34	3	3
14	02.02.22	-	-	3	-	3	3
Neuer Versuch Tag 1	02.02.22	-	5		67	3	3
12	14.02.22			3	-	3	3

Tab. 8: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 5

Tag	Datum	Bodenfeuchte-differenz (in hPa)	\bar{m} Probe (in mg)	Visuelle Beurteilung - Probe	\bar{m} Test (in mg)	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 1	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 2
1	05.01.22	-	257	1	151	3	3

15	19.01.22	-100	238	2	81	3	3
29	02.02.22	-150	152	2	67	3	3
50	23.02.22	-280	123	2	45	3	3
64	09.03.22	-300	174	2	-	3	3
78	23.03.22	-250	76	3	-	3	3
92	06.04.22	-240	-	-	82	3	3

Tab. 9: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 6

Tag	Datum	Bodenfeuchte-differenz (in hPa)	\bar{m} Probe (in mg)	Visuelle Beurteilung - Probe	\bar{m} Test (in mg)	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 1	Visuelle Beurteilung des Teststreifens 2
1	05.01.22	-	321	1	165	3	3
15	19.01.22	-100	291	1	-	3	3
29	02.02.22	-150	248	3	-	3	3
50	23.02.22	-280	204	3	55	3	3
64	09.03.22	-300	213	3	59	3	3
78	23.03.22	-250	154	3	45	3	3
92	06.04.22	-240	133	3	76	3	3

Messwerte Versuch E

Tab. 10: Versuch E - Beurteilung der Filterleistung - Kaskadenstufen und deren Partikeldurchlässigkeit

Kaskadenstufe	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Partikelgröße	7,00 µm	4,70 µm	3,30 µm	2,10 µm	1,10 µm	0,65 µm

Tab. 11: Versuch E - Beurteilung der Filterleistung - Messwerte Versuch E

Probe	Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Ebene 5	Ebene 6	KBE gesamt	Filterleistung in %
Baum-wolle 1	38	124	258	492	230	16	1158	48
Baum-wolle 2	45	113	283	506	287	24	1258	43
Baum-wolle mit CA 1	4	12	70	220	114	14	464	79
Baum-wolle mit CA 2	4	23	92	216	134	9	478	78
70 % CE + 30 % PLA	9	27	146	263	147	12	604	73

4 Versuch D – Lichtmikroskopische Dokumentation des Zersetzungsprozesses

Probe 1:

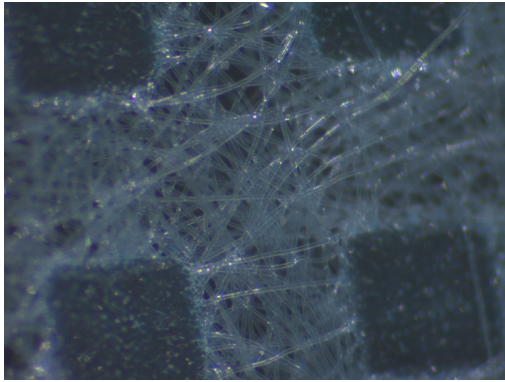


Abb. 13: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Probe 1 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes

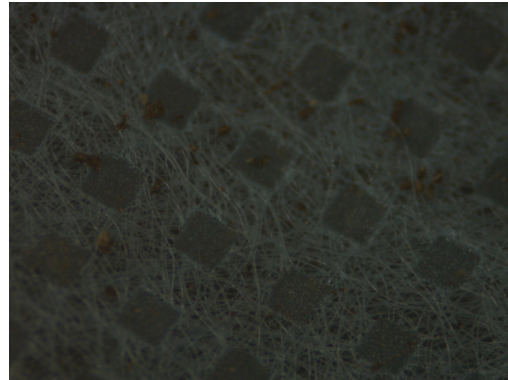


Abb. 14: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 1 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 09.03.22

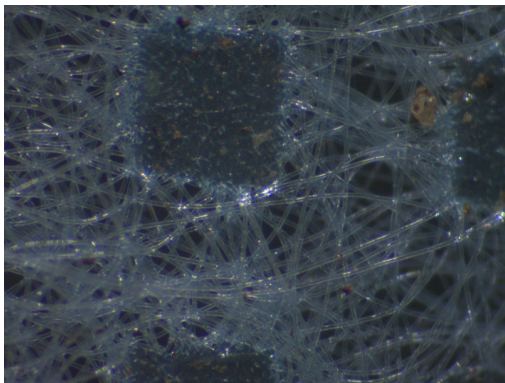


Abb. 15: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 1 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 02.02.22

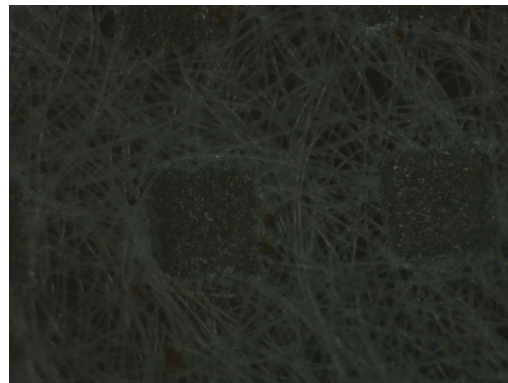


Abb. 16: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 1 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 06.04.22

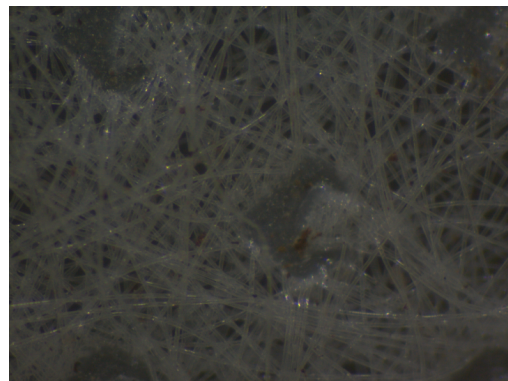


Abb. 17: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 1 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 27.04.22

Probe 2:

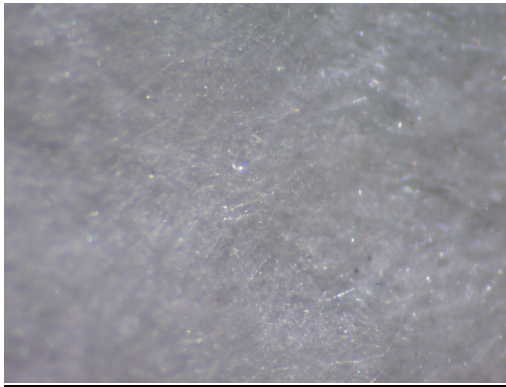


Abb. 18: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 2 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes

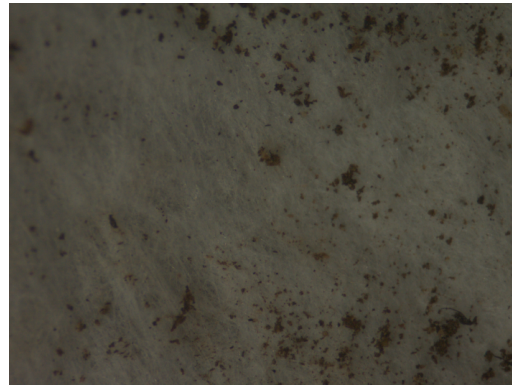


Abb. 19: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 2 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 09.03.22

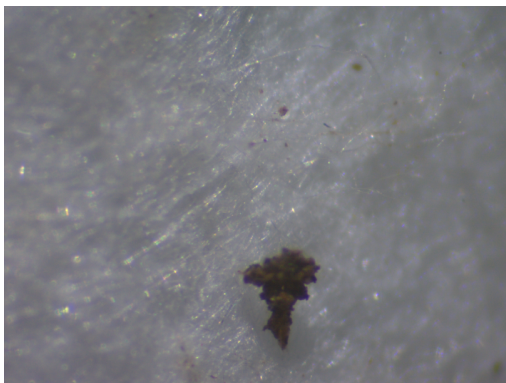


Abb. 20: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 2 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 02.02.22

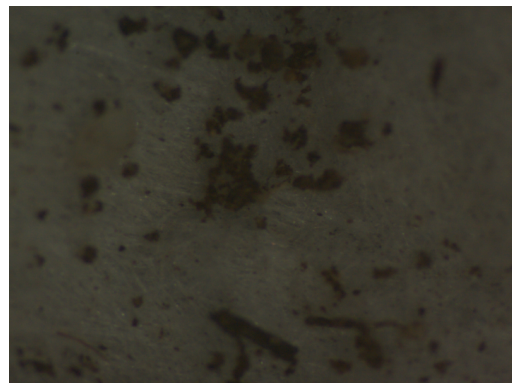


Abb. 21: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 2 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 06.04.22



Abb. 22: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 2 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 27.04.22

Probe 3:

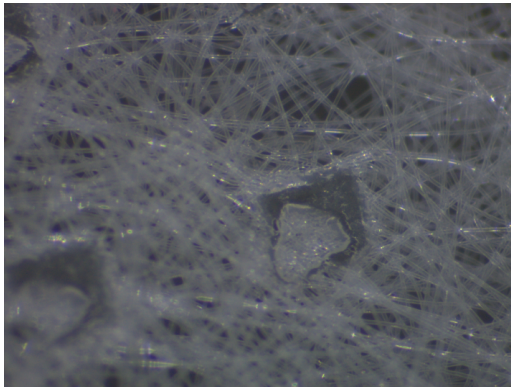


Abb. 23: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 3 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes

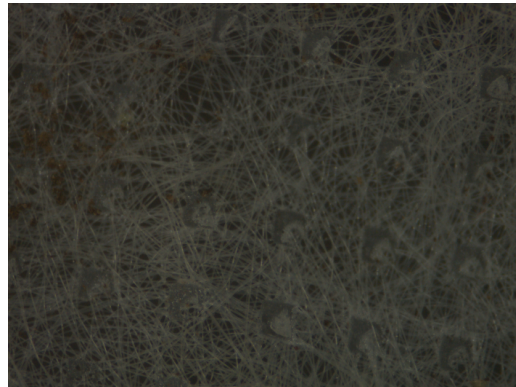


Abb. 24: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 3 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 09.03.22

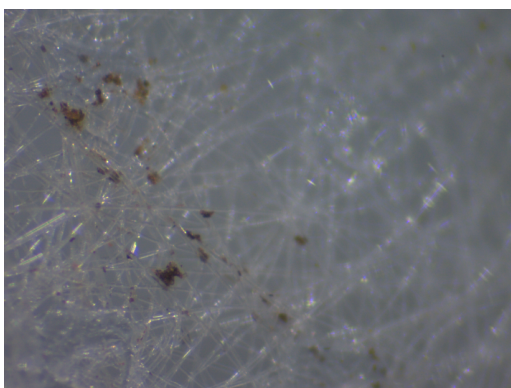


Abb. 25: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 3 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 02.02.22

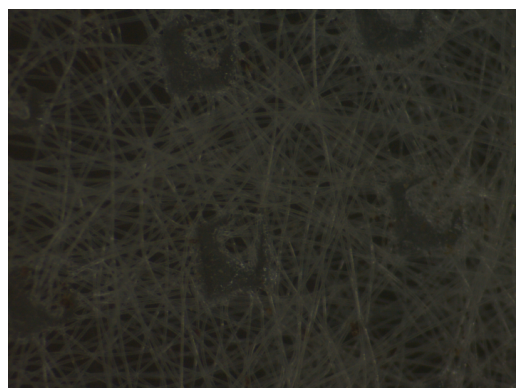


Abb. 26: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 3 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 06.04.22

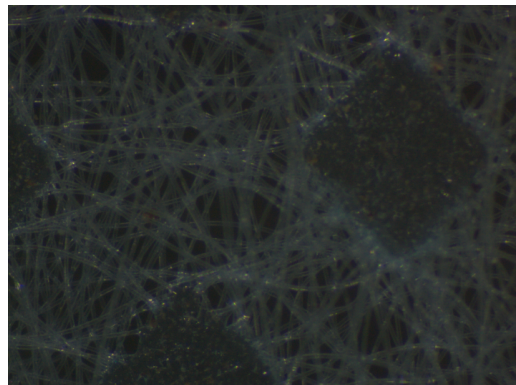


Abb. 27: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 3 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 27.04.22

Probe 4:

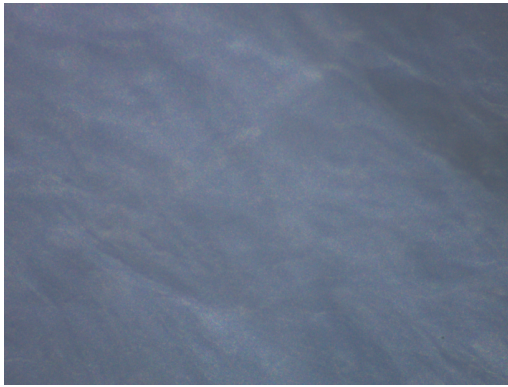


Abb. 28: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 4 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes

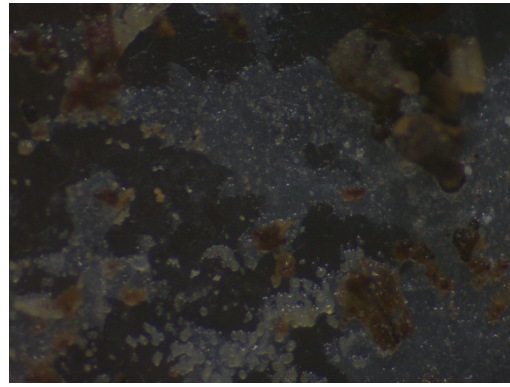


Abb. 29: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 4 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 14.02.22

Probe 5:

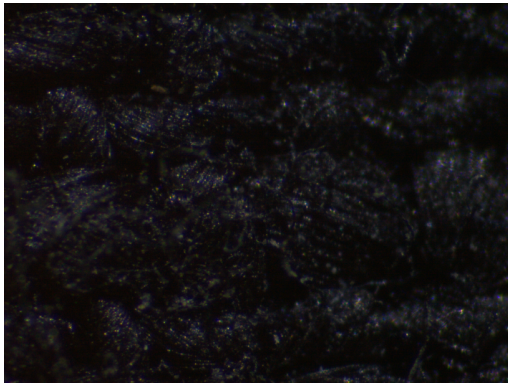


Abb. 30: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 5 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes

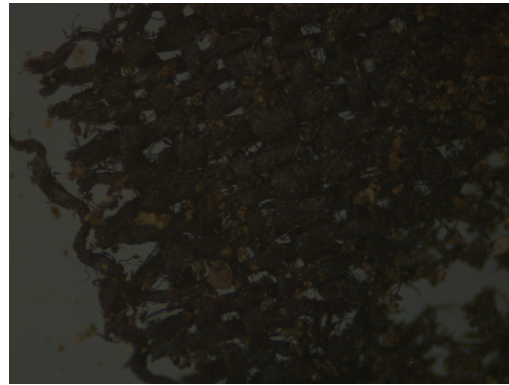


Abb. 31: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 5 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 09.03.22



Abb. 32: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 5 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 02.02.22



Abb. 33: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 5 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 23.03.22

Probe 6:

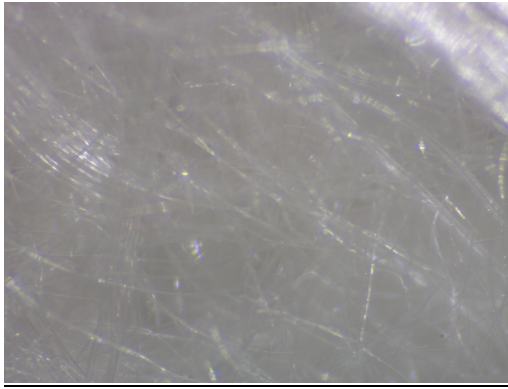


Abb. 34: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes

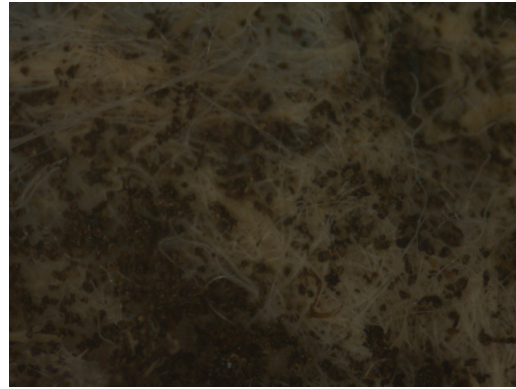


Abb. 35: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 09.03.22

Abb. 36: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 23.03.22

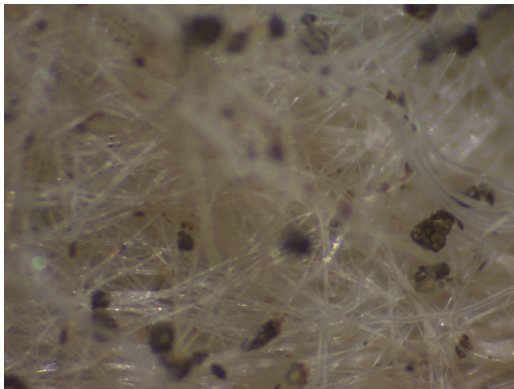


Abb. 37: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 02.02.22



Abb. 38: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 06.04.22

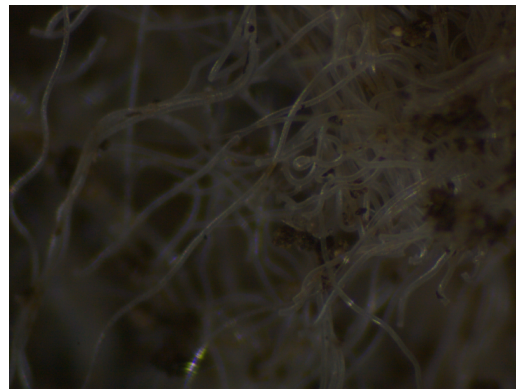


Abb. 39: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 27.04.22

5 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Versuch B - Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 1 bei 300-facher Vergrößerung	17 -
Abb. 2: Versuch B - Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 2 bei 300-facher Vergrößerung	17 -
Abb. 3: Versuch B - Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 3 bei 300-facher Vergrößerung	17 -
Abb. 4: Versuch B - Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 4 bei 100-facher Vergrößerung	18 -
Abb. 5: Versuch B - Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 5 bei 100-facher Vergrößerung	18 -
Abb. 6: Versuch B Lichtmikroskopische Aufnahme - Probe 6 bei 300-facher Vergrößerung	18 -
Abb. 7: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 4 bei 45 000-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 7,9 mm	18 -
Abb. 8: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 4 bei 35 000-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 7,9 mm	18 -
Abb. 9: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 5 bei 50-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 7,7 mm	19 -
Abb. 10: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 5 bei 300-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 7,7 mm	19 -
Abb. 11: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 6 bei 100-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 11,6 mm	19 -
Abb. 12: Versuch B - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme - Probe 6 bei 95-facher Vergrößerung und Arbeitsabstand von 10,9 mm	19 -
Abb. 13: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Probe 1 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes	23 -
Abb. 14: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 1 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 09.03.22.....	23 -
Abb. 15: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 1 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 02.02.22.....	23 -
Abb. 16: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 1 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 06.04.22.....	23 -
Abb. 17: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 1 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 27.04.22.....	23 -
Abb. 18: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 2 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes	24 -
Abb. 19: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 2 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 09.03.22.....	24 -
Abb. 20: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 2 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 02.02.22.....	24 -
Abb. 21: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 2 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 06.04.22.....	24 -
Abb. 22: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 2 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 27.04.22.....	24 -

Abb. 23: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 3 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes	- 25 -
Abb. 24: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 3 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 09.03.22.....	- 25 -
Abb. 25: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 3 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 02.02.22.....	- 25 -
Abb. 26: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 3 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 06.04.22.....	- 25 -
Abb. 27: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 3 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 27.04.22.....	- 25 -
Abb. 28: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 4 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes	- 26 -
Abb. 29: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 4 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 14.02.22.....	- 26 -
Abb. 30: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 5 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes	- 26 -
Abb. 31: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 5 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 09.03.22.....	- 26 -
Abb. 32: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 5 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 02.02.22.....	- 26 -
Abb. 33: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 5 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 23.03.22.....	- 26 -
Abb. 34: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 – Lichtmikroskopische Aufnahme des Ausgangszustandes	- 27 -
Abb. 35: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 09.03.22.....	- 27 -
Abb. 36: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 23.03.22.....	- 27 -
Abb. 37: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 02.02.22.....	- 27 -
Abb. 38: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 06.04.22.....	- 27 -
Abb. 39: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Probe 6 - Lichtmikroskopische Aufnahme des Zustandes am 27.04.22.....	- 27 -

6 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Noten zur visuellen Bewertung der Proben	- 19 -
Tab. 2: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Ausgangsmasse der Proben.....	- 19 -

Tab. 3: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen - Massedifferenzen in %.....	- 20 -
Tab. 4: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 1	- 20 -
Tab. 5: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 2	- 20 -
Tab. 6: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 3	- 21 -
Tab. 7: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 4	- 21 -
Tab. 8: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 5	- 21 -
Tab. 9: Versuch D - Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit unter natürlichen Bedingungen – Messwerte Probe 6	- 22 -
Tab. 10: Versuch E - Beurteilung der Filterleistung - Kaskadenstufen und deren Partikeldurchlässigkeit	- 22 -
Tab. 11: Versuch E - Beurteilung der Filterleistung - Messwerte Versuch E	- 22 -