Schlussbericht
zum Verbundvorhaben

Thema:

„DegraFib“ - Gezielte Steuerung der biologischen Abbaubarkeit von Filamentgarnen durch Änderung der Filamentquerschnitts-geometrie und der Polymerkristallinität

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. – Fraunhofer UMSICHT

Teilvorhaben 2: Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 22023618

Teilvorhaben 2: 2219NR213

Laufzeit:

01.10.2019 – 30.09.2020

Monat der Erstellung:

12/2020

Veröffentlichung:

10. Juni 2021

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Schlussbericht

I. Ziele

I.1 Aufgabenstellung

I.1.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse, Nebenergebnisse, Erfahrungen

Durch den weltweit zunehmenden Einsatz von Kunststoffen werden nachhaltiges und ressourceneffizientes Handeln und der Aufbau einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe immer wichtiger. Um diese Ziele zu erreichen, ist es in einigen Anwendungsbereichen, wo Produkte in die Umwelt gelangen und dort verbleiben sollen, sinnvoll, biologisch abbaubare Kunststoffe einzusetzen. In vielen dieser Anwendungen werden Textilien eingesetzt, beispielsweise Mulchvliese oder Geotextilien zur Bewehrung von Böschungen. Während der Nutzungsdauer müssen die Werkstoffe die geforderten technischen Eigenschaften in vollem Umfang erfüllen und sollen anschließend vollständig biologisch abbauen. Das Vorhaben „DegraFib“ untersuchte Möglichkeiten zur gezielten Steuerung der biologischen Abbaubarkeit von Filamentgarnen über die Gestaltung der verfügbaren Oberfläche.

Gemeinsam mit dem Projektpartner Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen (ITA) wurden nach ausführlichen Literaturrecherchen und eigenen Erfahrungen des Konsortiums Polymilchsäure (PLA) und Polybuthylensuccinat (PBS) als geeignete Polymere für das Schmelzspinnverfahren eruiert. Nach der Ermittlung geeigneter Verarbeitungsparameter im Schmelzspinnprozess für die ausgewählten Biopolymere wurden Multifilamentgarne mit runden und profilierten (sternförmig, flach, kreuzförmig) Filamentquerschnitten zur Einstellung der verfügbaren Oberfläche hergestellt. Mit unterschiedlichen Wickelgeschwindigkeiten bei der Herstellung der Filamente wurden verschiedene Verstreckungsgrade, und damit die Kristallinität, der Filamente eingestellt.

Für die Untersuchung der Abbaubarkeit der vom ITA hergestellten Filamente wurden ein Desintegrationstest konzipiert. Herausforderung dabei war, die Filamente so zu testen, dass ein guter Kontakt zwischen Substrat und Filament und eine problemlose Probeentnahme langer Filamente gewährleistet werden konnte. Nach mehreren Optimierungsschritten konnte ein Test entwickelt werden, der die Anforderung erfüllt. Mit dem Test wurde der Einfluss der Filamentoberfläche und der Kristallinität bei konstanter Garnfeinheit auf die biologische Abbaubarkeit von Multifilamentgarnen untersucht. Ein Abbau bzw. die Alterung der Filamente kann mit dem Test festgestellt werden. Teilweise war die Charakterisierung der Filamente mittels mechanischer Prüfung nach der Alterung nicht mehr möglich.

Entgegen der Erwartungen führt eine größere Oberfläche der profilierten Filamente, im Vergleich zu den runden Filamenten bei gleicher Garnfeinheit, nicht zu einer Beschleunigung des Alterungsprozesses der Multifilamentgarne. Bei der optischen Untersuchung werden bei runden Filamenten, die mit einer niedrigen Geschwindigkeit gewickelt wurden, zuerst Abbauerscheinungen an der Oberfläche sichtbar. Die Veränderung der Zugfestigkeit durch die Alterung korreliert teilweise mit der Wickelgeschwindigkeit. Anhand der Auswertung der thermoanalytischen Untersuchung der Multifilamentgarne wird die Vermutung aufgestellt, dass Relaxationsvorgänge während der Hydrolyse auftreten. Die daraus resultierende stärkere Nahordnung führt zu einer geringeren Veränderung der Zugfestigkeit. Es wird zudem vermutet, dass eine insgesamt höhere Orientierung und eine gleichmäßigere Kristallstruktur bei den kreuzförmigen Filamenten zu einem langsameren Abbau führen. Es besteht demnach ein komplexer Zusammenhang zwischen dem Abbauverhalten und dem Filamentquerschnitt. Es wird vorgeschlagen in zukünftigen Arbeiten diese Wechselwirkungen durch zusätzliche Prüfmethoden mit zu berücksichtigen.

Aus den hergestellten PBS-Filamenten wurden am ITA erfolgreich Vliese mit einem Flächengewicht von ca. 300 g/m^2 hergestellt. In einem mit den Erfahrungen aus dem Desintegrationstest für Filamente entwickelten Desintegrationstest für Vliese wurde das Abbauverhalten der Vliese getestet.

Bei der optischen Untersuchung der Vliesproben nach 14 Tagen in Substratkontakt sind keine Abbauerscheinungen zu erkennen. Durch die Alterungsversuche nimmt die Zugfestigkeit und die Dehnung unabhängig von der Produktionsrichtung der Vliese ab. Die Vliese aus kreuzförmigen Filamenten weisen eine geringere Veränderung hinsichtlich der Zugfestigkeit und Dehnung auf als die Vliese aus runden Filamenten. Dies entspricht den Analyseergebnissen der Alterungsbeschreibung der Multifilamentgarne. Insgesamt nimmt die Zugfestigkeit der Vliese stärker ab als die Zugfestigkeit der zugehörigen Multifilamentgarne. Es wird vermutet, dass diese Unterschiede auf den Materialabbau und zusätzlich auf den veränderten Zusammenhalt innerhalb der Vliesproben nach Substratkontakt zurückzuführen sind. In diesem Projekt wurden am Institut für Textiltechnik zum ersten Mal Vliese aus PBS78 für Alterungsversuche hergestellt. Es wird vorgeschlagen in zukünftigen Arbeiten den Prozess der Vliesbildung weiter anzupassen.

I.1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben ist ein Kooperationsprojekt zwischen den beiden Forschungseinrichtungen Fraunhofer Institut für Umwelt- Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT und Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, die jeweils Kompetenzen in unterschiedlichen Bereichen aufweisen.

Das Fraunhofer Institut für Umwelt- Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT übernahm im Projekt federführend die Auswahl der biologisch abbaubaren Polymere nach Literaturrecherche und Polymercharakterisierung. Ferner unterstützte Fraunhofer UMSICHT das ITA bei der Untersuchung der Filamentoberfläche. Die Entwicklung und Durchführung des Prüfverfahrens für das Abbauverhalten von Mulitfilamentgarnen und Vliesen mit Substratkontakt war Aufgabe von Fraunhofer UMSICHT.

Das Institut für Textiltechnik übernahm alle Aufgaben, die die Filamententwicklung betrafen. Dazu gehörte einerseits die Bewertung biologisch abbaubarer Polymere im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit im Schmelzspinnprozess sowie die Definition von Anforderungskriterien an das Polymer. Andererseits wurden am ITA Filamente extrudiert, wobei das Polymer, die Faserquerschnittsgeometrie und der Verstreckgrad zur Einstellung der Kristallinität variiert wurden. Weiterhin übernahm das ITA die Untersuchung der Filamentgarne, insbesondere zur Charakterisierung der Oberflächengröße sowie der Zugfestigkeit. Zur Validierung der Ergebnisse auf Textilebene wurden darüber hinaus Vliese hergestellt, die ebenfalls hinsichtlich ihrer optischen und mechanischen Eigenschaften untersucht wurden.

Eine detaillierte Aufgabenverteilung zwischen den Forschungseinrichtungen ist dem folgendem Projektablauf zu entnehmen (Abb. I.1).

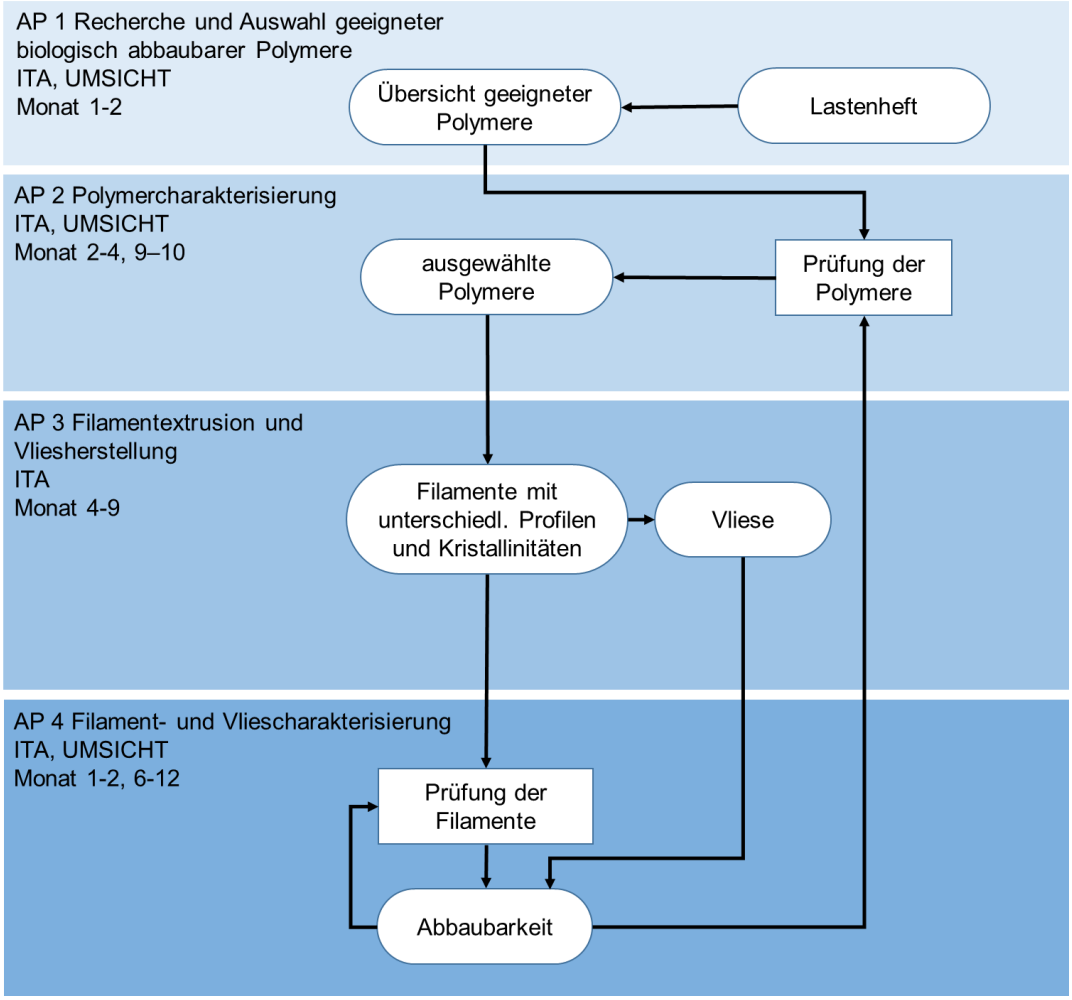


Abb. I.1: Projektablauf mit beteiligten Partnern, Formen bedeuten: ▭ Aufgaben im AP, ⬭ Teilergebnisse

I.2 Stand der Technik

Biobasierte und biologisch abbaubare Polymere

Im Fokus von „DegraFib“ stehen biologisch abbaubare, biobasierte Polymere für die Filamentherstellung. Als biologisch abbaubar wird ein Kunststoff dann bezeichnet, wenn er durch Mikroorganismen aerob in Kohlenstoffdioxid, Wasser, mineralische Salze und Biomasse bzw. anaerob in Kohlenstoffdioxid, Methan, mineralische Salze und Biomasse zersetzt werden kann. Dieser Vorgang hängt stark von den

Umgebungsbedingungen und den vorhandenen Mikroorganismen ab, wodurch keine allgemein gültige Aussage zur Abbaubarkeit getroffen werden kann, die für alle Umweltkompartimente gilt. In einer ausführlichen Literaturrecherche, die im Rahmen einer UBA-Studie [BPW+18] durchgeführt wurde, wurden Ergebnisse von biologischen Abbauprüfungen der verschiedenen kommerziell verfügbaren Biokunststoffe zusammengestellt.

Unter den Bedingungen einer industriellen Kompostierung (50 – 60 °C) werden TPS, Stärkeblends und PHA am schnellsten abgebaut (ca. 30 -45 Tage), gefolgt von PLA und den Polyestern PBAT[1]/PBST (60 – 80 Tage) [Bas98, DCL+08, KAS+07, KAN14]. Am längsten, mit bis zu 160 Tagen, benötigt PBS für einen vollständigen Abbau, was im Wesentlichen durch einen hohen Anteil kristalliner Struktur begründet wird [XG10].

In der Literatur sind kaum Ergebnisse zum biologischen Abbau von Kunststoffen unter Bedingungen der „Gartenkompostierung“, d.h. bei Temperaturen von maximal 30 °C, zu finden. Die Polymere PHA und fossil basierte aliphatische und aliphatisch-aromatische Polyester waren nach sechs bis sieben Monaten vollständig abgebaut. [GM13, SCC98]

Im Gegensatz zum industriellen Kompostierungsprozess mit thermophiler Phase erfolgt der Abbau von PLA in Kompost und Boden unter Umgebungsbedingungen (<30 °C) sehr langsam [OL06, TC06]. Die für den biologischen Abbau erforderliche Hydrolyse des Polymers erfolgt in erster Linie physikalisch-chemisch und wird beschleunigt durch höhere Temperaturen. Der amorphe Bestandteil gilt als leichter biologisch abbaubar als der kristalline Teil eines Polymers.

Im wässrigen Milieu zeigen einige Polymere deutlich schnellere Abbauzeiten im Vergleich zum Abbau in Boden. Im Süßwassermilieu sind thermoplastische Stärke, Stärkeblends und die Polymere PHA und PCL[1] gut abbaubar und werden innerhalb von vier bis acht Wochen mineralisiert. [Bas98, KAN14, MPC+06] PBS wird in etwa 3 Monaten abgebaut, das Co-Polymer PBSA sogar schneller [Sho15]. Bei PLA zeigt sich auch im Süßwasser die Temperaturabhängigkeit des biologischen Abbaus. Während bei 20 °C nach 180 Tagen kaum Abbau zu verzeichnen ist, ist PLA bei 60 °C nach 120 Tagen vollständig mineralisiert [IKS02]. Das Co-Polymer PBAT ist im wässrigen Milieu ebenfalls nur sehr langsam abbaubar.

Im Meerwassermilieu sind, ähnlich wie im Süßwasser, stärkebasierte Werkstoffe und die Polymere PHA und PCL gut abbaubar und im schnellsten Fall bereits nach 28 Tagen vollständig abgebaut [Lep17, TWS+12]. PLA und die Polyester PBS und PBAT werden dagegen nur langsam abgebaut [Lep17]. Zur Herstellung eines biologisch abbaubaren Treibnetzes wurde eine Faser erprobt, die aus einem Blend mit 82 % PBS und 18 % PBAT besteht [KKL+16]. Neben den Anwendungseigenschaften wurde die Zersetzung der Filamente mittels Elektronenmikroskopie untersucht. Hierbei war erst nach zwei Jahren eine beginnende Zersetzung der Filamentoberfläche zu erkennen. In Japan wurden Versuche zur Zersetzung von Filamenten aus den Polymeren PCL, PBS und PHA in Tiefseewasser an drei verschiedenen Standorten (321 bis 612 m Tiefe) durchgeführt [SSN+11]. Nach 12 Monaten waren die Proben aus PCL und PHA an allen Standorten brüchig bzw. waren vollständig zersetzt. Die PBS-Filamente zeigten deutliche Zersetzung an der Oberfläche.

Die biologische Abbaubarkeit von Kunststoffen hängt ab von

- den chemisch-physikalischen Bedingungen im Umweltkompartiment, [Gu03, Lam13, LSB14]
- Anzahl der Mikroorganismen und Zusammensetzung der mikrobiellen Population, [Gu03]
- dem eigentlichen Werkstoff, [Gu03]
- der Verfügbarkeit von Wasser, [Göp96]
- der zur Verfügung stehenden Oberfläche [CM06] sowie
- der Kristallinität des Materials. [KM13]

Der biologische Abbau von Kunststoffen beginnt grundsätzlich mit der Hydrolyse der Polymerketten in kleinere Fragmente, die von den Mikroorganismen durch die Zellmembran aufgenommen und im Stoffwechsel weiterverarbeitet werden. Die Hydrolyse erfolgt überwiegend enzymatisch, wobei die polymerspaltenden Enzyme als Exoenzyme von den Mikroorganismen aus den Zellen ausgeschieden werden und die Polymeroberfläche angreifen. Abiotische Prozesse (wie eine rein chemische Hydrolyse) können auch beteiligt sein. [BPW+18]

Die Abbaugeschwindigkeit wird stark von den polymerspezifischen Eigenschaften, im Speziellen von der Kristallinität des Kunststoffs und der chemischen Grundstruktur, bestimmt. Der Einfluss der Kristallinität auf die Wasserabsorption und die Abbaubarkeit von Biopolymerfolien und Spritzgussbauteilen wurde erfolgreich getestet [KM13, LOW+05]. Zunehmende Kristallinität führt zu einer Zunahme der Polymerdichte und zu einer engeren Packung der Molekülketten. Die amorphe Struktur verhält sich entgegengesetzt und bietet eine für Feuchtigkeit und Mikroorganismen offene Molekülstruktur, wodurch die Geschwindigkeit des biologischen Abbaus erhöht wird. [KM13, LOW+05] Ob durch dieses Phänomen auch die Geschwindigkeit der biologischen Abbaubarkeit von Filamenten beeinflusst wird, ist bisher noch nicht bekannt.

[1] nicht biobasiert

Aufgrund der Verarbeitungseigenschaften ist nur ein Teil der verfügbaren biobasierten Polymere für das Schmelzspinnverfahren geeignet. Die Filamentextrusion im Schmelzspinnprozess ist begrenzt auf Polymere, die gegenüber den Verarbeitungstemperaturen thermisch stabil sind und es somit im Prozess zu keiner Degradation kommt. Kommerziell verfügbar sind Filamente aus PLA [WWW18]. Schmelzgesponnene Filamente aus PLA, PEF, PBAT, PBS, PLA/PBS-Blends sind in verschiedenen Forschungsvorhaben erfolgreich hergestellt worden [AiF18, Dol13]. Li *et al.* konnten im Schmelzespinnverfahren erfolgreich Filamente aus PBST herstellen [LLY10]. PHA Filamente enthalten einen signifikanten Anteil von Spheruliten in der Polymermatrix [HMZ+13]. Bei ersten Versuchen mit PHAs erwies sich sowohl der Abbau während des Spinnprozesses als auch die Nachkristallisation nach dem Spinnprozess als Herausforderung. Nachkristallisation und Spherulite-Struktur in der Polymermorphologie der Filamente führen zu einer sehr hohen Sprödigkeit der Filamente [Eigene Arbeiten am ITA, Aachen].

Zusammenfassend zeigt Tab. I.1 eine Übersicht der kommerziell verfügbaren biobasierten und biologisch abbaubaren Polymere hinsichtlich des biobasierten Anteiles, biologischen Abbaus in den verschiedenen Umweltkompartimenten sowie Einschätzungen zur Schmelzpinnbarkeit, Filamenteigenschaften und Lebensmittelkonformität.

Tab. I.1: Übersicht der kommerziell verfügbaren biologisch abbaubaren, biobasierten Polymeren mit biobasiertem Anteil, Abbaueigenschaften, Einschätzungen zur Schmelzspinnbarkeit, Filamenteigenschaften und Lebensmittelkonformität [AAT98, BPW+18, GA13, KT17, LP11, Oka02, PPN+11, Shi16, VT09]

Polymer	biobasierter Anteil[+]	Biologischer Abbau	Schmelz-spinn-barkeit	Filament-eigen-schaften	Lebensmittel-konformität[+*]
Stärke-blends, TPS	30 - 100 %	Industrielle Kompostierung: ca. 90 % nach 1 - 2 Monaten Boden, 20 °C: ca. 90 % nach 2 Monaten Süßwasser, 20 °C: ca. 90 % nach 2 Monaten	-	--	ja
PLA	100 %	Industrielle Kompostierung: ca. 80 % nach 2 Monaten Boden, 20 °C: kein Abbau nach 11 Monaten Süßwasser, 20 °C: <10 % nach 6 Monaten	++	++	ja
PHA	100 %	Industrielle Kompostierung: ca. 90 % nach 2 - 3 Monaten Boden, 25/28 °C: 65-90% nach 5 bis 7 Monaten Süßwasser, 25 °C: > 80 % nach 1 Monaten Meerwasser, 25-28 °C: > 70 % nach 4 - 6 Monaten	-	-	ja
PBS	50 %	Industrielle Kompostierung: ca. 90 % nach 5 Monaten Boden, 25 °C: 15% nach 28 Tagen Süßwasser, 25 °C: 60 % nach 3 Monaten Meerwasser, 27 °C: < 4 % nach 28 Tagen	++	+	ja
PBST	38,5 %	Industrielle Kompostierung: > 80 % nach 2 - 3 Monaten	+	+	ja

++ sehr gut + gut o mittelmäßig – schlecht -- sehr schlecht
[+] Herstellerangaben
[*] teilweise nicht für alle Typen

Polymerfilamente

Für die Herstellung von Polymerfilamenten ist der Schmelzspinnprozess im Vergleich zu alternativen Spinnverfahren ein höchst produktiver Prozess mit dem Vorteil einer lösungsmittelfreien Verarbeitung. Zudem bietet das Schmelzspinnverfahren die Möglichkeit zum Spinnen von Filamenten mit variablem Querschnitt und unterschiedlicher Polymermorphologie. Bei der Filamentextrusion wird Polymergranulat in einem Extruder aufgeschmolzen, filtriert und mit Hilfe einer Spinnpumpe durch die Spinndüse gefördert. Nach dem Austritt aus der Düse werden die Filamente durch Luftanblasung abgekühlt. Im Anschluss an den Auftrag einer Avivage werden die Filamente, sofern eine hohe Orientierung der Molekülketten im Filament gefordert ist, über Galetten verstreckt und aufgewickelt. Um die Kristallinität von Profilfilamenten zu variieren, wird die Abkühlrate im Blasschaft (Blasluftgeschwindigkeit/-temperatur) und die Verstreckung über Galetten eingestellt. [GVW14]

Filamente mit einem unrunden Querschnitt werden als Profilfilamente bezeichnet. Erste Entwicklungsversuche im Jahr 1960 waren darauf ausgerichtet, den Glanz von Seide durch die Angleichung des Querschnittes von synthetischen Filamenten (hergestellt im Schmelzspinnprozess) an die Naturfasern zu imitieren. Um die Funktionalität und die Ästhetik von Chemiefilamenten zunehmend zu steigern, wurden weitere Querschnitte (z.B. flach, hohl, „snowflake“, Four Deep Groves „4DG“, etc.) entwickelt [TIK+01]. Weit verbreitet sind trilobale Filamente zur Nutzung von Glanzeffekten, hohle Filamente zur Verbesserung der Wärmeisolation und zur Verringerung des Gewichtes sowie flache Filamente, deren erhöhte Oberfläche zur Steigerung des Feuchtigkeitstransportes und einer damit verbundenen, höheren Atmungsaktivität in Sportbekleidung beiträgt [KKO+12]. Insbesondere bei Profilfilamenten, bei denen die Geometrie des Querschnittes den Grad der Funktionalität eines Textils bestimmt, ist das Schwellverhalten in der Filamentextrusion problematisch [JKO10].

Unter der Annahme, dass die Filamente aus dem gleichen Polymer bestehen und die gleiche Feinheit (auch: Titer) besitzen, weisen profilierte Filamente im Gegensatz zu runden, unabhängig von der Geometrie, eine höhere Oberfläche auf.

Der Umfang und folglich die Oberfläche eines Kreuzfilaments ist demnach mehr als 2,6-mal so groß wie die eines Rundfilaments. Weiterhin wird über Einkerbungen oder Hohlräume maßgeblich die Faser-Faser-Anordnung in der textilen Fläche beeinflusst [TIK+01]. Dies ermöglicht beispielsweise die gezielte Einstellung der Porosität eines Textils. Die genannten Merkmale können je nach geforderter Endanwendung variiert werden.

Anwendungen biologisch abbaubarer Fasern und Textilien

Textilien werden nicht nur als Bekleidung und Heimtextilien, sondern vor allem im industriellen und technischen Bereich in einer Vielzahl verschiedener Anwendungen eingesetzt.

Nach Edana, dem europäischen Verband der Vliesstoffindustrie, wurden 2018 in Europa ca. 2,7 Mio. Tonnen Vliesstoffe hergestellt. 5,6 % der Vliesstoffe wurden im Bereich Bauingenieurwesen/Tiefbau (u. a. Geotextilien) und 2,2 % in der Landwirtschaft eingesetzt (Abbildung 1) [WWW21].

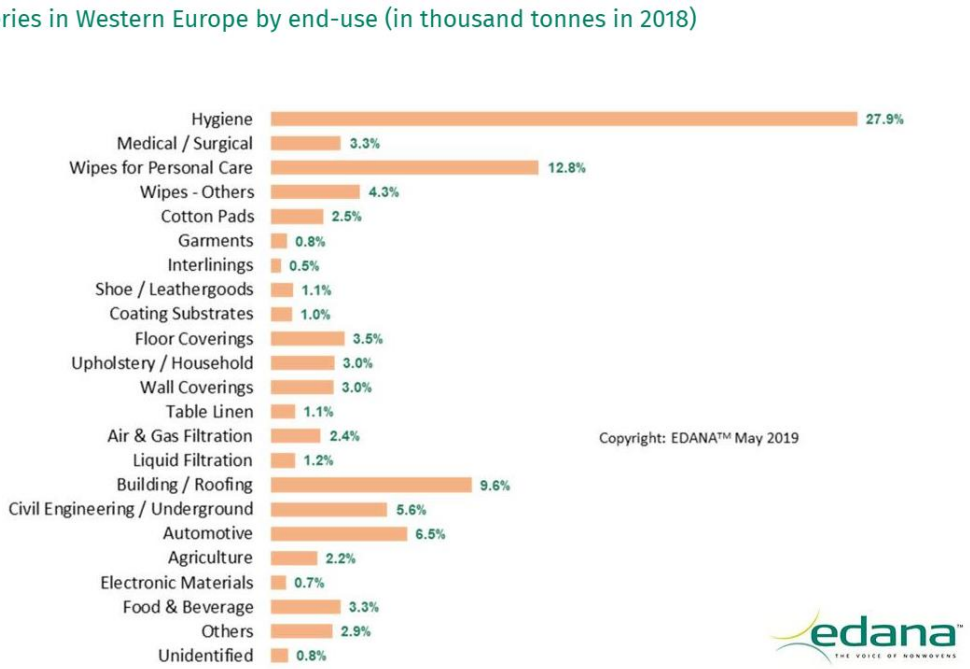


Abbildung 1: Vliesstofflieferungen in Westeuropa nach Endanwendungen (in Prozent im Jahr 2018) [WWW21]

Der Einsatz biologisch abbaubarer Textilien ist vor allem bei Produkten, die nach der Nutzungsphase in der Umwelt verbleiben, sinnvoll. Je nach Anwendung bietet eine gezielte Steuerung der biologischen Abbaubarkeit Vorteile. Mulch- und Ernteverfrühungsvliese sollen in der gesamten Wachstumsphase der Pflanzen ihre Funktion beibehalten und dürfen sich erst nach der Ernte abbauen. Bestimmte Geotextilien sollen bis zur Bewuchsetablierung Erosionsschutz gewährleisten.

Gesetzliche Rahmenbedingungen zur Kompostierung

Zentraler Teil der EU-Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG (AbfRRL) ist die Abfallhierarchie, in der die Abfallvermeidung priorisiert wird. Es folgen mit abnehmender Priorität die Stufen Vorbereitung zu Wiederverwendung, stoffliche Verwertung, energetische Verwertung bis zur Beseitigung. Kompostierung gehört nach Definitionen in der AbfRRL zu der stofflichen Verwertung. [ABF08] Biologisch abbaubare Kunststoffe können theoretisch in jeder Stufe entsorgt werden. Im Gegensatz zu konventionellen Kunststoffen steht ihnen die Möglichkeit der industriellen Kompostierung oder teilweise auch der Gartenkompostierung offen. Die gesetzlichen Regelungen sind hier jedoch in den einzelnen EU-Mitgliedstaaten unterschiedlich. [BPW+18]

In Deutschland sind nach der Bioabfallverordnung (BioAbfV) Kunststoffabfälle aus biologisch abbaubaren Werkstoffen für die Verwertung in industriellen Kompostieranlagen zugelassen, wenn es sich um Abfälle aus der Landwirtschaft, Gartenbau, Teichwirtschaft, Forstwirtschaft, Jagd und Fischerei oder um Bioabfallbeutel handelt und diese nach DIN EN 13432 oder DIN EN 14995 zertifiziert sind. Verpackungen sind explizit ausgeschlossen. [BIO98] Nach der Düngemittelverordnung (DüMV) sind zertifizierte biologisch abbaubare Kunststoffe als Nebenbestandteile in unvermeidlichen Anteilen im Kompost zulässig. [DÜN12]

Seit 2016 sind in Frankreich Obst- und Gemüsebeutel nur noch zulässig, wenn sie (teil-)biobasiert und als gartenkompostierbar zertifiziert sind (z.B. nach NF T 51-800). Ab 2020 gilt entsprechendes für Einwegkunststoffgeschirr und Wattestäbchen. Die Kompostinfrastruktur befindet sich allerdings erst im Aufbau, daher werden biologisch abbaubare Kunststoffe heute häufig energetisch verwertet oder beseitigt. [BPW+18]

In Italien werden zertifizierte, kompostierbare Kunststoffe in verschiedenen Gesetzen gefördert. Einwegkunststoffbeutel sind nur zulässig, wenn sie kompostierbar (nach UNI EN 13432) und (teil-)biobasiert sind. Bei öffentlichen Aufträgen muss Einweggeschirr kompostierbar sein. Produkte, die nach UNI EN 13432 zertifiziert sind, sind im organischen Abfallstrom erlaubt und sollen in industriellen Kompostieranlagen verwertet werden. [BPW+18]

Patentrecherche

Die folgenden Merkmale werden in jeweils unterschiedlichen Zusammenstellungen in der Patentdatenbank depatisNet (Expertenmodus) auf Deutsch und Englisch recherchiert. Um sie Suche zu vergrößern werden nicht immer alle Merkmale gleichzeitig gesucht.

- (Biologisch) abbaubar
- (Multi-) Filament/ Faser/ Garn o.ä.
- Schmelzgesponnen
- Polymer/ PLA/ PBS o.ä.
- Textil/ Vliesstoff o.ä.
- NICHT: Medizin, Cellulose, Wirkstoff (drug), meltblown

In Tab. I.2Tab. I.2 wird eine Übersicht über die relevantesten Ergebnisse gegeben. Es kann kein Patent gefunden werden, das die Einstellung der biologischen Abbaubarkeit von Fasern oder Vliesstoffen über den Filamentquerschnitt von synthetischen Fasern beschreibt.

Tab. I.2: Übersicht Auswahl recherchierter Patente

Titel, Nr., Inhaber	Jahr	Inhalt der Ansprüche
Biodegradable nonwoven fabric EP 3 527 706 A1, CA 3038791 Asahi Kasei	2012	Biodegradierbarer Vliesstoff zum Thermoformen, umfassend Fasern aus einem Polymer auf PLA-Basis, wobei das Flächengewicht des biologisch abbaubaren Vliesstoffs 20 g/m^2 bis 350 g/m^2 beträgt. Dehnung in MD Rochtung bei 120 °C is 50% oder höher und die Dimensionsänderungsrate in MD-Richtung bei 80 °C bis 140 °C, gemessen durch thermomechanische Analyse, beträgt 64 % oder weniger. Biologisch abbaubarer Langfaservliesstoff, wobei in einem Temperaturabhängigkeitstest zur Bewertung der dynamischen Viskoelastizität das Speichermodul über

		einen Temperaturbereich von 90°C bis 150°C 10 MPato 500 MPa beträgt.
Degradable Filament 07173715 A Mitsui	1993 (tot)	Filament aus einer Polymerzusammensetzung, die (...) eine Bioabbaubarkeit und eine Abbaubarkeit aufweist und frei von der Bildung einer Substanz ist, die die Gefahr der Toxizität durch ihren Abbau aufweist (...) Zusammensetzung, die hauptsächlich aus einem hochmolekularen aliphatischen Polyester besteht, der durch Durchführung einer Kondensationsreaktion zwischen einem mehrwertigen aliphatischen Alkohol oder dessen Gemisch und einer mehrbasigen Fettsäure oder dessen Gemisch oder aus (...)
Aggricultural mulch film with triggered degradation EP 1 183 319 B1 Eastman Chemical Company	1999	Verfahren zur Steigerung der Bioabbaubarkeit eines geformten Artikels, wobei das Verfahren folgendes umfasst: - Bereitstellung eines dimensionsstabilen geformten Artikels, umfassend aus Celluloseester (…) - Kontaktieren des Artikels mit einem die chemische Abbaubarkeit auslösenden Mittel (…)
Vliesstoff aus Polymilchsäure-filament und dessen Herstellungs-verfahren EP000002261410B1 EP 2 261 410 A1 Unitika, Ltd.	2009	Vliesstoff, der aus Verbundfilamenten durch ein Spinnvliesverfahren [nicht Stapelfaservlies wie in DegraFib] gebildet ist, wobei das Verbundfilament ein Polymilchsäurepolymer mit einem Schmelzpunkt von nicht weniger als 160°C und ein aliphatisches Polyesterpolymer mit einem Schmelzpunkt, der um nicht weniger als 50°C niedriger ist als der Schmelzpunkt des Polymilchsäurepolymers, umfasst das aliphatische Polyesterpolymer mindestens einen Teil einer Filamentoberfläche bildet und das aliphatische Polyesterpolymer als konstituierende Komponenten (…)
Filament nonwoven fabric and method of fabricating the same EP 0 765 959 A1 Unitika Ldt.	1996 (tot)	Vlieststoff aus Filamenten bestehen aus PLA-basierten Polymeren aus der Gruppe (co)poly-D/L-lactic acid (…) mit Schmelzpunkt über 100 °C (..) Vliesstoff teilweise bonded mit Druck und Temperatur (..)
Biodegradable Textiles, Masterbatches, and Method of making Biogedradable Fibers US020190390020A1 Intrinsic Advanced Materials, LCC	2019	Masterbatch mit zugehörigen Verfahren, und biologisch abbaubare Filamente, Fasern, Garne und Gewebe. Das Masterbatch enthält 0,2 bis 5 Massen-% CaCO3, einen aliphatischen Polyester mit einer sich wiederholenden Einheit mit zwei bis sechs Kohlenstoffen in der Kette zwischen Estergruppen, mit der Maßgabe, dass die 2 bis 6 Kohlenstoffe in der Kette keine Seitenkettenkohlenstoffe einschließen, und ein Trägerpolymer, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus PET, Nylon, anderen thermoplastischen Polymeren und Kombinationen davon.

I.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Firmen Heimbach und IGG standen den beiden Instituten als assoziierte Partner beratend zur Seite. Beim Kick-off Meeting im November 2019 wurden die Produkte der Firmen vorgestellt und die Möglichkeit einer Substitution durch biologisch abbaubare Polymere diskutiert. Hierbei stellte sich heraus, dass auch eine Betrachtung von Monofilamenten zusätzlich zu den geplanten Multifilamenten sinnvoll wäre. Die Beschaffung der Spinndüsen für profilierte Monofilamente zog sich durch Lieferschwierigkeiten der Hersteller so lange hin, dass die Filamente erst nach Projektende gesponnen wurden und deren Abbaubarkeit getestet wurde. Bei den digitalen Treffen im April und November 2020 wurden daher mit den Unternehmen nur die Ergebnisse der Abbauuntersuchungen der Multifilamente diskutiert.

II. Ergebnisse

II.1 Erzielte Ergebnisse

II.1.1 AP 1: Recherche und Auswahl geeigneter biologisch abbaubarer Polymere

Während der Literaturrecherche konnten nur wenige Veröffentlichungen zum biologischen Abbau von Filamenten oder Vliesen gefunden werden. Es wurden bei der Auswahl der Polymere daher vor allem Daten aus Veröffentlichungen zu Abbautests von Polymeren in anderen Probenformen (Pulver, Folien oder Platten) zu Grunde gelegt. Die detaillierte Tabelle mit der Auswertung der Literaturstellen befindet sich im Anhang (Tab. IV.1). In die engere Wahl kamen die biobasierten Polymere PLA, PBS, Stärke(blends) und PHA.

Es wurden die in Tab. II.1 aufgeführten Firmen gefunden, die biologisch abbaubare Polymere in ihrer Produktpalette führen. Einige der Firmen bieten keine für den Schmelzspinnprozess geeigneten Polymere an oder vertreiben ihre Produkte nicht in kleinen Mengen.

Tab. II.1: Firmen, die Biopolymere in ihrer Produktpalette führen

Firma	Biopolymere	Quelle
BASF SE	(ecoflex® und ecovio®) Keine Rückmeldung	[BAS20]
Biotec GmbH	(BIOPLAST®) Keine Rückmeldung	[BIO19]
FKuR Kunststoff GmbH	Kein geeignetes Polymer	[Voß20]
MCPP Germany GmbH	Verschiedene BioPBS™	[PTT18]
Novamont S.p.A.	(Mater-Bi) Keine Rückmeldung	[Nov20]
RB Biobased Institute b.v. (Rodenburg Biopolymers)	Kein geeignetes Polymer	[Ver20]
Synprodo b.v.	Kein geeignetes Polymer	[Bru20]
Technaro GmbH	ARBOBLEND® 3327 V Industriell kompostierbar Polymerblend Keine Angaben bezüglich verwendeten Additiven und Polymere und deshalb nicht für dieses Projekt geeignet	[Bus20]
Total Corbin PLA b.v.	(Luminy®) Keine Rückmeldung	[Tot20]

In Vorversuchen wurden PLA und PBS am ITA erfolgreich mittels Schmelzspinnprozess ausgesponnen. Beide Polymere sind kommerziell verfügbar, bspw. PLA von der Fa. NatureWorks LLC, Minnetonka, USA und PBS von der Fa. Mitsubishi Chemical Performance Polymers (MCPP) GmbH, Düsseldorf [Nat18, PTT18]. Zudem werden verschiedene PHAs sowie Blends in verschiedenen Forschungsprojekten zum Schmelzspinnen von biologisch abbaubaren Polymeren betrachtet. Die Festigkeiten der daraus hergestellten Filamentgarne sind bislang jedoch unzureichend und die Polymere sind nicht kommerziell verfügbar, was die Produktentwicklung deutlich erschwert.

Die folgenden Polymere wurden ausgewählt und bislang für die Versuchsdurchführung im Rahmen dieses Projekts verwendet:

- PLA: Ingeo™ 6400D der Firma NatureWorks LLC) (1. Versuchsreihe)
- PBS: FD72PM der Firma Mitsubishi Chemical Performance Polymers (MCPP) GmbH (1. und 2. Versuchsreihe)
- PBS: FD92PM, FZ71PM und FZ78TM der Firma Mitsubishi Chemical Performance Polymers (MCPP) GmbH (3. Versuchsreihe)

Weitere Informationen zu den Polymeren der Versuchsreihen befinden sich in Tab. II.2 und Tab II.3.

Tab. II.2: Eigenschaften und Verarbeitungshinweise des verwendeten PLA und PBS in der 1. und 2. Versuchsreihe [Nat18, Nat21, PTT18d, TÜV21]

Eigenschaft/ Verarbeitungshinweis	Ingeo™ 6400D	FD72PM
Dichte [g/cm³]	1,24	1,24
Glasübergangstemperatur [°C]	55 – 60	-46
Schmelztemperatur [°C]	160 - 170	84
Schmelzflussrate [g/10 min] (2,16 kg)	6 g/10 min (210 °C)	22g/10 min (190 °C)
Biobasierter Anteil [%]	> 80%	Teilbiobasiert
Kompostierbarkeit	Industriell kompostierbar	Industriell kompostierbar, heimkompostierbar, in Erde biologisch abbaubar
Vorgesehene Anwendung	Schmelzspinnen	Spritzgießen
Empfohlene Verarbeitungstemperatur [°C]	220 – 240	150 - 160
Empfohlener Feuchtigkeitsgehalt bei Verarbeitung [ppm]	50	< 700

Für die 3. Versuchsreihe der Filamentextrusion konnte PLA nicht beschafft werden, da das Polymer global sehr gefragt und nicht mehr in kleinen Mengen verfügbar war. Da zum Zeitpunkt der Polymerbestellung für die 3. Versuchsreihe das Polymergrade PBS FD72PM der Firma Mitsubishi Chemical Performance Polymers (MCPP) GmbH nicht mehr verfügbar war, wurden die Grades FD92PM (PBS92), FZ71PM (PBS71) und FZ78TM (PBS78) zur Filamentextrusion ausgewählt. Das BioPBS-Grade FD92PM (Polybutylensuccinat-co-Adipat) ist zu einem geringen Anteil biobasiert (35 %) und heimkompostierbar. FD92PM ist allerdings nicht für das Schmelzspinnen, sondern für die Folienextrusion vorgesehen. Die beiden anderen BioPBS Gerades bestehen aus einem einen biobasierten Anteil von 51 % und sind für die industrielle Kompostierung zertifiziert. Der biologische Abbau des Materials läuft über einen längeren Zeitraum ab als die maximal erlaubte Prüfdauer des TÜV Austria von zwölf Monaten für biologische Abbaubarkeit bzw. 6 Monaten für die Desintegration für die OK Compost Home Zertifizierung [Sch20, TÜV12]. Das BioPBS-Grade FZ71PM ist für die Verarbeitung durch Spritzgießen vorgesehen und ist auf dem Markt bereits etabliert. FZ78TM wiederum stellt eine neue Weiterentwicklung des FZ71PM für die Verarbeitung mittels Schmelzspinnverfahren dar. Nähere Informationen zu den Polymeren der 3. Versuchsreihe befinden sich in Tab II.3.

Tab II.3: Eigenschaften und Verarbeitungshinweise der verwendeten BioPBS-Grades [PTT18, PTT20a, PTT20b, PTT20c, Sch20]

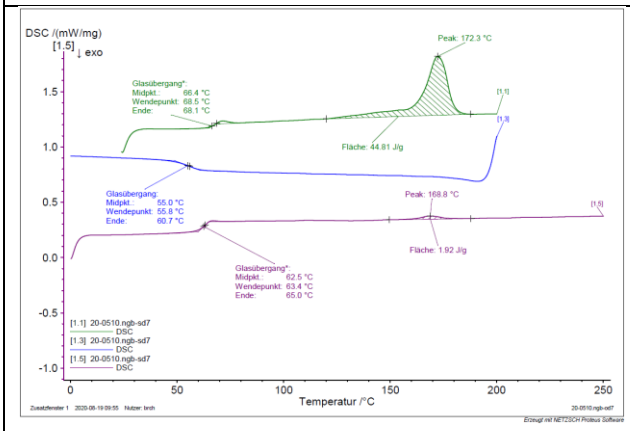
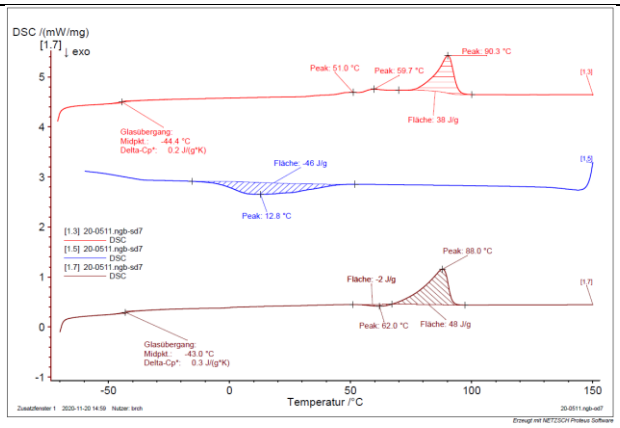
Eigenschaft/ Verarbeitungshinweis	FD92PM	FZ71PM	FZ78TM
Dichte [g/cm³]	1,24	1,26	1,26
Glasübergangstemperatur [°C]	-46	-34	-34
Schmelztemperatur [°C]	84	115	115
Schmelzflussrate [g/10 min] (190 °C, 2,16 kg)	4	22	22
Intrinsische Viskosität [g/dl]	1,4-1,9	1,47	1,4-1,9
Biobasierter Anteil [%]	35	51	51
Kompostierbarkeit	heimkompostierbar	Industriell kompostierbar	Industriell kompostierbar
Vorgesehene Anwendung	Folienextrusion	Spritzgießen	Schmelzspinnen
Empfohlene Verarbeitungstemperatur [°C]	130 – 150	180 – 200	200 – 220
Empfohlener Feuchtigkeitsgehalt bei Verarbeitung [ppm]	< 700	< 700	< 200

II.1.2 AP 2: Polymercharakterisierung

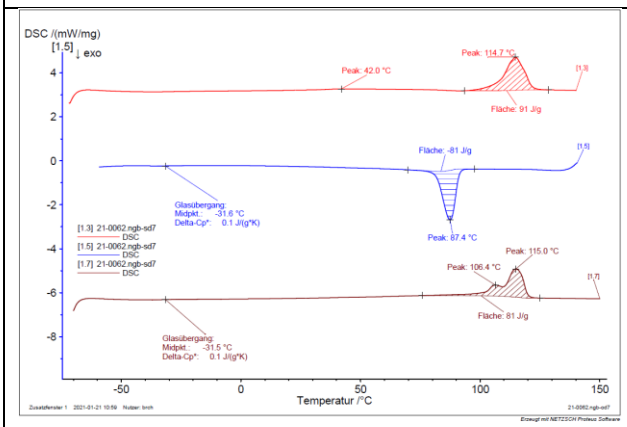
Die thermischen Eigenschaften der ausgewählten Rohstoffe wurden mittels Dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) bestimmt. Neben den materialspezifischen Eigenschaften wie Glasübergangs- und Schmelztemperatur kann mit der DSC unter anderem auch die Kristallisationsenthalpie eines Materials ermittelt werden. Durch den Vergleich mit einem Literaturwert für vollständig kristallines Material kann daraus der kalorimetrische Kristallisationsgrad der Probe berechnet werden, um später eine Korrelation zwischen Kristallinität und Abbaugeschwindigkeit herstellen zu können.

Die Messungen werden an einer DSC 204 Phoenix® der Firma NETZSCH-Gerätebau GmbH, Selb durchgeführt. Die Heiz- und Kühlrate beträgt 10 K/min. Tab. II.4 zeigt die Ergebnisse der DSC Messung des verwendeten PLA und PBS in der 1. und 2. Versuchsreihe, Tab. II.5 die Ergebnisse des verwendeten PBS in der 3. Versuchsreihe. Die gemessen Werte für Glasübergangtemperatur und Schmelztemperatur entsprechen in etwa den vom Hersteller angegeben Werten.

Tab. II.4: Thermische Eigenschaften des verwendeten PLA (Ingeo™ 6400D) und PBS (FD72PM) in der 1. und 2. Versuchsreihe

Ingeo™ 6400D	**FD72PM**
	
Glasübergangstemperatur T_g: 63 °C Schmelztemperatur T_m: 172 °C Kristallisationsgrad K: 48 %	T_g: -43°C °C T_m: 90 °C K: 42 %

Tab. II.5: Thermische Eigenschaften des verwendeten PBS (FZ78PM) in der 3. Versuchsreihe

FD78PM

T_g: -32°C °C T_m: 115 °C K: 73 %

.

II.1.3 AP 3: Filamentextrusion und Vliesherstellung

Filamentextrusion

In der 1. Versuchsreihe wurden zunächst die Prozessparameter für die Extrusion von PLA und PBS Filamentgarnen mit rundem und sternförmigem Querschnitt optimiert. Die PBS Filamente wurden an einer Schmelzspinnanlage im Pilotmaßstab der Firma Fourné Polymertechnik GmbH, Alfter-Impekoven, hergestellt. Für die Herstellung der PLA Filamentgarne wurde eine Schmelzspinnanlage im semi-industriellen Maßstab der Firma Fourné gewählt.

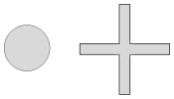
In der 2. Versuchsreihe wurde neben dem Filamentquerschnitt (rund und flach) auch die Abzugsgeschwindigkeit variiert. So konnten Filamentgarne mit unterschiedlichen Kristallinitäten hergestellt werden. Die Versuche haben an einer Schmelzspinnanlage im Pilotmaßstab der Firma Fourné stattgefunden.

Für die Filamentextrusion der 1. und 2 Versuchsreihe wurden verschiedene Spinndüsen mit je 24 Kapillaren ausgewählt. Die Kapillargeometrie wurde variiert. Runde, flache sowie sternförmige Filamente aus PBS und PLA ausgesponnen.

In der 3. Versuchsreihe wurden zunächst die Prozessparameter für die Extrusion von PBS Filamentgarnen aus den ersten beiden Versuchsreihen übernommen und spezifisch an das in dieser Versuchsreihe verwendete PBS angepasst. Die Filamente wurden an einer Schmelzspinnanlage im Pilotmaßstab der Firma Fourné Polymertechnik GmbH, Alfter-Impekoven, hergestellt. Es wurden verschiedene Spinndüsen mit je 48 Kapillaren mit unterschiedlichen Kapillargeometrien verwendet. Es konnten runde und kreuzförmige Filamente aus PBS ausgesponnen werden.

Eine Übersicht der durchgeführten Spinnversuche u.a. der verwendeten Polymere und Querschnitte, des Untersuchungsfokus und der Ergebnisse n der Versuchsreihen ist in Tab II.6 dargestellt.

Tab II.6: Übersicht der durchgeführten Schmelzspinnversuche

Versuchs-reihe	Polymer	Querschnitt	Untersuchungsfokus	Ergebnis
1	Ingeo™ 6400D FD72PM	Rund und sternförmig 	Prozessparameter, Einfluss der Oberfläche auf die Alterung	- Prozessparameter zur Verarbeitung der Polymere gefunden - Drücke im Spinnpaket wurden indirekt über Prozessführung optimiert
2	Ingeo™ 6400D FD72PM	Rund und flach 	Einfluss der Oberfläche und der Kristallinität auf die Alterung	- Variation der Abzugsgeschwindigkeiten mit resultierenden unterschiedlichen Kristallinitäten - Mit PBS konnten ausschließlich runde Geometrien realisiert werden - Mit PLA konnten nicht alle Abzugsgeschwindigkeiten bei flacher Kapillar-Geometrie realisiert werden
3	FD92PM FZ71PM FZ78TM	Rund und kreuz 	Prozessparameter, Einfluss Oberfläche und der Kristallinität auf die Alterung	- Ermittlung der Prozessparameter für die neuen PBS Grades - Abzugsgeschwindigkeiten variiert und Garne weisen unterschiedliche Kristallinitäten auf - Es konnten runde und kreuzförmige Geometrien realisiert werden - FD92PM erweist sich als nicht geeignet zum Schmelzspinnen auf der verwendeten Anlage

Der Aufbau der verwendeten Spinnpakete für die Verarbeitung der Polymere auf der Schmelzspinnanlage im Pilotmaßstab der Firma Fourné Polymertechnik GmbH, Alfter, Deutschland, kann

Tab. II.7 entnommen werden.

Tab. II.7: Aufbau der Spinnpakete für die Multifilamentextrusion

Spinndüse	**Spinndüsenbezeichnung**	**Runddüse**	**Profilfaserdüse**
	Anzahl der Kapillare	Versuchsreihe 1: 28 Versuchsreihe 2 und 3: 48	
	Kapillarquerschnittsgeometrie	rund	Versuchsreihe 1: sternförmig Versuchsreihe 2: flach Versuchsreihe 3: kreuzförmig
	Kapillarlänge	Versuchsreihe 1: 1,5 mm Versuchsreihe 2 und 3: 0,5 mm	
	Maße einer Kapillare	Versuchsreihe 1: Ø 0,64 mm Versuchsreihe 2 und 3: Ø 0,25 mm	Versuchsreihe 1: Ø 1,08 mm Versuchsreihe 2 und 3: 0,5 mm x 0,06 mm
Verteilerplatte		Brechplatte	
Filter (fein)		ALU 17000/cm^2 mesh, 4-fach	
Sand		Versuchsreihe 1: PLA - kein Sand; PBS - 350 – 500 µm, 100 g Versuchsreihe 2 und 3: 350 – 500 µm, 100 g	
Glas		Der verbleibende Raum im Spinnpaket wird zur Volumenreduktion mit Glaskugeln aufgefüllt.	

Die eingestellten Temperaturen für die Filamentextrusion von PLA und PBS der 1. und 2. Versuchsreihe sind in Abb. II.1 aufgeführt.

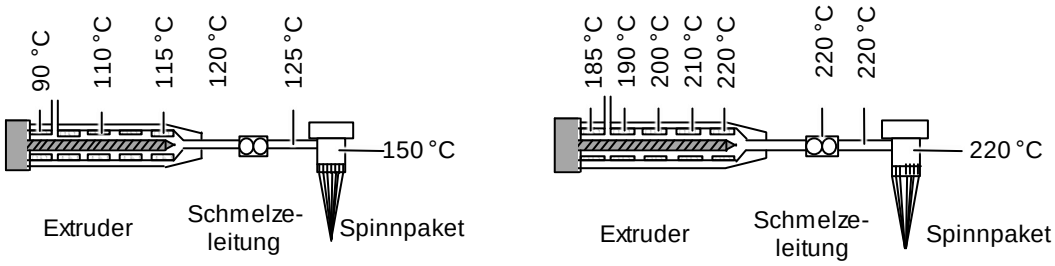


Abb. II.1: Temperaturen der Schmelzspinnanlage vom Extruder bis zum Spinnpaket bei Versuchen mit PBS (links) und PLA (rechts), die bei der Durchführung der 1. Und 2. Versuchsreihe ermittelt wurden

Die eingestellten Temperaturen für die verschiedenen PBS Grades der 3. Versuchsreihe sind in Abb. II.2 aufgeführt.

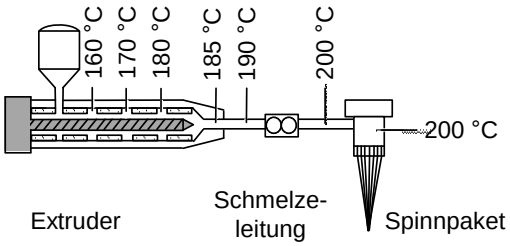


Abb. II.2: Temperaturen der Schmelzspinnanlage vom Extruder bis zum Spinnpaket bei Versuchen mit PBS FZ71PM und FZ78TM, die bei der Durchführung der 3. Versuchsreihe ermittelt wurden

In Tab. II.8 sind die Titer, Abzugs- und Wickelgeschwindigkeiten der durchgeführten Versuchsreihen aufgeführt. Bei der 1. Versuchsreihe wurden die Filamentgarne verstreckt (Wickelgeschwindigkeit > Abzugsgeschwindigkeit), worauf in der 2. und 3. Versuchsreihe verzichtet wurde. Filamentgarne konnten in allen der aufgezeigten Versuche ausgesponnen werden.

Tab. II.8: Titer, Abzugs- und Wickelgeschwindigkeiten bei den beiden durchgeführten Versuchsreihen, mit denen erfolgreich Filamentgarne hergestellt wurden

Versuchs-reihe	Polymer	Titer	Abzugsgeschwindigkeiten	Wickelgeschwindigkeit
1	PLA 6400D	Ca. 200 dtex	983 m/min	2500 m/min
	PBS FD72PM	Ca. 550 dtex	180 m/min	400 m/min
2	PLA 6400D	372 dtex 272 dtex 199,29 dtex	480 m/min 700 m/min 1100 m/min	600 m/min 820 m/min 1220 m/min
	PBS FD72PM	756 dtex 454 detx 371 dtex 272 dtex	280 m/min 480 m/min 590 m/min 815 m/min	300 m/min 500 m/min 610 m/min 834 m/min
3	PBS FZ71PM	687 – 694 dtex 473- 474 dtex 355 dtex	300 m/min 450 m/min 595,8 m/min	300 m/min 450 m/min 600 m/min
	PBS FZ78TM	694 - 695 dtex **473 - 475 dtex*** 355 - 357 dtex	300 m/min **450 m/min*** 590,3 m/min	300 m/min **450 m/min*** 600 m/min

*Filamente, die für die Vliesherstellung verwendet wurden

Vliesherstellung

Aus einem der Multifilamentgarne des Materials FZ78TM wurden Vliese für Alterungsversuche hergestellt. FZ78TM wurde ausgewählt, da dieses Schmelzspinngrade stabil im Schmelzprozess verarbeitet werden konnte. Für die Vliesherstellung wurden Multifilamente mit rundem und kreuzförmigem Filamentquerschnitt, einer Wickelgeschwindigkeit von 450 m/min und einem Titer von 473 dtex (Rund) bzw. 475 dtex (Kreuz) ausgewählt. Während der Vorversuche wurde festgestellt, dass die Multifilamentgarne einigen Vorbereitungsschritten unterzogen werden müssen, um zu Vliesen verarbeitet werden zu können. Die aus Vorversuchen erarbeitete Vorgehensweise ist in Abb. II.3 aufgeführt.

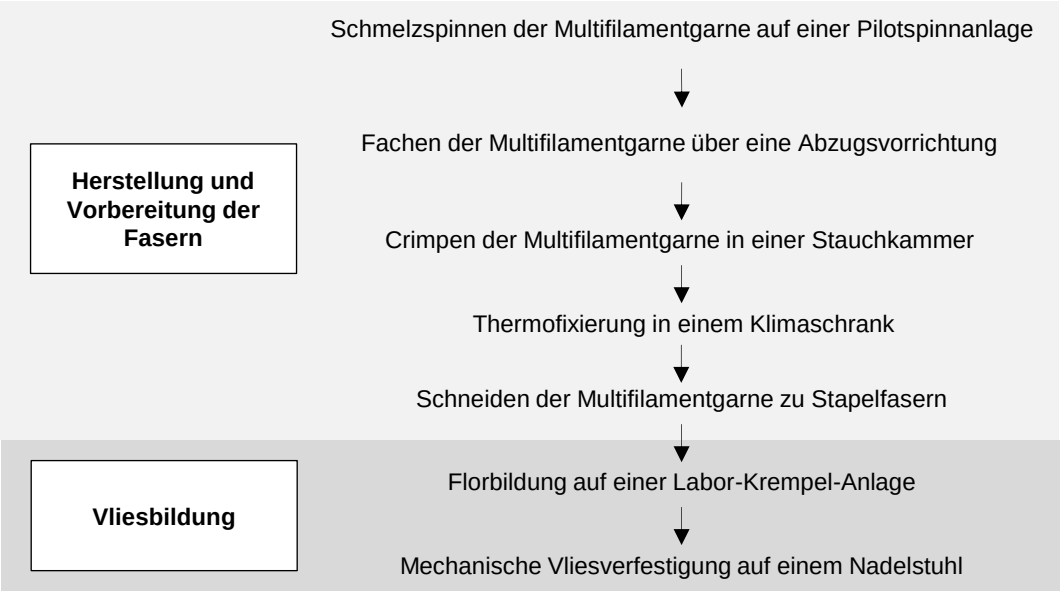


Abb. II.3: Versuchsplan für die Vliesherstellung

Zunächst wurden die Multifilamentgarne, wie oben beschrieben, mittels Schmelzspinnanlage extrudiert. Um die Haftung zwischen den hergestellten Filamenten für die Vliesbildung zu erhöhen, wurden die Filamentgarne zuerst durch das Fachen mithilfe der Abzugsvorrichtung des Rotorspinntesters SE 10 von Schlafhorst (heute Saurer AG, Wattwil, Schweiz) zu dickeren Multifilamentgarnen (ca. 5.700 dtex) zusammengefasst. Im Anschluss wurden die Multifilamentgarne in einer Stauchkammer der Firma Fourné gecrimpt. Nach dem Crimpen wurde die Kräuselung der Multifilamentgarne durch das Thermofixieren in der Klimakammer MKF 720 der Firma Binder GmbH, Tuttlingen irreversibel. Die Multifilamentgarne wurden mit einem Stapelfaserschneider der Firma Van der Mast Industriele Innovatiës, Eelde, Niederlande zu Stapelfasern geschnitten. Für die Vliesbildung wurden die geschnittenen Fasern auf der Labor-Krempel-Anlage 337 A der Firma Mesdan S.p.A, Puegnago del Garda, Italien zu einem Flor verarbeitet und im Anschluss mithilfe des Nadelstuhls LBM 6 der Firma Dilo Machines GmbH, Eberbach mechanisch verfestigt. Da Vliesstoffe aus PBS im Rahmen dieses Projekts erstmalig am ITA hergestellt wurden, wurden für jeden der oben aufgeführten Verarbeitungsschritte der Vliesherstellung geeignete Parameter erarbeitet. Die verwendeten Einstellungen der jeweiligen Anlagen können Tab. II.9 entnommen werden.

Tab. II.9: Einstellungen der verschiedenen Anlage zur Herstellung der Vliesstoffe

Anlage	Vorgang	Teil der Anlage/ Parameter	Einstellung
Rotorspinntester	Fachen	Abzugsvorrichtung/ Spulengeschwindigkeit	1. Schritt: 30 m/min (auf ca. 950 dtex) 2. Schritt: 26 m/min (auf ca. 1900 dtex) 3. Schritt: 15 m/min (auf ca. 5700 dtex)
Stauchkammer	Crimpen	Wasserkühlung	aus
		Dampferzeugung	aus
		Spalt der Stauchkammer	So klein wie möglich
		Geschwindigkeit	10-20 m/min
Klimaschrank	Thermo-fixierung	Temperatur	70 °C
		Luftfeuchtigkeit	30 %
		Dauer	15 min
Stapelfaser-schneider	Schneiden	Geschwindigkeit	Mittlere Stufe
		Länge der Fasern	50 mm
Labor-Krempel-Anlage	Florbildung	Geschwindigkeit	Höchste Stufe
		Vorgenommene Modifikationen	Anbringen einer Kunststoffführung mit PTFE-Folie zwischen Abnehmer und Sammeltrolle (Spalt zwischen Führung und Sammeltrommel beträgt nun nur noch 3 cm)
			Sprühflasche mit Wasser (Die Fasern auf der Trommel werden in einem Abstand von 20 – 30 cm mit Wasser besprüht, um die Haftung an der Sammeltrommel zu erhöhen)
			Ablagevorrichtung mit Kunststofffolie (Ermöglicht Überführung des Flors zum Nadelstuhl ohne Beschädigung)
Nadelstuhl	Mechanische Verfestigung	Nadellänge	3" (76,2 mm)
		Einstichtiefe	15 mm
		Niederhalterplatte Einzug	30 mm
		Niederhalterplatte Abzug	15 mm
		Wiederholungen	3

Im Rahmen der 3. Versuchsreihe wurden erfolgreich Vliesstoffe mit einem Flächengewicht von ca. 283 – 320 g/m^2 hergestellt.

II.1.4 AP 4: Filament- und Vliescharakterisierung

II.1.4.1 T 4.1 Charakterisierung der Filamente

Die Filamentgarne wurden bei den Versuchsreihen unmittelbar vor und nach den Alterungsversuchen einer mechanischen Zugprüfung sowie DSC Prüfungen unterzogen. Zudem wurden die Filamentquerschnitte eingebettet unter dem Lichtmikroskop untersucht. Bei der Untersuchung der eingebetteten Filamentgarne unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) konnten die Filamente kaum vom Harz, der zum Einbetten genutzt wurde, unterschieden werden. Unter dem REM wurden die Filamente deshalb nur von der Seite betrachtet. Die Ergebnisse sind im nächsten Kapitel dargestellt, um die Eigenschaften der gealterten Filamentgarne besser gegenüberstellen zu können.

Die mechanische Analyse der Multifilamentgarne erfolgte durch Zugprüfungen, die gemäß DIN EN ISO 2062 durchgeführt wurden [DIN EN ISO 2062]. Die Zugprüfung wurde im Normklima (DIN EN ISO 139) durchgeführt und erfolgte auf der Zugprüfmaschine STATIMAT 4U der Firma Textechno Herbert Stein GmbH & Co. KG, Mönchengladbach, mit einem 10 N Messkopf [DIN EN ISO 139]. Die Einspannlänge betrug 250 mm (1. Versuchsreihe) bzw. 100 mm (2. und 3. Versuchsreihe), die Vorspannkraft 0,5 cN/tex und für die Prüfgeschwindigkeit wurden 250 mm/min (1. Versuchsreihe) bzw. 100 mm/min (2. und 3. Versuchsreihe) eingestellt. Die Feinheit sowie die Festigkeit der Filamentgarne wird vor dem Einsetzen in die Komposterde geprüft. Die Zugprüfungen wurden am Tag des Einsetzens der Filamentgarne in Komposterde durchgeführt und circa 24 - 48 Stunden nach dem Herausnehmen der Filamentgarne aus der Bodenprobe wiederholt.

Die Multifilamente werden mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) thermoanalytisch untersucht. Die Messungen werden an einer DSC 204 Phoenix® der Firma NETZSCH-Gerätebau GmbH, Selb durchgeführt. Es werden die Glasübergangstemperatur T_g und der Schmelzpunkt T_m sowie der Kristallisationsgrad bestimmt. Die Heiz- und Kühlrate beträgt jeweils 10 K/min.

Die REM-Aufnahmen zur optischen Analyse der Filamentgarne wurden an einem Vega3 der Firma Tescan mit einem Sekundärelektronendetektor durchgeführt. Es wurde ein Sputter der Firma Cressington eingesetzt. Als Sputtermaterial diente Gold.

II.1.4.2 T 4.2 Test der biologischen Abbaubarkeit und künstliche Alterung von Filamenten und Vliesen

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Prüfmethode zur Untersuchung des biologischen Abbaus von Profilfasern entwickelt. Es wurden die folgenden Testmethoden bei der Erarbeitung einer eigenen Testmethode berücksichtigt:

- [DIN EN ISO 16929] Plastics – Detemination of the degree of disintegration of plastic materials under defined composting conditions in a pilot-scale test
- [DIN EN ISO 11721-1] Textilien - Bestimmung der Widerstandsfähigkeit zellulosehaltiger Textilien gegen Mikroorganismen; Erdeingrabetest

Aufgrund der Feinheit müssen die Filamentgarne an einem Probehalter befestigt werden. Damit genug Material für die Prüfungen zur Verfügung stehen, werden mindestens 9 m Filamentgarn gleichmäßig auf einen zylindrischen Probehalter aufgebracht und fixiert (siehe Abb. II.4).

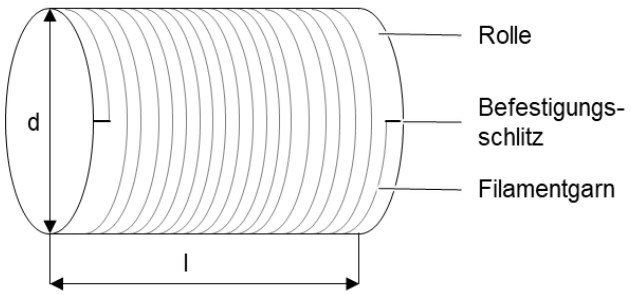


Abb. II.4: Probenhalter mit befestigtem Filamentgarn [Bec19]

Es werden jeweils vier mit Filamentgarn umwickelte Probenhalter in einer transparenten Kunststoffbox platziert. Es wird darauf geachtet, dass jeder Probenhalter von Komposterde vollständig umschlossen ist. Die Komposterde wird von der Kreis Weseler Abfallgesellschaft mbH & Co. KG vom Abfallentsorgungszentrum Asdonkshof bezogen. Die Bedingungen, unter denen die Alterungsversuche durchgeführt wurden und Weiterentwicklungen der Prüfmethode über die drei Versuchsreihen können Tab. II.10 entnommen werden.

Tab. II.10: Prüfbedingungen der Alterungsversuche für die Versuchsreihen

	1. Versuchsreihe	**2. Versuchsreihe**	**3. Versuchsreihe**
Probenumfang pro Versuchspunkt	2 Testproben	2 Test- und 1 Kontrollprobe	2 Test- und 1 Kontrollprobe
Aufwickelvorgang	Überwiegend automatisiert	manuell	manuell
Umgebungstemperatur	PLA und PBS Testproben: 25 und 58 °C	PLA Testproben: 58 °C PBS Testproben: 25 °C	PBS Test- und Kontrollproben: 20 °C
Prüfdauer	Tag 0/1 Tag 5/6 Tag 20	Tag 0 Tag 14	Tag 0 Tag 14 Tag 28
Medium	Ungesiebte Komposterde	Ungesiebte und gesiebte Komposterde	Gesiebte Komposterde
Reinigung	Testproben	Testproben	Test- und Kontrollproben

Die Entnahme der Proben aus Substratkontakt erfolgt in unterschiedlichen Zeitabständen. Die Reinigung der Filamentgarne findet im Wasserbad statt. Die überschüssige Erde wird vorsichtig mit einem Feinhaarpinsel ausgebürstet. In Abb. II.5 ist die Reinigung eines PLA-Garns dargestellt. Es ist zu erkennen, dass kleine Schmutzpartikel im Garn verbleiben.

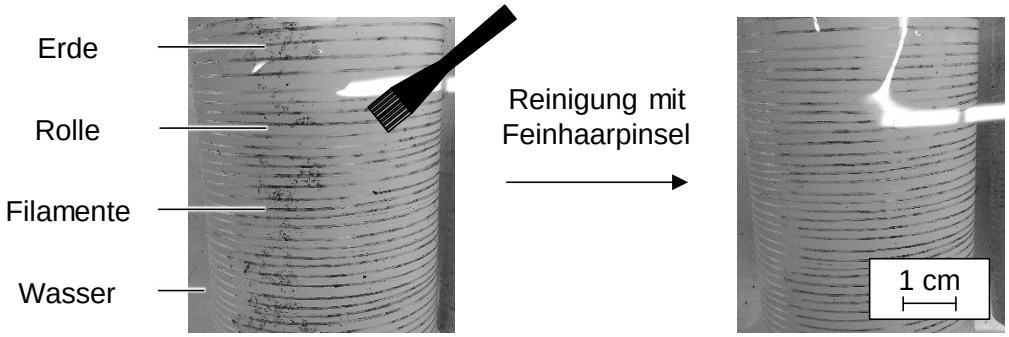


Abb. II.5: Reinigung der PLA-Filamentgarne unter Wasser mit einem Feinhaarpinsel: Verschmutze Filamentgarne (links) und gesäuberte Filamentgarne (rechts) [Bec19]

Ergebnisse der 1. Versuchsreihe

REM

Bei den Aufnahmen der PLA-Profilfilamente der ersten Versuchsreihe (Abb. II.6) ist auffallend, dass die Verschmutzungen durch die Komposterde nur stellenweise die Zwischenräume des Profils erreichen. Die Erdpartikel sind teilweise zu groß, um in die engen Zwischenräume zu gelangen. Außerdem ist es möglich, dass sich Partikel zwischen den „Ärmchen“ der Filamentquerschnitts verhaken. So kommt es dazu, dass die profilierten Filamentgarne auch nach der Reinigung stellenweise verschmutzter sind, als die nicht-profilierten Filamentgarne. REM-Aufnahmen der PBS Filamentgarne konnten wegen der Temperaturempfindlichkeit des Materials nicht angefertigt werden.

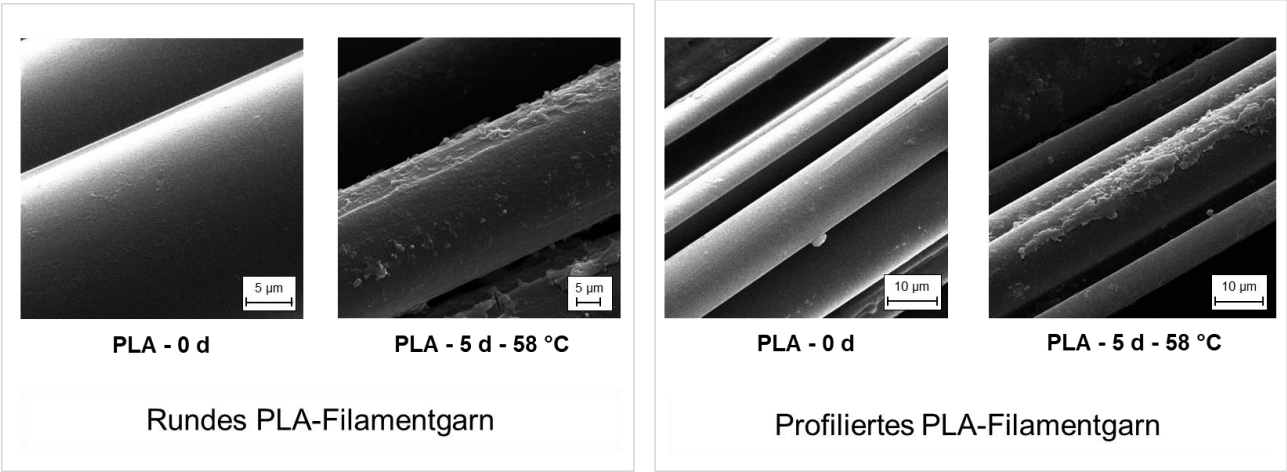
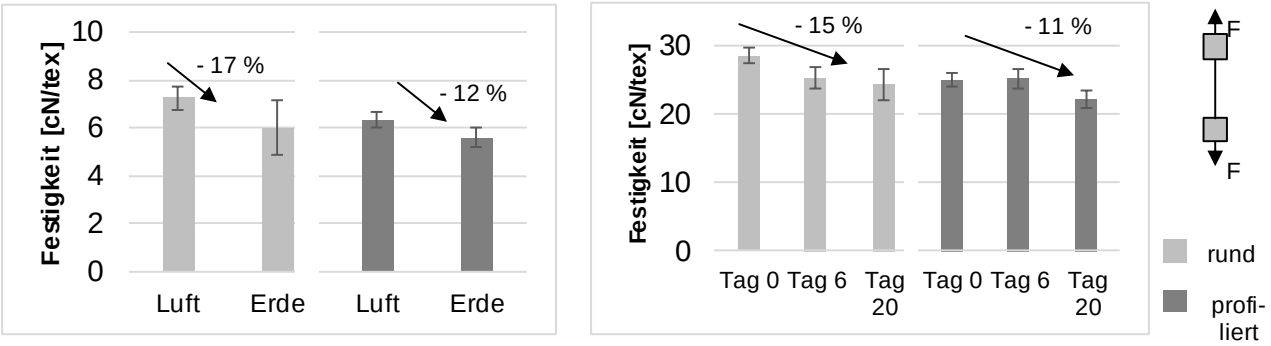


Abb. II.6: REM-Aufnahmen von runden und sternförmigen PLA-Filamentgarnen [Bec19]

Zugprüfungen

Die Zugfestigkeiten der PBS Filamentgarne, die 1 Tag in Erde gealtert sowie der PLA Filamentgarne die 6 bzw. 20 Tage in Komposterde gealtert sind im Vergleich mit Filamentgarnen ohne Kompostkontakt der 1. Versuchsreihe sind in Abb. II.7 dargestellt. Die Alterungsversuche wurden jeweils bei 25 °C durchgeführt. Die PBS Filamentgarne bauen sich bei den Versuchen über einen längeren Zeitraum so stark ab, dass nur noch Fragmente in der Komposterde zu finden sind.



PBS - Zugfestigkeit von rundem und profiliertem Filamentgarn nach 24 h in Luft und in Bodenkontakt

PLA - Zugfestigkeit von rundem und profiliertem Filamentgarn nach 6 und nach 20 Tagen in Bodenkontakt

Abb. II.7: Ausgewählte Ergebnisse der Zugprüfungen aus der 1. Versuchsreihe [Bec19]

Das im Querschnitt runde PLA-Filamentgarn weist bei den 6 bzw. 20-tägigen Alterungsversuchen bei 25 °C einen höheren Festigkeitsverlust auf als das profilierte PLA-Filamentgarn. Das gleiche Phänomen lässt sich bei den über 24 h gealterten PBS Filamenten beobachten. Eine mögliche Erklärung der Zugprüfergebnisse ist unter dem REM Mikroskop sichtbar. Wie Abb. II.8 zu entnehmen ist, werden die innen liegenden Teile der „Ärmchen“ der sternförmigen Filamente teilweise nicht von der Komposterde bedeckt.

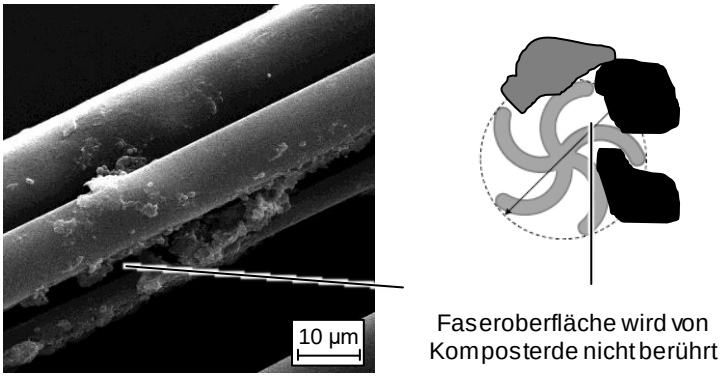


Abb. II.8: Profiliertes PLA-Filamentgarn nach Alterungsversuch (5 Tage bei 58 °C in Komposterde) unter dem REM [Bec19]

Es ist auch möglich, dass es durch die automatisierte Probenvorbereitung zur Garnschädigung und damit zu einer verringerten Zugfestigkeit kommt.

DSC-Prüfungen

Die Glasübergangstemperatur T_g und der Schmelzpunkt T_m des runden PLA-Filamentgarns sind an Tag 0 höher als T_g und T_m des profilierten PLA-Filamentgarns. T_g und T_m der runden PLA-Filamentgarne bleiben bei den Alterungsversuchen bei 25 °C sowie bei 58 °C nahezu konstant (Änderung < 1 °C). Der Trend der T_g und T_m der profilierten PLA-Filamentgarne bei den Alterungsversuchen bei 25 °C sowie bei 58 °C ist steigend. Eine mögliche Erklärung des unterschiedlichen Verhaltens der runden und profilierten Filamentgarnproben können Relaxationsmechanismen, die bei verschiedenen Temperaturen in den amorphen Bereichen des Polymers auftreten können, sein [RHB12].

T_g und T_m des profilierten PBS-Filamentgarns sind an Tag 0 höher als T_g und T_m des runden PBS-Filamentgarns. Im Rahmen der Versuchsreihe wurde keine Erklärung für die T_g und T_m Änderungen der runden und der profilierten PBS-Filamentgarnproben in den Alterungsversuchen gefunden. Auch die Änderungen der Kristallinität können nicht erklärt werden. Es wird davon ausgegangen, dass eine erhöhte Anzahl an Messungen in regelmäßigen Abständen über einen längeren Zeitraum eine Auswertung erleichtert. [Bec19]

Ergebnisse der 2. Versuchsreihe

REM-Prüfungen

Auf den Aufnahmen der PLA-Filamentgarne (siehe Abb. II.9) sind neben den Filamentgarnen Strukturen und Risse in der Filamentoberfläche zu sehen. Bei den Strukturen handelt es sich vermutlich um Bakterien und Pilzhyphen. Ob die Risse bereits bei der Herstellung der Filamentgarne oder erst durch die Alterung entstanden sind, kann nicht einwandfrei geklärt werden.

In der 2. Versuchsreihe konnten REM-Aufnahmen von PBS angefertigt werden, in dem u.a. der Abstand zur Probe erhöht wurde. Auf den Aufnahmen der PBS-Filamentgarne lassen sich neben den Filamenten vereinzelt kleine Partikel erkennen, die vermutlich Substratüberreste sind.

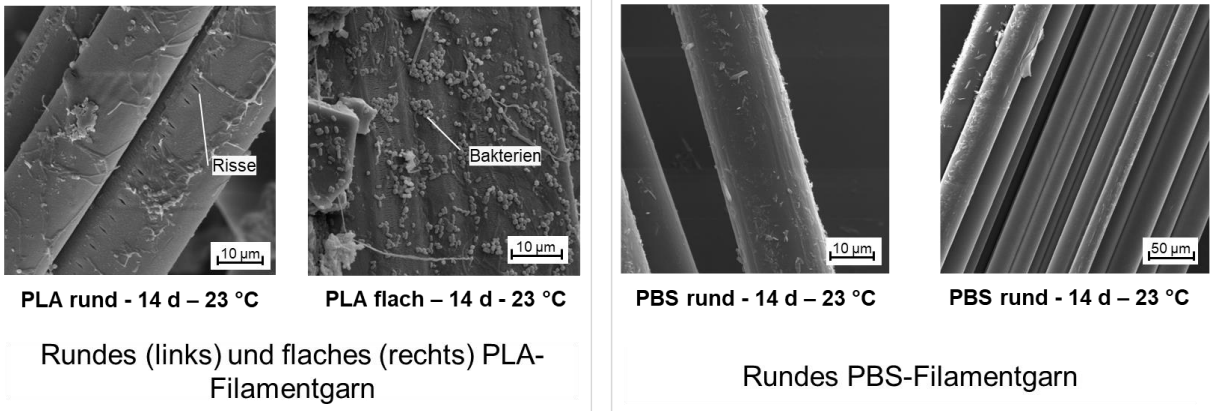


Abb. II.9: REM-Aufnahmen von runden und flachen PLA-Filamentgarnen (links) und von runden PBS-Filamentgarnen (rechts) [Gru20]

Zugprüfungen

Die PLA Filamentgarne werden bei den Alterungsversuchen über einen längeren Zeitraum so stark geschädigt, dass nur noch Fragmente in der Komposterde zu finden sind. Die PBS Filamentgarne können noch auf ihre mechanischen Eigenschaften getestet werden. Die Festigkeiten der FIlamentgarne vor der Alterung korrelieren nicht mit den Herstellungsparametern. Der Vergleich der Festigkeitsänderungen der Filamentgarne, die bei unterschiedlichen Wickelgeschwindigkeiten abgezogen sind, korreliert ebenfalls nicht mit den Verarbeitungsparametern. Eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Alterungsverhalten der Garne des gleichen Polymers in den verschiedenen Versuchsreihen konnte noch nicht gefunden werden.

In Abb. II.10 sind die Festigkeiten der runden PBS Filamentgarne bei den unterschiedlichen Wickelgeschwindigkeiten an Tag 0 und Tag 14 nach Alterung im Substrat dargestellt.

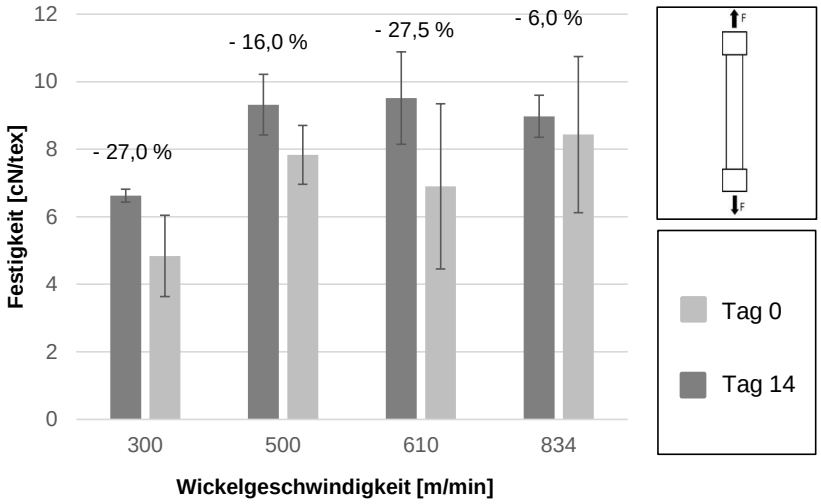


Abb. II.10: Ausgewählte Ergebnisse der Zugprüfungen an PBS Filamentgarnen bei den unterschiedlichen Wickelgeschwindigkeiten in m/min aus der 2. Versuchsreihe [Gru20]

DSC-Prüfungen

In Abb. II.11 sind die Kristallisationsgrade der profilierten PLA-Filamentgarne dargestellt und in Abb. II.12 die der runden PLA-Filamentgarne. Die Kristallinitäten der Filamentgarne nehmen mit der Alterung im Substrat zu. Eine mögliche Erklärung kann die Relaxation der Filamente bei der Lagerung bei 58 °C sein.

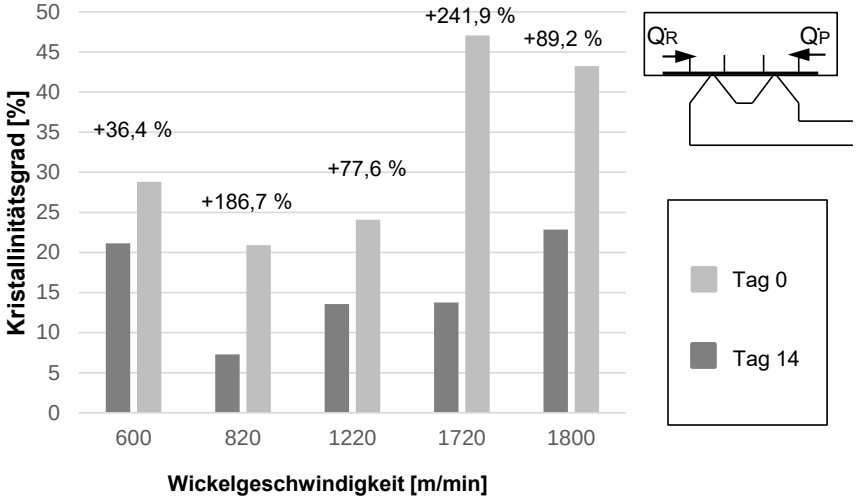


Abb. II.11: Kristallinität der runden PLA-Filamentgarne bei den unterschiedlichen Wickelgeschwindigkeiten in m/min an Tag 0 und Tag 14 nach Alterung im Substrat [Gru20]

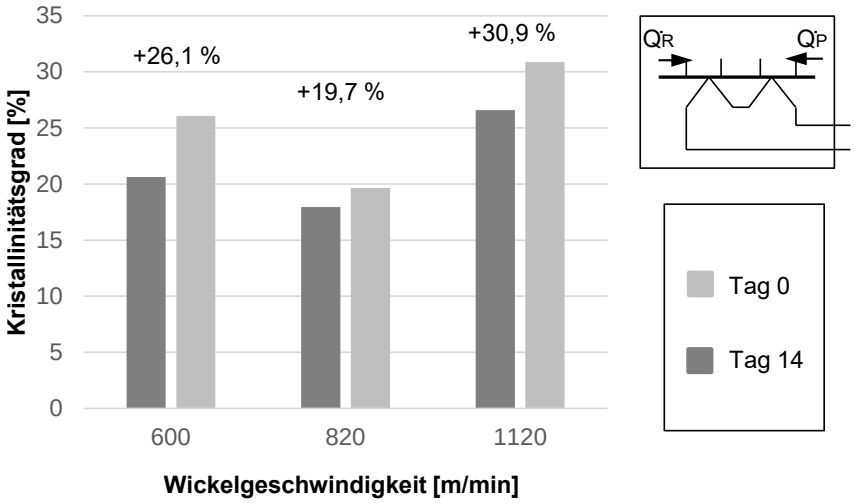


Abb. II.12: Kristallinität der profilierten PLA-Filamentgarne bei den unterschiedlichen Wickelgeschwindigkeiten in m/min an Tag 0 und Tag 14 nach Alterung im Substrat [Gru20]

T_g und T_m der runden PLA-Filamentgarne sind in Tab. II.11 aufgelistet. Die Glasübergangstemperaturen der runden PLA-Filamentgarne differieren durch die Alterung nur so gering, dass hier nicht von einer tatsächlichen Änderung ausgegangen wird. Die kleine Zunahme kann für eine Nachkristallisation in Folge von Relaxation der Filamentgarne sprechen. Durch die Filamentextrusion können Spannungen entstehen, die sich erst durch Relaxation durch Temperaturzunahme lösen. Diese Entspannung kann zu einer höheren Nahordnung der Molekülketten führen.

Die Schmelztemperaturen nehmen sowohl bei den profilierten Filamentgarnen als auch bei den runden Filamentgarnen mit der Alterung im Substrat ab.

Tab. II.11: T_g und T_m der profilierten und runden PLA-Filamentgarne an Tag 0 und Tag 14 nach Substratkontakt – Werte entnommen aus der 2. Aufheizkurve der DSC Messung [Gru20]

	T_g Tag 0	T_g Tag 14	T_m Tag 0	T_m Tag 14
Material und Wickel-geschwindigkeit [m/min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Profilierte Filamentgarne				
PLA 600	59	57	171	161
PLA 820	59	57	170	161
PLA 1120	58	58	169	162
Runde Filamentgarne				
PLA 600	59	59	171	163
PLA 820	59	60	169	162
PLA 1220	59	61	170	162
PLA 1720	59	57	169	163
PLA 1800	59	57	168	168

Bei PBS ist kein eindeutiger Trend zu erkennen. Teilweise ist eine Abnahme von T_g zu beobachten, teilweise eine Zunahme. Das gleiche gilt für T_m wie Tab. II.12 zu entnehmen ist. Es kann keine deutliche Änderung der Filamentgarne nach der zweiwöchigen Alterung im Substrat nachgewiesen werden.

Tab. II.12: T_g und T_m der PBS-Filamentgarne an Tag 0 und Tag 14 nach Substratkontakt – Werte entnommen aus der 1. Aufheizkurve der DSC Messung [Gru20]

	T_g Tag 0	T_g Tag 14	T_m Tag 0	T_m Tag 14
Material und Wickelgeschwindigkeit [m/min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
PBS 300	-46	-44	87	87
PBS 500	-43	-44	91	89
PBS 610	-43	-42	90	91
PBS 834	-41	-41	89	91

Ergebnisse der 3. Versuchsreihe

REM-Prüfungen

In der dritten Versuchsreihe wurden REM-Aufnahmen der Filamente vor und nach der Alterung durchgeführt. Beispielhaft sind hier Filamente des PBS-Grades FZ78TM in Abb. II.13 abgebildet. Auf den Aufnahmen der PBS-Filamentgarne sind Strukturen auf den Filamentgarnen und nach 28 Tagen Risse in der Filamentoberfläche zu sehen. Bei den Strukturen handelt es sich vermutlich um Substratreste, Bakterien und Pilzhyphen. Anders als bei der ersten Versuchsreihe mit sternförmigem Querschnitt ist zu erkennen, dass das Substrat auch auf der Innenseite der kreuzförmigen Filamente haftet. Erste Abbauerscheinungen an der Oberfläche treten bei beiden PBS-Grades entgegen der Erwartungen zuerst bei den Filamenten mit rundem Filamentquerschnitt auf.

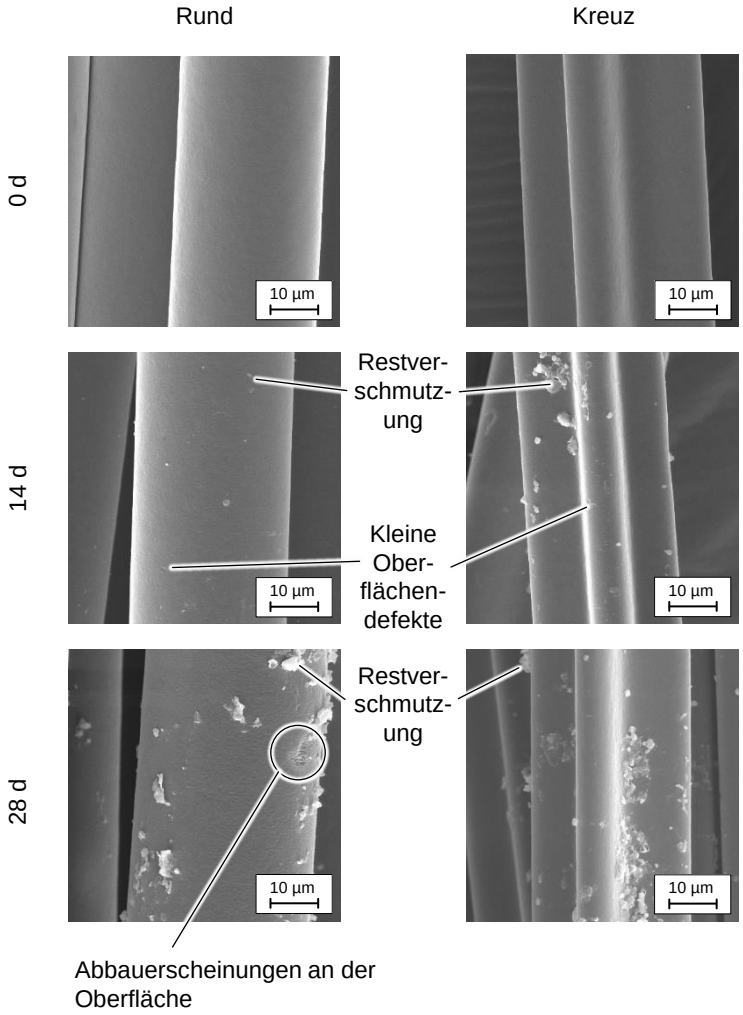


Abb. II.13: REM-Aufnahmen von runden (links) und kreuzförmigen (rechts) PBS-Filamentgarnen vor (0 d) und nach (14 d, 28 d) den Alterungsversuchen [Boa20]

Es ist möglich, dass der Abbau an der Oberfläche sowohl von der Oberflächenstruktur (Rauheit), als auch von der Orientierung der amorphen Bereiche und der Kristallinität abhängig ist. Bei niedrig orientierten Filamenten (300 m/min) werden die Abbauerscheinungen an der Oberfläche zuerst sichtbar.

Zugprüfungen

Bei Multifilamentgarnen aus PBS78 und PBS71 mit rundem Filamentquerschnitt korreliert die Veränderung der Zugfestigkeit nach dem Substratkontakt nicht mit den unterschiedlichen Wickelgeschwindigkeiten. Die Veränderung der Zugfestigkeit der Multifilamentgarne mit kreuzförmigem Filamentquerschnitt aus PBS78 nimmt wie erwartet nach Substratkontakt (Tag 14 und 28) mit zunehmender Wickelgeschwindigkeit ab. Diese Tendenzen treten auch bei Multifilamentgarnen mit kreuzförmigen Filamentquerschnitt aus PBS71 nach 14 Tagen auf. Beispielhaft ist in

Abb. II.14 die verbleibende Zugfestigkeit der Multifilamentgarne aus PBS78 nach der Alterung normiert auf die Zugfestigkeit an Tag 0 vor der Alterung abgebildet.

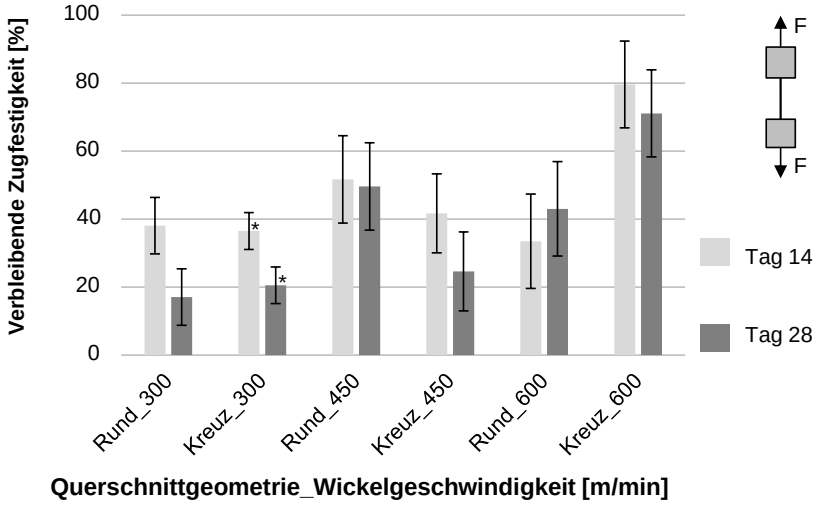


Abb. II.14: Verbleibende Zugfestigkeit der Multifilamentgarne aus PBS78 nach der Alterung normiert auf die Zugfestigkeit an Tag 0 vor der Alterung (* 19 statt 20 Messungen aufgrund der Zugprüfmaschine) [Boa20]

Nur bei den Wickelgeschwindigkeiten von 450 m/min sind bei den kreuzförmigen Filamenten stärkere Verringerungen der Zugfestigkeit im Vergleich zu den runden Filamenten gemessen worden. Eine größere Oberfläche des kreuzförmigen Filaments führt demnach nur bei bestimmten Versuchsparametern zu einem stärkeren Abbau. Es ist möglich, dass Wechselwirkungen bei der Abbaubarkeit zwischen der größeren Oberfläche und der gleichzeitig höheren Orientierung der kreuzförmigen Filamente, die zusätzlich von der Wickelgeschwindigkeit abhängig ist, entstehen.

DSC-Prüfungen

Durch die Alterung verändert sich der Kristallisationsgrad und der Schmelzpunkt nur gering. An Tag 0 sind die Glasübergangstemperaturen der kreuzförmigen Filamente etwas höher als die der runden Filamente. Nach 28 Tagen in Substratkontakt ist eine leichte Erhöhung der Glasübergangstemperatur (< 3,3 °C), bei allen Versuchspunkten messbar. Da sich auch die Werte der Kontrollproben über die Zeit in ähnlichem Maß wie bei den Alterungsproben verändert, kann keine eindeutige Aussage bezüglich der Veränderung des Kristallisationsgrades, der Glasübergangstemperatur und des Schmelzpunktes durch die Alterung in Verbindung mit den Alterungsbedingungen getroffen werden. [Boa20]

II.1.4.3 T 4.1 Charakterisierung der Vliesstoffe

Das Flächengewicht der Vliesstoffe wurde vor und nach den Alterungsversuchen (ca. 24 h nach der Reinigung) bestimmt und verglichen. Ebenso wurden die Vliesstoffe unmittelbar vor und nach den Alterungsversuchen einer mechanischen Zugprüfung unterzogen. Die Zugprüfung der Vliese erfolgte in Anlehnung an die DIN EN ISO 29 073 [DIN EN ISO 29 073 Teil 3]. Die Zugprüfung wurde im Normklima nach DIN EN ISO 139 durchgeführt und erfolgte auf der Zugprüfmaschine ZMART.PRO vom Typ 1455 der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm [DIN EN ISO 139]. Die Einspannlänge betrug 200 mm und die Prüfgeschwindigkeit 100 m/min. Es wurde ein 1 kN Kraftaufnehmer vom Typ XForce HP verwendet. Die Prüfung erfolgte ohne Aufbringung einer Vorkraft. Für jeden Versuchspunkt wurden jeweils acht Proben mit einer Probengröße von 280 mm x 50 mm ausgestanzt. Von den acht Proben, wurden jeweils vier in Produktionsrichtung (MD, machine direction) und vier Proben quer dazu (CD, cross direction) entnommen. Die Proben, welche als Referenz am Tag 0 der Alterungsversuche geprüft wurden, wurden paarweise mit den Testproben entnommen.

Die Vliese werden unter einem Stereomikroskop vom Typ M205C (Software: LASV 4.12) der Firma Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, optisch untersucht. Es werden jeweils zwei Vliesproben pro Versuchspunkt (Rund und Kreuz) von Tag 0 und Tag 14 mit einer Probengröße von 130 mm x 50 mm an mehreren Stellen untersucht [Boa20]. Es wird eine 50- und eine 160-fache Vergrößerung gewählt. Ein Vergleich der Proben vor und nach den Alterungsversuchen ist in Abb. II.16 dargestellt (siehe Kapitel II.1.4.4).

II.1.4.4 T 4.2 Test der biologischen Abbaubarkeit und künstliche Alterung von Vliesstoffen

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Testmethode zur Untersuchung des Desintegrationsverhaltens von Vliesstoffen entwickelt. Es wurden die folgenden Testmethoden bei der Erarbeitung dieser neuen Testmethode berücksichtigt:

- Entwickelte Alterungsmethode der Multifilamentgarne (siehe Kapitel II.1.4.2)
- [DIN EN ISO 11721-1] Textilien – Bestimmung der Widerstandsfähigkeit zellulosehaltiger Textilien gegen Mikroorganismen - Erdeingrabetest
- [DIN EN 12225] Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Prüfverfahren zur Bestimmung der mikrobiologischen Beständigkeit durch einen Erdeingrabungsversuch

In Anlehnung an die Alterungsversuche der Multifilamentgarne wird die Komposterde des Abfallentsorgungszentrum Asdonkshof der Kreisweseler Abfallgesellschaft mbH & Co. KG für die Alterungsversuche der Vliesstoffe verwendet. Die Komposterde wird mit einem Sieb mit Maschenweite von ca. 3 mm fraktioniert. In einer Box werden jeweils sechs Vliesproben in Substratkontakt gebracht. Die Umgebungstemperatur betrug 20 °C. Nach der Alterung wurden die Proben entnommen und mit fließendem Leitungswasser (ca. 0,65 l/min) gereinigt. Zum Abschluss werden die Proben nach der Reinigung mit saugstarken Papierputztüchern abgetupft. In Abb. II.15 ist die Reinigung einer Vliesprobe dargestellt. Es ist zu erkennen, dass kleine Schmutzpartikel im Vliesstoff verbleiben.

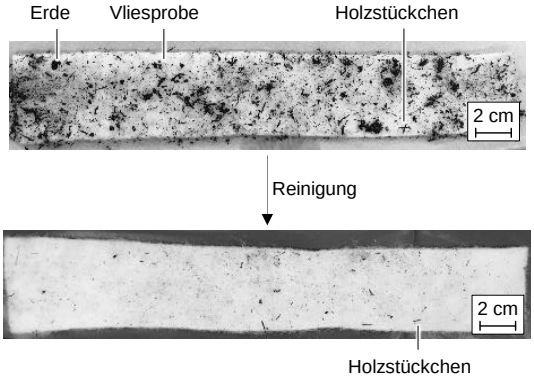


Abb. II.15: PBS78_kreuz_450 Vliesprobe (14 d) vor (oben) und nach (unten) der Reinigung [Boa20]

Untersuchung des Flächengewichts

Nach den Alterungsversuchen von 14 Tagen ist das Flächengewicht nahezu unverändert (Veränderung Mittelwert < 4 %). Dies kann unter anderem auf eine verbliebene Restverschmutzung zurückgeführt werden. Auch in der Literatur können für Vliese aus PBAT und CA ähnliche Ergebnisse gefunden werden [SDB96, TR05].

Stereomikroskopprüfung

Zwischen den Vliesproben vor den Alterungsversuchen (Tag 0) und den Vliesproben nach 14 Tagen in Substratkontakt sind optisch, bis auf eine verbleibende Restverschmutzung, keine eindeutigen Unterschiede zu erkennen.

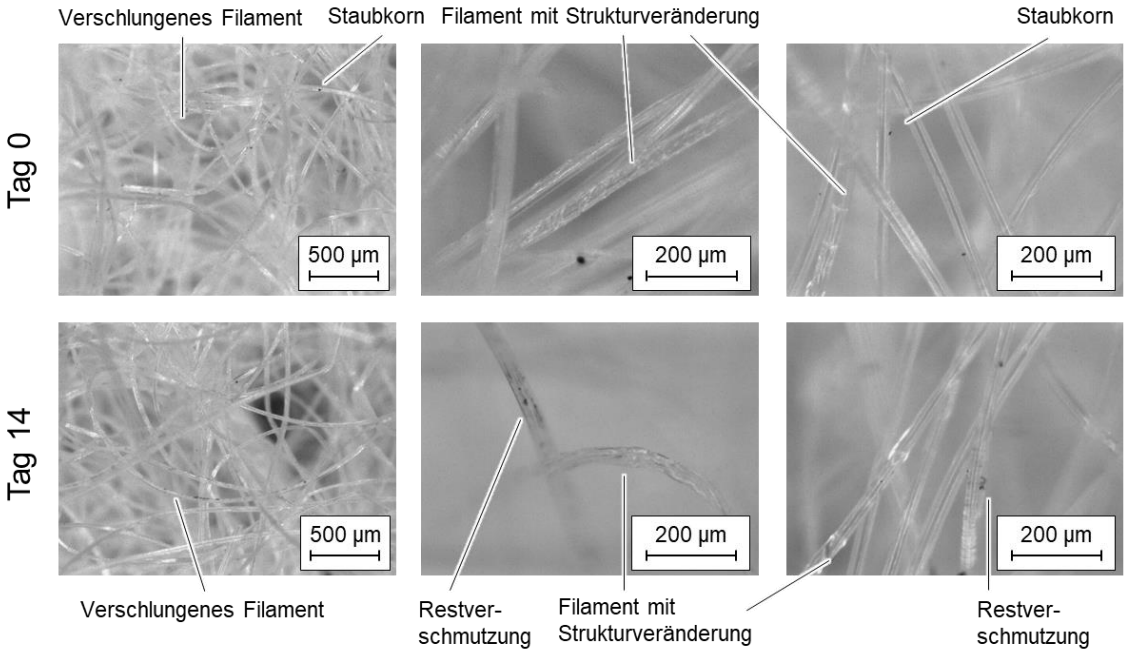


Abb. II.16: Mikroskopische Aufnahme von runden (rechts) und profilierten (links und mitte) Filamenten der Vliesstoffe vor (Tag 0) und nach 14 Tagen in Bodenkontakt

Zugprüfung

Die Zugfestigkeit und die Dehnung der untersuchten Vliesstoffe nehmen durch die Alterungsversuche ab. Die Zugfestigkeit verringert sich bei den Vliesstoffen aus runden Filamenten (ca. 50 - 52 %) deutlicher als die Zugfestigkeit der Vliese aus kreuzförmigen Filamenten. Auch bei der Dehnung werden diese Tendenzen mit einer 25 – 32 % stärkeren Veränderung festgestellt. In Abb. II.17 sind die prozentualen Veränderungen der Zugeigenschaften der Multifilamente und Vliesproben an Tag 14 normiert auf die Referenzproben von Tag 0 aufgetragen.

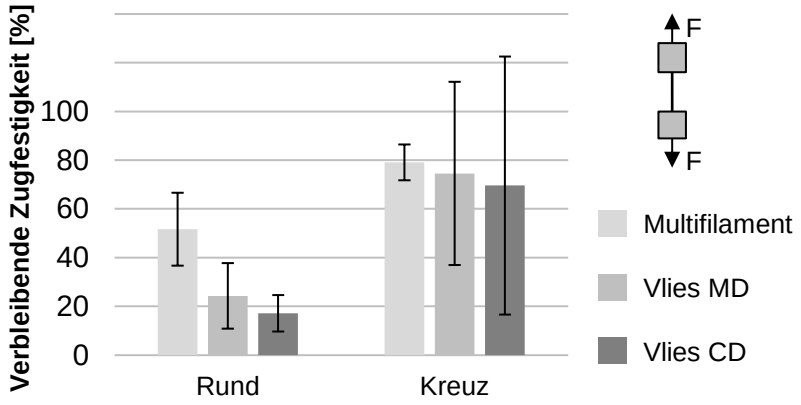


Abb. II.17: Verbleibende Zugfestigkeit der Multifilamente und Vliesstoffe aus PBS78 nach der Alterung normiert auf die Zugfestigkeit an Tag 0 vor der Alterung (MD: Machine Direction, CD: Cross Direction) [Boa20]

Bei den Multifilamentgarnen und den Vliesstoffen treten die gleichen Tendenzen auf, wobei sich die Zugfestigkeit der Vliesproben stärker ändert als die der Multifilamentgarne. Eine mögliche Erklärung ist, dass zusätzlich zum Materialabbau der Filamente auch die verbleibende Reibung der Filamente untereinander bei Vliesstoffen eine Rolle spielt. Es ist möglich, dass die verbleibende Reibung durch die Geometrie der kreuzförmigen Filamente auch bei kürzerer Faserlänge nach der Alterung höher ist als bei den runden Filamenten. [Boa20]

II.2 Verwertung

Beim Forschungsvorhaben handelte es sich um eine Machbarkeitsstudie, in der grundlegende Zusammenhänge zwischen Abbaubarkeit, Kristallisation und verfügbarer Oberfläche von Multifilamenten untersucht wurden. Die Ergebnisse des Projektes sind nicht direkt in ein konkretes Produkt umsetzbar. Derzeit finden gemeinsam mit den assoziierten Partnern Überlegungen statt, in welchen konkrete Anwendungen die Erkenntnisse zielführend eingesetzt werden können, diskutiert wurden u.a. Monofilamente, die als Nahtmaterial für Naturfasermatten genutzt werden oder Multifilamente mit verlängerter Haltbarkeit für Pflanzschutzprodukte als bisher auf dem Markt verfügbare Produkte. Für ein geplantes Folgeprojekt werden Industriepartner aus anderen Branchen wie z.B. Land- oder Forstwirtschaft angesprochen.

Die im Projekt entwickelten Herstellungsverfahren und Desintegrationstests für Filamente und Vliese können in anderen industriellen oder öffentlich geförderten Projekten eingesetzt und verbessert werden. Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus der Entwicklung des Prüfverfahrens für das Abbauverhalten werden weitere angepasste Prüfverfahren entwickelt. So kann nach und nach ein breit gefächertes Prüfangebot für alle denkbaren Kunststoffprobeformen entwickelt werden.

Eine Verbreitung der Erkenntnisse aus diesem Forschungsvorhaben erfolgte zudem bereits während der Laufzeit über begleitende Studentische Arbeiten.

II.3 Erkenntnisse von Dritten

In dem vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft geförderten Bericht „Biokunststoffe“ der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) wurden die folgenden Fortschritte auf dem Gebiet der biologisch abbaubaren Kunststoffe zwischen 2019 und 2020 erwähnt. Im Jahr 2019 wurden erstmals Faserprodukte eines österreichischen Anbieters, die sowohl industriell kompostierbar als auch in der Erde, Süß- und Salzwasser abbaubar sind, zertifiziert. Auch im Bereich der biobasierten Polymere gibt es Fortschritte. Seit 2020 ist die großtechnische Produktion von biobasiertem Polypropylen von mehreren Kunststoff-Produzenten bekanntgeworden. [Thi20]

Auch der Hersteller MCPP hat im Laufe des Projekts sein Sortiment an biobasierten und biologisch abbaubaren Polymeren ausgebaut und verändert. PLA ist zu einem international stark nachgefragten Polymerwerkstoff geworden und war für die 3. Versuchsreihe, die zwischen März und August 2020 am ITA durchgeführt wurde, bei verschiedenen Herstellern nicht erwerbbar.

Seit einigen Jahren werden immer wieder neue Startups mit hoher Innovationskraft gegründet. Hier zu nennen ist beispielsweise OceanSafe. OceanSafe ist ein mittelständisches Unternehmen in den Bereichen der Heimtextilien, technischen Textilien und Bekleidung. Im Februar 2020 teilte OceanSafe mit, ein Patent für die weltweit erste synthetische schwerentflammbare Textilfaser, auf der neuen Polymer-Basis, die 100 % biologisch abbaubar ist, beantragt zu haben. Das Patent ist noch nicht veröffentlicht. Ihre gesamte Produktpalette ist schadstofffrei und zu 100 % biologisch abbaubar und viele Produkte sind Cradle to Cradle Certified™ Gold zertifiziert. [Oce20]

Im September 2019 wurde die Norm ISO 21701 zur Untersuchung der Kompostierbarkeit von biologisch abbaubaren Textilien auf petrochemischer Rohstoffbasis veröffentlicht. Nach ISO 21701 soll zunächst eine beschleunigte Hydrolyse der Proben durchgeführt werden, bevor die Textilien in kontrollierte Kompostierbedingungen übergeben werden. Begründet wird dies mit dem hohen Molekulargewicht und der Kristallinität der Chemiefasern wodurch sie nicht dasselbe Abbauverhalten wie Naturfasern aufweisen. In der Norm wird darauf hingewiesen, dass jegliche Schlussfolgerung auf die biologische Abbaubarkeit oder Kompostierbarkeit des textilen Materials nicht erlaubt ist. Außerdem wurden zwischen September 2019 und September 2020 die in Tab. II.13 aufgeführten Normen überarbeitet und an den aktuellen Erkenntnisstand und Umsetzmöglichkeiten angepasst oder als neuer Entwurf ausgearbeitet.

Tab. II.13: Normen, die zwischen September 2019 und September 2020 überarbeitet wurden

Norm	Thema	Veränderung
[DIN EN ISO 17556]	Norm zur Bestimmung der vollständigen aeroben Bioabbaubarkeit von Kunststoffmaterialien im Boden.	September 2019: Im Vergleich zu 2012 wurden im Wesentlichen die Berechnung des biologischen Abbaus und die Prüfdauer (höchstens 2 Jahre) überarbeitet.
[DIN EN ISO 16929]	Norm zur Bestimmung des Zersetzungsgrades von Kunststoffmaterialien unter festgelegten Bedingungen der Kompostierung mittels einer Technikumsmaßstab-Prüfung.	Februar 2020: Die wesentlichen Veränderungen im Vergleich zu 2013 bestanden in der Verringerung der Mindestmenge an zu nutzendem Bioabfall und einer damit verbundenen Anpassung des Temperaturprofils. Seit Mai 2020 gibt es weitere Bestrebungen zur Überarbeitung der Norm.
DIN EN 17427 (Entwurf)	Verpackung - Anforderungen an und Prüfmethoden für heimkompostierbare Tragetaschen	Neuer Entwurf April 2020: Grundlage für die Kennzeichnung von biologisch abbaubaren Tragetaschen. Typisierung, biologischer Abbau, Zerfall während der Kompostierung, Kompostqualität und Erkennbarkeit.
DIN EN 17428 (Entwurf)	Verpackung - Bestimmung des Zersetzungsgrades unter simulierten Heimkompostierungsbedingungen	Neuer Entwurf April 2020: Ein Verfahren zur Bestimmung des Zersetzungsgrades von Verpackungsmaterialien fest, wenn dieses im Labormaßstab einer Heimkompostierungsumgebung ausgesetzt wird.

II.4 Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit fand keine Veröffentlichung der Ergebnisse statt. Im ersten Quartal 2021 wird eine Pressemeldung mit den wichtigsten Ergebnissen des Projekts erstellt und an die Fachpresse versandt. Zudem werden 2021 wissenschaftliche Publikationen geschrieben, die in peer reviewed Journals veröffentlich werden sollen. Bereits im Dezember ist ein Abstract zur Präsentation der Ergebnisse auf einer Fachkonferenz im März 2021 eingereicht worden (Bioplastics meets Industry, Hochschule Hof). Eine Übersicht der geplanten Veröffentlichungen sind in Tabelle 1 des Erfolgskontrollberichts aufgeführt.

Sofern die International Conference on Bio-based Materials 2021 wieder als Präsenzveranstaltung mit Ausstellung stattfindet, werden hier auf einem Ausstellungsstand Projektergebnisse präsentiert.

III. ANHANG

III.1 Teilvorhaben 1: Biologisch abbaubare Kunststoffe, Polymercharakterisierung und Abbauverhalten / Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. / UMSICHT (Koordinator)

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Gesamtziel des Vorhabens „DegraFib“ ist die gezielte Steuerung der biologischen Abbaubarkeit von Filamentgarnen über die Kristallinität und den Filamentquerschnitt. Neben der Auswahl des Polymers soll die Geschwindigkeit des enzymatischen Abbaus des Polymers durch Änderung der zugänglichen Filamentoberfläche und der Polymerkristallinität eingestellt werden. Die Arbeitsziele des Teilvorhabens 1 sind im Einzelnen:

- Bewertung der Eignung von biobasierten und biologisch abbaubaren Polymeren für die Verarbeitung im Schmelzspinnprozess aufgrund Rechercheergebnissen und Materialprüfungen (gemeinsam mit ITA),
- Entwicklung jeweils eines Prüfverfahrens für das Desintegrationsverhalten von Mulitfilamentgarnen und Vliesen mit Substratkontakt,
- Korrelation des Desintegrationsverhaltens mit den Querschnittsgeometrien und den Polymerkristallinitäten.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1 Recherche und Auswahl geeigneter biologisch abbaubarer Polymere

- Ausführliche Literaturrecherche zum Abbauverhalten bzw. Desintegrationsverhalten von Polymeren
- Zusammenstellung von technischen Verarbeitungsinformationen verschiedener geeigneter biologisch abbaubarer und biobasierter Polymere

AP 2 Polymercharakterisierung

- Planung und Durchführung der DSC-Untersuchungen der Rohstoffe

AP 4, T4.1 Charakterisierung der Filamente

- Planung und Durchführung von REM-Untersuchungen der Filamente
- Planung und Durchführung der DSC-Untersuchungen der Filamente

AP 4, T4.2 Test der biologischen Abbaubarkeit und künstliche Alterung von Filamenten und Vliesen

- Entwicklung und Bau eines Desintegrationsteststands für Filamente zur Abbildung des Alterungsverhaltens
- Auswahl, Beschaffung und Charakterisierung des Substrats (Kompost)
- Durchführung zweier Desintegrationsdurchläufe, Erarbeitung jeweiliger Optimierungsstrategien und Planung eines weiteren Desintegrationsdurchlaufs
- Entwicklung eines Desintegrationstests für Vliese

AP 4, T4.2 Bewertung der technologischen Eigenschaften der Filamente und Vliese

- Diskussion der Ergebnisse der Desintegrationstests gemeinsam mit ITA
- Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse mit den assoziierten Partnern

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

- Tabellarische Darstellung der in der ausgewerteten Fachliteratur beschriebenen Abbau- bzw. Desintegrationsversuche mit Angaben zu Material, Abbaubedingungen, Probeformen und Präparation sowie durchgeführten Analysen (siehe Anhang V).
- Auswahl von Polymilchsäure (PLA) und Polybuthylensuccinat (PBS) als geeignete Polymere für das Schmelzspinnverfahren (gemeinsam mit ITA).
    - PLA: Ingeo™ 6400D der Firma NatureWorks LLC)
    - PBS: FD72PM der Firma Mitsubishi Chemical Performance Polymers (MCPP) GmbH
- PBS: FD92PM, FZ71PM und FZ78TM der Firma Mitsubishi Chemical Performance Polymers (MCPP) GmbHDesintegrationstest und die dazugehörige Probenpräparation für Multifilamente konnte in mehreren Durchläufen erfolgreich entwickelt und optimiert werden.Desintegrationstest und Probenpräparation für Vliese wurde erfolgreich entwickelt.
- Ein komplexer Filamentquerschnitt reduziert die Kontaktfläche zum Substrat und verzögert so den Beginn der Polymerdegradation (detaillierte Beschreibung der Zusammenhänge siehe II.1.4 AP4). Diese Wirkung ist auch bei gesiebtem Substrat zu beobachten. Daher kann der Einfluss des Filamentquerschnitts auf das Desintegrationsverhalten nachgewiesen werden.
- Die Filamentrelaxation und die Polymerkristallinität zeigen einen komplexen Einfluss auf die Abbaugeschwindigkeit. Bei ausgeprägter Filamentrelaxation und hoher Polymerkristallinität zerfallen die Multifilamente im Desintegrationsversuch schneller in Fragmente (detaillierte Beschreibung der Zusammenhänge siehe II.1.4 AP4).

III.2 Teilvorhaben 2: Schmelzspinnen von biobasierten Polymeren/Profilfilamenten sowie Weiterverarbeitung und Charakterisierung der Filamente

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Gesamtziel des Vorhabens „DegraFib“ ist die gezielte Steuerung der biologischen Abbaubarkeit von Filamentgarnen. Neben der Auswahl des Polymers soll die Geschwindigkeit des enzymatischen Abbaus des Polymers durch Änderung der zugänglichen Filamentoberfläche und der Polymerkristallinität eingestellt werden. Die Arbeitsziele des Teilvorhabens 2 sind im Einzelnen:

- Bewertung der Eignung von biobasierten und biologisch abbaubaren Polymeren für die Verarbeitung im Schmelzspinnprozess
- Herstellung von Multifilamentgarnen mit unterschiedlichen Querschnittsgeometrien und Kristallinitäten
- Entwicklung eines Prüfverfahrens für das Abbauverhalten von Multifilamentgarnen und Vliesen mit Substratkontakt
- Korrelation des Abbauverhaltens mit der Querschnittsgeometrie und der Kristallinität
- Herstellung von Vliesen aus den entwickelten Multifilamentgarnen

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1 Recherche und Auswahl geeigneter biologisch abbaubarer Polymere

- Ausführliche Literaturrecherche zur Schmelzspinnbarkeit von biobasierten und biologisch abbaubaren Polymeren unter Berücksichtigung der Abbaubarkeit, thermischer und rheologischer Eigenschaften.
- Literaturrecherche zur Patentsituation
- Auswahl und Beschaffung vielversprechender Polymere. Die Polymere PLA und PBS wurden in Vorversuchen auf ihre Schmelzsspinnbarkeit untersucht und für die drei durchgeführten Versuchsreihen der Schmelzspinnversuche in AP 3 ausgewählt.

AP 2 Polymercharakterisierung

- Berücksichtigung der Polymercharakterisierung für die Auswahl geeigneter Polymere für die Schmelzspinnversuche.

AP 3 Filamentextrusion und Vliesherstellung

- Die Untersuchung der Schmelzspinnbarkeit erfolgte in zwei Versuchsreihen mit PLA und drei Versuchsreihen mit PBS auf einer Pilotanlage.
- Es wurden geeignete Prozessparameter für den Schmelzspinnprozess für vier verschiedene Polymertypen gefunden
- Die Faserquerschnitte und Abzugsgeschwindigkeiten wurden variiert wodurch unterschiedliche Oberflächen bei gleichbleibender Feinheit sowie unterschiedlicher Kristallinitäten realisiert werden konnten. Einige Versuchspunkte konnten nicht realisiert werden.
- Prozessparameter zur Vliesherstellung aus PBS Filamenten bei unterschiedlichen Faserquerschnitten wurden gefunden.
- Es wurden Vliesstoffe mithilfe einer Laborkrempelanlage und einem Nadelstuhl hergestellt.

AP 4, T4.1 Charakterisierung der Filamente

- Planung und Durchführung von Zugversuchen der Filamente (und Vliesstoffe zum Projektende)
- Planung und Durchführung der Auflichtmikroskopie der Filamente (Querschnittsanalyse)
- Planung und Durchführung der Stereomikroskopie der Vliesstoffe

AP 4, T4.2 Test der biologischen Abbaubarkeit und künstliche Alterung von Filamenten und Vliesen

- Planung und Optimierung der Alterungsversuche und Testmethoden der ersten zwei Versuchsreihen mit Fraunhofer UMSICHT (PLA und PBS Filamente) und Durchführung der dritten Versuchsreihe (PBS Filamente und Vliesstoffe)

AP 4, T4.2 Bewertung der technologischen Eigenschaften der Filamente und Vliese

- Diskussion der Ergebnisse der Abbautests mit Fraunhofer UMSICHT
- Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse mit den assoziierten Partnern

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

- Auswahl von Polymilchsäure (PLA) und Polybuthylensuccinat (PBS) als geeignete Polymere für das Schmelzspinnverfahren (gemeinsam mit Fraunhofer UMSICHT) und Beschaffung geeigneter Polymergrades [Nat18, PTT18, PTT20a, PTT20b, PTT20c].
- Ermittlung geeigneter Verarbeitungsparameter im Schmelzspinnprozess für die ausgewählten Biopolymere: Filamente mit runden und profilierten (sternförmig, flach, kreuzförmig) Filamentquerschnitten, unterschiedlichen Wickelgeschwindigkeiten und Kristallinitäten wurden hergestellt.
- Erfolgreiche Herstellung von Vliesen aus am ITA schmelzgesponnenen Filamenten mit einem Flächengewicht von ca. 300 g/m^2.
- Ein Abbau bzw. die Alterung der Filamente und Vliese kann festgestellt werden. Teilweise war die Charakterisierung der Filamente nach der Alterung nicht mehr möglich. Die Testmethode wurde daraufhin weiterentwickelt. Der Einfluss der Filamentoberfläche bei konstanter Garnfeinheit auf die biologische Abbaubarkeit von Multifilamentgarnen und Vliesen wurde untersucht (Fraunhofer UMSICHT mit Beteiligung ITA)
-

In II.1.4 (AP4) sind auch die Ergebnisse der Alterungsversuche und die anschließende Überprüfung der Eigenschaften detailliert aufgeführt. Wissenschaftliche Erkenntnisse:

- **Filamente (PBS und PLA):** Entgegen der Erwartungen führt eine größere Oberfläche der profilierten Filamente, im Vergleich zu den runden Filamenten bei gleicher Garnfeinheit, nicht zu einer Beschleunigung des Alterungsprozesses der Multifilamentgarne. Bei der optischen Untersuchung werden bei runden Filamenten, die mit einer niedrigen Geschwindigkeit gewickelt wurden, zuerst Abbauerscheinungen an der Oberfläche sichtbar. Die Veränderung der Zugfestigkeit durch die Alterung korreliert teilweise mit der Wickelgeschwindigkeit. Anhand der Auswertung der thermoanalytischen Untersuchung der Multifilamentgarne wird die Vermutung aufgestellt, dass Relaxationsvorgänge während der Hydrolyse auftreten. Die daraus resultierende stärkere Nahordnung führt zu einer geringeren Veränderung der Zugfestigkeit. Es wird zudem vermutet, dass eine insgesamt höhere Orientierung und eine gleichmäßigere Kristallstruktur bei den kreuzförmigen Filamenten zu einem langsameren Abbau führen. Es besteht demnach ein komplexer Zusammenhang zwischen dem Abbauverhalten und dem Filamentquerschnitt Es wird vorgeschlagen in zukünftigen Arbeiten diese Wechselwirkungen durch zusätzliche Prüfmethoden mit zu berücksichtigen.
- **Vliesstoffe (PBS):** Bei der optischen Untersuchung der Vliesproben nach 14 Tagen in Substratkontakt sind keine Abbauerscheinungen zu erkennen. Durch die Alterungsversuche nimmt die Zugfestigkeit und die Dehnung unabhängig von der Produktionsrichtung ab. Die Vliese aus kreuzförmigen Filamenten weisen eine geringere Veränderung hinsichtlich der Zugfestigkeit und Dehnung auf als die Vliese aus runden Filamenten. Insgesamt nimmt die Zugfestigkeit der Vliese stärker ab als die der zugehörigen Multifilamentgarne. Es wird vermutet, dass diese Unterschiede auf den Materialabbau und zusätzlich auf den veränderten Zusammenhalt der Vliesproben nach Substratkontakt zurückzuführen sind. In diesem Projekt wurden am Institut für Textiltechnik zum ersten Mal Vliese aus PBS78 für Alterungsversuche hergestellt. Es wird vorgeschlagen in zukünftigen Arbeiten den Prozess der Vliesbildung weiter anzupassen.

IV. Anhang

Tab. IV.1: Auswertung der Literatur zum biologischen Abbau von Polymeren (Kompartimente farblich markiert, grün: Boden unter 40°C, rot: Kompost über 40°C, blau: Meer, gelb, Süßwasser, weiß: sonstiges)

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PBS	GS Pla AZ-91TN (MCC)	Folien 30 mmm x 100 mm x 30µm	Boden (Andosol ist ein hochporöser, dunkel gefärbter Boden, der aus Ausgangsmaterial vulkanischen Ursprungs wie Vulkanasche, Tuff und Bimsstein entwickelt wurde.) Raumtemperatur	4%	14 Tage	maximal errreichter Abbau mit den Bakterien WF-6 + YB-6, steriler Boden - etwas geringere Werte bei nicht sterilem Boden	CO_2 Produktion	Spezielle Bakterienstämme wurden untersucht (WF-6, Yb-6).	nicht angegeben	Abe et al. 2010
PBS	Showa Highpolymer	31 x 30 x 2 mm	Ackerboden, 25 °C, 60 % Luftfeuchte, 35-40 %, Feuchtigkeit im Boden	1%	28 Tage		Masseverlust, Mikroskopie	Bakterienmasse 1 x 10^9 Zellen/g Boden	teilweise angegeben	Adhikari et al. 2016
PBS	Showa Highpolymer	Pulver	Ackerboden, 25 °C, 60 % Luftfeuchte, 35-40 %, Feuchtigkeit im Boden	17%	28 Tage		Verlust des Gesamtkohlenstoffs (TC) im Boden	Bakterienmasse 1 x 10^9 Zellen/g Boden	teilweise angegeben	Adhikari et al. 2016
PBS	Showa Highpolymer	k. A.	Feldversuche, 1 x 1 m Ackerboden		2 Jahre	deutliche Veränderung der Oberfläche	Oberflächenbetrachtung über Mikroskopie	Bakterienmasse 5,4 x 10^8 Zellen/g Boden	teilweise angegeben	Adhikari et al. 2016
PBS-Stärke-Blend (50/50)	Matsubara Shoji	30 x 30 x 2 mm	Ackerboden, 25 °C, 60 % Luftfeuchte, 35-40 %, Feuchtigkeit im Boden	7%	28 Tage		Masseverlust, Mikroskopie	Bakterienmasse 1 x 10^9 Zellen/g Boden	teilweise angegeben	Adhikari et al. 2016
PBS-Stärke-Blend (50/50)	Matsubara Shoji	Pulver	Ackerboden, 25 °C, 60 % Luftfeuchte, 35-40 %, Feuchtigkeit im Boden	24%	28 Tage		Verlust des Gesamtkohlenstoffs (TC) im Boden	Bakterienmasse 1 x 10^9 Zellen/g Boden	teilweise angegeben	Adhikari et al. 2016
PBS-Stärke-Blend (50/50)	Matsubara Shoji	k. A.	Feldversuche, 1 x 1 m Ackerboden		2 Jahre	deutliche Veränderung der Oberfläche	Oberflächenbetrachtung über Mikroskopie	Bakterienmasse 5,4 x 10^8 Zellen/g Boden	teilweise angegeben	Adhikari et al. 2016
PLA	Mitsui Chemicals	32 x 30 x 2 mm	Ackerboden, 25 °C, 60 % Luftfeuchte, 35-40 %, Feuchtigkeit im Boden	0%	28 Tage		Masseverlust, Mikroskopie	Bakterienmasse 1 x 10^9 Zellen/g Boden	teilweise angegeben	Adhikari et al. 2016
PLA	Mitsui Chemicals	Pulver	Ackerboden, 25 °C, 60 % Luftfeuchte, 35-40 %, Feuchtigkeit im Boden	14%	28 Tage		Verlust des Gesamtkohlenstoffs (TC) im Boden	Bakterienmasse 1 x 10^9 Zellen/g Boden	teilweise angegeben	Adhikari et al. 2016
PLA	Mitsui Chemicals	k. A.	Feldversuche, 1 x 1 m Ackerboden		2 Jahre	Veränderung der Oberfläche	Oberflächenbetrachtung über Mikroskopie	Bakterienmasse 5,4 x 10^8 Zellen/g Boden	teilweise angegeben	Adhikari et al. 2016

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PLA	Eco-PLA, Cargill	Folie 2,5 cm x 4 cm x 75µm	14% Kaninchenfutter, 12% Maiskolben, 6,0% Sand, 0,4% geschredderte Zeitungen, 0,6% Mist, 8,0% Inokulum, 8% destilliertes Wasser, 1,0% PLA-Polymerstreifen: 40, 50 und 60 °C	40 °C: 0,5 mol CO_2 50°C: 1 mol CO_2 60 °C: 1 mol CO_2	15 Tage	kein prozentualer Abbau angegeben	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Agarwal et al.1998
PLA	Summit Plastic Company	Blumentopffragmente	Komposterde, 58 °C	13 ± 3 %	60 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Ahn et al. 2011
PLA-Stärke-Geflügelfeder-fasern (80/15/5)	PLA 3001D von Natureworks	Blumentopffragmente	Komposterde, 58 °C	53 ± 2 %	60 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Ahn et al. 2011
PLA-PBAT-Blend	Ecovio BASF	150 x 10 mm	Meerwasser ergänzt mit anorganischen Nährstoffen, 30 °C	10,4%	48 Tage	Test nach nach ASTM-D6691-2009	CO_2 Produktion	Eine weitere Probe wurde mit Wärme, Feuchtigkeit und UV vorgealtert. Das Abbauverhalten dieser Probe war nicht signifikant anders.	nicht angegeben	Alvarez-Zeferino et al. 2015
PBS	Bionolle 1020, Showa High Polymers	Pulver	gesiebte Komposterde (0,8 cm), 58 ± 2 °C, Feuchtigkeit 50–55 %	90%	160 Tage	Methode nach ASTM D6400	CO_2 Produktion		angegeben	Anstey et al. 2014
PBS-Maisklebermehl-Composite (75/25)	PBS: Bionolle 1020, Showa High Polymers	Pulver	gesiebte Komposterde (0,8 cm), 58 ± 2 °C, Feuchtigkeit 50–55 %	90%	160 Tage	Methode nach ASTM D6400	CO_2 Produktion		angegeben	Anstey et al. 2014
PBS-Rapsmehl-Composite (75/25)	PBS: Bionolle 1020, Showa High Polymers	Pulver	gesiebte Komposterde (0,8 cm), 58 ± 2 °C, Feuchtigkeit 50–55 %	90%	160 Tage	Methode nach ASTM D6400	CO_2 Produktion		angegeben	Anstey et al. 2014
PBS-Rutenhirse-Composite (75/25)	PBS: Bionolle 1020, Showa High Polymers	Pulver	gesiebte Komposterde (0,8 cm), 58 ± 2 °C, Feuchtigkeit 50–55 %	90%	200 Tage	Methode nach ASTM D6400	CO_2 Produktion		angegeben	Anstey et al. 2014
PBS-Sojamehl-Composite (75/25)	PBS: Bionolle 1020, Showa High Polymers	Pulver	gesiebte Komposterde (0,8 cm), 58 ± 2 °C, Feuchtigkeit 50–55 %	90%	140 Tage	Methode nach ASTM D6400	CO_2 Produktion		angegeben	Anstey et al. 2014
PHBV	Im Projekt hergestellt	Folien 10 x 22 mm, Dicke 0.06 ± 0.01mm	gesiebte Komposterde (2 mm), 80 % Bodenfeuchtigkeit, 25 °C, 65 % Luftfeuchtigkeit	90%	10,7 - 22,2 Monate	Abhängig vom HV-Anteil im Polymer	CO_2 Produktion	Methode nach ASTM D 5988-03	angegeben	Arcos-Hernandez et al. 2012
PBAT	Ecoflex F Blend A1200, BASF	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml künstliches Meerwasser aus Aquarium, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	0%	1 Jahr		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017
PBAT	Ecoflex F Blend A1200, BASF	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml gesammeltes Regenwasser aus Teichen, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	0%	1 Jahr		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017
PCL	Capa 6800, Perstorp	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml künstliches Meerwasser aus Aquarium, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	6,50%	1 Jahr		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PCL	Capa 6800, Perstorp	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml gesammeltes Regenwasser aus Teichen, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	8,50%	1 Jahr		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017
PET	PET RT32, Trevira	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml künstliches Meerwasser aus Aquarium, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	0%	1 Jahr		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017
PET	PET RT32, Trevira	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml gesammeltes Regenwasser aus Teichen, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	0%	1 Jahr		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017
PHB	Goodfellow	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml künstliches Meerwasser aus Aquarium, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	0%	1 Jahr		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017
PHB	Goodfellow	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml gesammeltes Regenwasser aus Teichen, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	0%	1 Jahr		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017
PLA	Resomer L 210 S, Evonik	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml künstliches Meerwasser aus Aquarium, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	0%	1 Jahr		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017
PLA	Resomer L 210 S, Evonik	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml gesammeltes Regenwasser aus Teichen, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	0%	1 Jahr		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017
PLGA	Resomer RG 503, Evonik	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml künstliches Meerwasser aus Aquarium, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	100%	270 Tage		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017
PLGA	Resomer RG 503, Evonik	Folie, 1,2 x 1,2 cm x 320 ± 20 µm	3 ml gesammeltes Regenwasser aus Teichen, 25 °C, 16 h unter Neonlicht	100%	270 Tage		Masseverlust		nicht angegeben	Bagheri et. al 2017
PBS	Bionolle 1020, Showa High Polymers	Geschäumte Folien 10mm x 10mm x 2,2 mm	Komposterde, 40 % Bodenfeuchte, Raumtemperatur	9%	4 Monate	Zusätzlich enzymatisch mit Lipase AK bei 55 °C, nach 96 h 24 % Abbau bei geschäumter Probe	Masseverlust	Grafiken mit Ergebnissen fehlen im Paper	angegeben	Bahari et al. 1998
PLA	PLA 2003D	Pulver	Komposterde , 58 ± 2 °C, Bodenfeuchtigkeit 80 %	ca. 73 %	130 Tage	Die Desintegrationen von Folien von ca. 100 µm Dicke erfolgte vollständig in weniger als 7 Wochen in einer Kompostierungsumgebung (nach ISO20200:2004).	CO_2 Produktion	angepasster Test nach ISO 14855-1: 2012	nicht angegeben	Balaguer et al. 2016
PLA-Nano-$CaCO_3$-Blend (95/5)	PLA 2003D	Pulver	Komposterde , 58 ± 2 °C, Bodenfeuchtigkeit 80 %	>90%	130 Tage	Die Desintegrationen von Folien von ca. 100 µm Dicke erfolgte vollständig in weniger als 7 Wochen in einer Kompostierungsumgebung (nach ISO20200:2004).	CO_2 Produktion	angepasster Test nach ISO 14855-1: 2012	nicht angegeben	Balaguer et al. 2016

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PLA-Nanoclay-Blend (96/4)	PLA 2003D	Pulver	Komposterde , 58 ± 2 °C, Bodenfeuchtigkeit 80 %	> 90%	130 Tage	Die Desintegrationen von Folien von ca. 100 µm Dicke erfolgte vollständig in weniger als 7 Wochen in einer Kompostierungsumgebung (nach ISO20200:2004).	CO_2 Produktion	angepasster Test nach ISO 14855-1: 2012	nicht angegeben	Balaguer et al. 2016
PLA-Nano-SiO_2-Blend (96/4)	PLA 2003D	Pulver	Komposterde , 58 ± 2 °C, Bodenfeuchtigkeit 80 %	ca. 80 %	130 Tage	Die Desintegrationen von Folien von ca. 100 µm Dicke erfolgte vollständig in weniger als 7 Wochen in einer Kompostierungsumgebung (nach ISO20200:2004).	CO_2 Produktion	angepasster Test nach ISO 14855-1: 2012	nicht angegeben	Balaguer et al. 2016
TPS-Cellulosederivat-Blend	Mater-Bi Y		Kompostierbedingungen	93%	120 Tage	Bedingungen nach Tosin et al. 1996			angegeben	Bastioli 1998
TPS-EVOH Blend (60/40)	Mater-Bi AI05H	Folien	Boden	45 - 60%	26 Tage		Masseverlust		nicht angegeben	Bastioli 1998
TPS-PCL-Blend	Mater-Bi Z		Komposterde, 55 °C	>80%	30 Tage	Test nach ASTM 5338-92	CO_2 Produktion		angegeben	Bastioli 1998
PBAT	Ecoflex, BASF		Komposterde, 58 °C	>90%	80 Tage	Test nach ISO 14855	CO_2 Produktion	Übersicht über bioabbaubare Kunststoffe, Ulmann's Encyclopedia of industrial Chemistry	angegeben	Breulmann et al. 2009
Stärke-Polyester-Blend	Mater-Bi NF 803/P, Novamont, verschiedene Anteile Additive und Farbpigmente	Folie, verschiedene Dicken	Feldversuch, Einsatz als Tunnel- und Mulchfolien in Athen, Montpellier,Bari und Hannover		1 Vegetations-periode	Es wird kein prozentualer Abbau angegeben. Der zeitliche Verlauf der mechanischen Kennwerte ist uneinheitlich. Eine Abnahme zeigen nicht alle Folien	Änderungen der mechanischen Kennwerte	In den Folien zeigen sich während denFreilandversuchen Risse und Löcher	angegeben	Briassoulis 2006
Stärke-Polyester-Blend	Mater-Bi NF 803/P, Novamont, verschiedene Anteile Additive und Farbpigmente	Folie, verschiedene Dicken	Feldversuch, Einsatz als Tunnelfolien in Athen	85-100%	6 Monate		Masseverlust		angegeben	Briassoulis 2007
Stärke-Polyester-Blend	Mater-Bi NF 803/P, Novamont, verschiedene Anteile Additive und Farbpigmente	Folie, verschiedene Dicken	Feldversuch, Einsatz als Mulchfolien in Athen	80 - 100 %	4 Monate		Masseverlust		angegeben	Briassoulis 2007

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PBSe (Polybutylen-sebacat)	Novamont		Meerwasser ergänzt mit anorganischen Nährstoffen, 30 °C	66%	85 Tage	Simulation freies Meerwasser, Test nach ASTM D 6691-08	CO_2 Produktion, O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Briassoulis et al.
PBSe (Polybutylen-sebacat)	Novamont		Boden, 25 °C	45 - 58 %	170 Tage	Simulation Küstenzone/Gezeiten, Test nach ISO 17556:2015	CO_2 Produktion, O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Briassoulis et al.
PBST	Novamont		Meerwasser ergänzt mit anorganischen Nährstoffen, 30 °C	0%	85 Tage	Simulation freies Meerwasser, Test nach ASTM D 6691-08	CO_2 Produktion, O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Briassoulis et al.
PBST	Novamont		Boden, 25 °C	19-25%	170 Tage	Simulation Küstenzone/Gezeiten, Test nach ISO 17556:2015	CO_2 Produktion, O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Briassoulis et al.
PHB	Metabolix		Boden, 25 °C	72 - 80 %	170 Tage	Simulation Küstenzone/Gezeiten, Test nach ISO 17556:2015	CO_2 Produktion, O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Briassoulis et al.
PHBV	Metabolix		Meerwasser ergänzt mit anorganischen Nährstoffen, 30 °C	70%	85 Tage	Simulation freies Meerwasser, Test nach ASTM D 6691-08	CO_2 Produktion, O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Briassoulis et al.
PBSe (Polybutylen-sebacat)	Novamont	Pellets und Pulver (verschiedene Fraktionen, 50 - 700 µm)	gesiebte Komposterde (5 mm), 14,6 % Bodenfeuchtigkeit, 28 ± 2°C	55 - 90 %	138 Tage	Test nach ASTM D 5988-12	CO_2 Produktion	Je größer die **Oberfläche** desto schneller ist der Abbau.	nicht angegeben	Chinaglia et al. 2017
PBS	SK Chemicals Inc.	Folien 5 x 40 x 1 mm	1N NaOH Lösung, 25 °C	3 - 8 %	9 Tage	Bestimmung des hydrolytischen Abbaus	Masseverlust	Ermittlung der Zusammenhänge zwischen **Kristallinität** und Abbau	nicht angegeben	Cho et al. 2001
PBS	k. A.	20 x 20 mm	Gepuffertes wässriges Medium mit Belebtschlamm, 35 °C	31%	80 Tage	Test nach ISO 14851	O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Cho et al. 2011
PCL-Stärke-Polyester-Blend (55/30/15)	k. A.	20 x 20 mm	Gepuffertes wässriges Medium mit Belebtschlamm, 35 °C	88%	44 Tage	Test nach ISO 14851	O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Cho et al. 2011
PBSe (Polybutylen-sebacat)	Novamont	Folie25 µm	25 °C bzw. 28 °C, verschiedene Böden mit unterschiedlicher Feuchtigkeit (12,4 - 23,5 %)	92 % 87 - 97 %	120 Tage 210 Tage	Test nach ISO 17556	CO_2 Produktion	Zusätzlich **Toxizitätstests**	nicht angegeben	De Wilde et al. 2016
PBSeT (Polybutylen-sebacat-cobuty-lenterephtalat)	Novamont	Folie25 µm	25 °C bzw. 28 °C, verschiedene Böden mit unterschiedlicher Feuchtigkeit (12,4 - 23,5 %)	37 % 90 - 98 %	120 Tage 210 Tage	Test nach ISO 17556	CO_2 Produktion	Zusätzlich **Toxizitätstests**	nicht angegeben	De Wilde et al. 2016

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PHB	Mirel™ P5001, Metabolix	Folie 85 µm	25 °C bzw. 28 °C, verschiedene Böden mit unterschiedlicher Feuchtigkeit (12,4 - 23,5 %)	90 % 83 - 96 %	120 Tage 210 Tage	Test nach ISO 17556	CO_2 Produktion	Zusätzlich **Toxizitätstests**	nicht angegeben	De Wilde et al. 2016
PBA	im Projekt hergestellt	Folie 2 x 2 cm	gesiebter Boden (8mm) aus einem Weinberg in Australien, pH 5,6, Feuchtegehalt 38 %, 30 ± 2 °C	71%	180 Tage		CO_2 Produktion	Aerobe biologische Abbaurate im Boden nahm mit der Erhöhung der Diol-Länge von 3 auf 4 Kohlenstoffatome und von 4 auf 6 Kohlenstoffatome leicht zu	nicht angegeben	Debuissy 2017
PBS	im Projekt hergestellt	Folie 2 x 2 cm	gesiebter Boden (8mm) aus einem Weinberg in Australien, pH 5,6, Feuchtegehalt 38 %, 30 ± 2 °C	61%	180 Tage		CO_2 Produktion	Aerobe biologische Abbaurate im Boden nahm mit der Erhöhung der Diol-Länge von 3 auf 4 Kohlenstoffatome und von 4 auf 6 Kohlenstoffatome leicht zu	nicht angegeben	Debuissy 2017
$PP_{50}B_{50}S$	im Projekt hergestellt	Folie 2 x 2 cm	gesiebter Boden (8mm) aus einem Weinberg in Australien, pH 5,6, Feuchtegehalt 38 %, 30 ± 2 °C	50%	180 Tage		CO_2 Produktion	Aerobe biologische Abbaurate im Boden nahm mit der Erhöhung der Diol-Länge von 3 auf 4 Kohlenstoffatome und von 4 auf 6 Kohlenstoffatome leicht zu	nicht angegeben	Debuissy 2017
PPA	im Projekt hergestellt	Folie 2 x 2 cm	gesiebter Boden (8mm) aus einem Weinberg in Australien, pH 5,6, Feuchtegehalt 38 %, 30 ± 2 °C	47%	180 Tage		CO_2 Produktion	Aerobe biologische Abbaurate im Boden nahm mit der Erhöhung der Diol-Länge von 3 auf 4 Kohlenstoffatome und von 4 auf 6 Kohlenstoffatome leicht zu	nicht angegeben	Debuissy 2017
PPS	im Projekt hergestellt	Folie 2 x 2 cm	gesiebter Boden (8mm) aus einem Weinberg in Australien, pH 5,6, Feuchtegehalt 38 %, 30 ± 2 °C	48%	180 Tage		CO_2 Produktion	Aerobe biologische Abbaurate im Boden nahm mit der Erhöhung der Diol-Länge von 3 auf 4 Kohlenstoffatome und von 4 auf 6 Kohlenstoffatome leicht zu	nicht angegeben	Debuissy 2017
Stärke	GL 03405, Cerestar	Pulver	Komposterde, 58 °C, 50 % Bodenfeuchte	97 - 100 %	44 Tage	Test nach ISO/DIS 14855:1997	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Degli-Innocent et al. 1998
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	natürliches Meerwasser in Frankreich, Temperatur 8,6 - 19,8°C	8%	1 Jahr	17 000 CFU/ml Bakterien	Masseverlust		angegeben	Deroine et al. 2014a

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	filtriertes, kontinuierlich erneuertes Meerwasser, 4 °C	0%	1 Jahr	3 400 CFU/ml Bakterien	Masseverlust		angegeben	Deroine et al. 2014a
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	filtriertes, kontinuierlich erneuertes Meerwasser, 25 °C	1%	1 Jahr	1 600 CFU/ml Bakterien	Masseverlust		angegeben	Deroine et al. 2014a
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	filtriertes, kontinuierlich erneuertes Meerwasser, 40 °C	2%	1 Jahr	17 000 CFU/ml Bakterien	Masseverlust		angegeben	Deroine et al. 2014a
PLA	7001D NatureWorks	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	Destilliertes Wasser, 25 °C		180 Tage	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. In destilliertem Wasser werden die Proben schneller abgebaut als in Salzwasser.	Wasseraufnahme, mechanische Kennwerte, DSC, REM, Molmasse		angegeben	Deroine et al. 2014b
PLA	7001D NatureWorks	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	Destilliertes Wasser, 30 °C		180 Tage	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. In destilliertem Wasser werden die Proben schneller abgebaut als in Salzwasser.	Wasseraufnahme, mechanische Kennwerte, DSC, REM, Molmasse		angegeben	Deroine et al. 2014b
PLA	7001D NatureWorks	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	Destilliertes Wasser, 40 °C		180 Tage	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. In destilliertem Wasser werden die Proben schneller abgebaut als in Salzwasser.	Wasseraufnahme, mechanische Kennwerte, DSC, REM, Molmasse		angegeben	Deroine et al. 2014b
PLA	7001D NatureWorks	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	Destilliertes Wasser, 50 °C		180 Tage	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. In destilliertem Wasser werden die Proben schneller abgebaut als in Salzwasser.	Wasseraufnahme, mechanische Kennwerte, DSC, REM, Molmasse		angegeben	Deroine et al. 2014b
PLA	7001D NatureWorks	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	filtriertes, kontinuierlich erneuertes Meerwasser, 25 °C		180 Tage	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. In destilliertem Wasser werden die Proben schneller abgebaut als in Salzwasser.	Wasseraufnahme, mechanische Kennwerte, DSC, REM, Molmasse		angegeben	Deroine et al. 2014b

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PLA	7001D NatureWorks	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	filtriertes, kontinuierlich erneuertes Meerwasser, 40 °C		180 Tage	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. In destilliertem Wasser werden die Proben schneller abgebaut als in Salzwasser.	Wasseraufnahme, mechanische Kennwerte, DSC, REM, Molmasse		angegeben	Deroine et al. 2014b
PLA	7001D NatureWorks	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	natürliches Meerwasser in Frankreich, Temperatur 11 - 19°C		180 Tage	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. In destilliertem Wasser werden die Proben schneller abgebaut als in Salzwasser.	Wasseraufnahme, mechanische Kennwerte, DSC, REM, Molmasse		angegeben	Deroine et al. 2014b
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	Destilliertes Wasser, 25 °C		1 Jahr	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben.	Wasseraufnahme, mechanische Kennwerte, Molmasse		angegeben	Deroine et al. 2014c
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	Destilliertes Wasser, 30 °C		1 Jahr	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben.	Wasseraufnahme, mechanische Kennwerte, Molmasse		angegeben	Deroine et al. 2014c
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	Destilliertes Wasser, 40 °C		1 Jahr	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben.	Wasseraufnahme, mechanische Kennwerte, Molmasse		angegeben	Deroine et al. 2014c
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Prüfstäbe 1A 180 x 10 x 4 mm	Destilliertes Wasser, 50 °C		1 Jahr	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben.	Wasseraufnahme, mechanische Kennwerte, Molmasse		angegeben	Deroine et al. 2014c
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Folie, 200 x 120 mm x 200µm	Natürliches Meerwasser in Frankreich, 10,9 - 19,8 °C	36%	180 Tage	17,000 CFU/mL Bakterien	Masseverlust		nicht angegeben	Deroine et al. 2015
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Pulver	Ufersand, 25 °C	80%	600 Tage	1.24 x 10^6 CFU/g Bakterien/nasser Sand	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Deroine et al. 2015
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Pulver	Ufersand-Meerwasser-Gemisch, 25 °C	90%	210 Tage	3,65 x 10^5 CFU/mL Bakterien	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Deroine et al. 2015

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Pulver	Meerwasser, 5 % Biofilm, 25 °C	97%	200 Tage	1,3 x 10^5 CFU/mL Bakterien	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Deroine et al. 2015
PHBV	ENMAT Y1000P, Tianan Biological Materials	Pulver	Meerwasser, 50 % Biofilm, 25 °C	90%	300 Tage	1,14 x 10^6 CFU/mL Bakterien	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Deroine et al. 2015
PLA	Ingeo 6202D, tw. schwarz	Mulchfolie 51 cm x 38 cm	Boden-Kompostgemisch, 15,6 ± 5,6 C, Feuchtigkeit 20 - 30 %			Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. Molmasse und mechanische Kennwerte reduzierten sich während des Abbautests.	Mechanische Kennwerte, REM, GPC, NMR		angegeben	Dharmalingam et al. 2015
PLA	Ingeo 6252D, tw. Schwarz	Mulchfolie 51 cm x 38 cm	Boden-Kompostgemisch, 15,6 ± 5,6 C, Feuchtigkeit 20 - 30 %			Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. Molmasse und mechanische Kennwerte reduzierten sich während des Abbautests.	Mechanische Kennwerte, REM, GPC, NMR		angegeben	Dharmalingam et al. 2015
PLA-PHA-Blend (70/30)	IngeoTM 6252D (PLA), Greenbio (PHA), tw. Schwarz	Mulchfolie 51 cm x 38 cm	Boden-Kompostgemisch, 15,6 ± 5,6 C, Feuchtigkeit 20 - 30 %			Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. Molmasse und mechanische Kennwerte reduzierten sich während des Abbautests.	Mechanische Kennwerte, REM, GPC, NMR		angegeben	Dharmalingam et al. 2015
PCL-Stärke-Blend	Novamont	Scheiben ø 10 mm x 3mm	Boden, 20 °C, 40 % Feuchtigkeit	37%	9 Monate		Masseverlust		nicht angegeben	Di Franco et al. 2004
PCL-Stärke-Blend	Novamont	Scheiben ø 10 mm x 3mm	Phosphatpuffer, 25 °C 40 °C	15% 15 %	12 Monate 5 Monate		Masseverlust		nicht angegeben	Di Franco et al. 2004
PCL-Stärke-Sisal-Composite (15 % Sisal)	im Projekt hergestellt	Scheiben ø 10 mm x 3mm	Boden, 20 °C, 40 % Feuchtigkeit	48%	9 Monate		Masseverlust		nicht angegeben	Di Franco et al. 2004
PCL-Stärke-Sisal-Composite (15 % Sisal)	im Projekt hergestellt	Scheiben ø 10 mm x 3mm	Phosphatpuffer, 25 °C 40 °C	15% 15 %	12 Monate 5 Monate		Masseverlust		nicht angegeben	Di Franco et al. 2004
P(3HB)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	75%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
P(3HB-co-12%3HV)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	75%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
P(3HB-co-14%3HV)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	76%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
P(3HB-co-15%3HP)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	70%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
P(3HB-co-20%4HB)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	84%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
P(3HB-co-21%3HV)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	74%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
P(3HB-co-36%3HP)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	85%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
P(3HB-co-4%3HV)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	77%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
P(3HB-co-5%4HB)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	80%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
P(3HB-co-56%3HB)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	63%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
P(3HB-co-80%3HV)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	9%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
P(3HP)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	4%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
P(4HB)	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	82%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
PBS	High Polymer Co., Japan	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	2%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
PCL	im Projekt hergestellt	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	75%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
Polybutylenadipate	High Polymer Co., Japan	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	16%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
Polybutylensebacat	High Polymer Co., Japan	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	6%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
Polyethylenadipate	High Polymer Co., Japan	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	69%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
Polyethylensebacat	High Polymer Co., Japan	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	1%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
Polyethylensuccinat	High Polymer Co., Japan	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	85%	21 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
Polyhexylensuccinat	High Polymer Co., Japan	Folie 10 mg, 0,1 mm dick	natürliches Flusswasser, 25 °C	2%	28 Tage		Sauerstoffverbrauch		nicht angegeben	Doi et. al 1996
PLLA	L9000, Biomer	spritzgegossener Prüfkörper, 200 x 4 mm	natürliches Meerwasser, 4, 20, 40, 60 und 80 °C		90 Tage	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. Molmasse und mechanische Kennwerte reduzieren sich während des Abbautests.	Masserverlust, DSC, SEC, REM, mechanische Kennwerte		angegeben	Duigou et al. 2009

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PLLA-Flachs-Composite (70/30)	L9000, Biomer	spritzgegossener Prüfkörper, 200 x 4 mm	natürliches Meerwasser, 4, 20, 40, 60 und 80 °C		90 Tage	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. Molmasse und mechanische Kennwerte reduzieren sich während des Abbautests.	Masserverlust, DSC, SEC, REM, mechanische Kennwerte		angegeben	Duigou et al. 2009
PLLA-Flachs-Composite (70/30)	L9000, Biomer	Pressplatte mit Flachsvlies	natürliches Meerwasser, 4, 20, 40, 60 und 80 °C		90 Tage	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. Molmasse und mechanische Kennwerte reduzieren sich während des Abbautests.	Masserverlust, DSC, SEC, REM, mechanische Kennwerte		angegeben	Duigou et al. 2009
PLA	4042D, Natureworks	Gießplatte 30 × 30 × 1 mm	Gartenerde, 20 °C - 30 °C, 80 % Feuchtigkeit	5%	7 Monate		Masseverlust		angegeben	Eili et al. 2012
PLA/Zn_3Al LDH (90/10)	4042D, Natureworks, Nanomaterial im Projekt hergestellt	Gießplatte 30 × 30 × 1 mm	Gartenerde, 20 °C - 30 °C, 80 % Feuchtigkeit	40%	7 Monate		Masseverlust		angegeben	Eili et al. 2012
Chitosan	k. A.	k. A.	In vitro Inkubation in PBS mit Zusatz von 4 mg/ml Lysozym-Lösung, 37 °C	43%	16 Wochen		Masseverlust		angegeben	Elsawya et al. 2017
PCLA (mit Chitosan gegraftetes PLA)	im Projekt hergestellt	k. A.	In vitro Inkubation in PBS mit Zusatz von 4 mg/ml Lysozym-Lösung, 37 °C	50 - 70 %	16 Wochen		Masseverlust		angegeben	Elsawya et al. 2017
PLA	k. A.	k. A.	In vitro Inkubation in PBS mit Zusatz von 4 mg/ml Lysozym-Lösung, 37 °C	27%	16 Wochen		Masseverlust	Einflussfaktoren auf hydrolytischen Abbau (Surface und Bulk Erosion)	angegeben	Elsawya et al. 2017
PBAT	Ecofex F BX 7011, BASF	Pulver	Gepuffertes wässriges Medium mit Belebtschlamm, 20 °C	< 10 %	300 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Eubeler 2009
PBAT	Ecofex F BX 7011, BASF	Pulver	Synthetisches Meerwasser, Inoculum aus Meerwasseraquarium, 20 °C	0 - 40 %	1200 Tage				nicht angegeben	Eubeler 2009
PLA-PBAT-Blend	Ecovio 2099, 2129, BASF	Pulver	Synthetisches Meerwasser, Inoculum aus Meerwasseraquarium, 20 °C	0 - 30 %	500 Tage				nicht angegeben	Eubeler 2009
PEG	Pluriol (verschiedene Typen), BASF	Pulver	Gepuffertes wässriges Medium mit Belebtschlamm, 20 °C	60 - 90 %	30 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Eubeler 2010
PEG	Pluriol (verschiedene Typen), BASF	Pulver	Synthetisches Meerwasser, Inoculum aus Meerwasseraquarium, 20 °C	45 - 75 %	30 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Eubeler 2010

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PLA-PBAT-Blend	Ecovio 2099, 2129, BASF	Pulver	Gepuffertes wässriges Medium mit Belebtschlamm, 20 °C	0 - 30 %	500 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Eubeler 2010
PVP (Polyvinyl-pyrrolidon)	Kollidon (verschiedene Typen), BASF	Pulver	Synthetisches Meerwasser, Inoculum aus Meerwasseraquarium, 20 °C	0%	400 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Eubeler 2010
PBAT	Ecoflex, BASF	Folie 60 µm	wässriges Medium , 22 ± 2°C	30%	180 Tage	Stürmtest nach OCDE 301B, ISO 14852	CO_2 Produktion		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PBAT	Ecoflex, BASF	Folie 60 µm	festes Medium, 20 - 25 °C	6%	117 Tage	nach ISO 14851	Sauerstoffverbrauch		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PBAT	Ecoflex, BASF	Folie 60 µm	Kompoesterde, 58 ± 2 °C	60%	58 Tage	nach ISO 14855	CO_2 Produktion		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PBAT	Ecoflex, BASF	Folie 60 µm	Boden, 25 °C, geschlossene Flasche	0%	48 Tage	nach OCDE 301D, ASTM D5988-96	Sauerstoffverbrauch		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PBAT	Ecoflex, BASF	Folie 60 µm	Boden, 50 °C, geschlossene Flasche	2%	48 Tage	nach OCDE 301D, ASTM D5988-96	Sauerstoffverbrauch		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PBAT	Ecoflex, BASF	Folie 60 µm	Kompoesterde, 58 ± 2 °C	68%	84 Tage	Pilottest Kompostieranlage nach EN 14045 Desintegration	Masseverlust		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PBAT	Ecoflex, BASF	Folie 60 µm	Feldversuch in Ackerboden	10%	330 Tage		Masseverlust		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PCL-Stärke-Blend (60/40)	Mater-bi, Novamont	Folie 50 µm	wässriges Medium , 22 ± 2°C	76%	180 Tage	Stürmtest nach OCDE 301B, ISO 14852	CO_2 Produktion		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PCL-Stärke-Blend (60/40)	Mater-bi, Novamont	Folie 50 µm	festes Medium, 20 - 25 °C	80%	117 Tage	nach ISO 14851	Sauerstoffverbrauch		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PCL-Stärke-Blend (60/40)	Mater-bi, Novamont	Folie 50 µm	Kompoesterde, 58 ± 2 °C	95%	58 Tage	nach ISO 14855	CO_2 Produktion		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PCL-Stärke-Blend (60/40)	Mater-bi, Novamont	Folie 50 µm	Boden, 25 °C, geschlossene Flasche	40%	48 Tage	nach OCDE 301D, ASTM D5988-96	Sauerstoffverbrauch		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PCL-Stärke-Blend (60/40)	Mater-bi, Novamont	Folie 50 µm	Boden, 50 °C, geschlossene Flasche	42%	48 Tage	nach OCDE 301D, ASTM D5988-96	Sauerstoffverbrauch		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PCL-Stärke-Blend (60/40)	Mater-bi, Novamont	Folie 50 µm	Kompoesterde, 58 ± 2 °C	80%	84 Tage	Pilottest Kompostieranlage nach EN 14045 Desintegration	Masseverlust		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PCL-Stärke-Blend (60/40)	Mater-bi, Novamont	Folie 50 µm	Feldversuch in Ackerboden	100%	330 Tage		Masseverlust		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PE	Actimais, SMS Trioplast	Folie 36 µm	wässriges Medium , 22 ± 2°C	0%	180 Tage	Stürmtest nach OCDE 301B, ISO 14852	CO_2 Produktion		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PE	Actimais, SMS Trioplast	Folie 36 µm	festes Medium, 20 - 25 °C	2%	117 Tage	nach ISO 14851	Sauerstoffverbrauch		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PE	Actimais, SMS Trioplast	Folie 36 µm	Kompoesterde, 58 ± 2 °C	1%	58 Tage	nach ISO 14855	CO_2 Produktion		angegeben	Feuilloley et al. 2005

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PE	Actimais, SMS Trioplast	Folie 36 µm	Boden, 25 °C, geschlossene Flasche	0%	48 Tage	nach OCDE 301D, ASTM D5988-96	Sauerstoffverbrauch		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PE	Actimais, SMS Trioplast	Folie 36 µm	Boden, 50 °C, geschlossene Flasche	2%	48 Tage	nach OCDE 301D, ASTM D5988-96	Sauerstoffverbrauch		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PE	Actimais, SMS Trioplast	Folie 36 µm	Kompoesterde, 58 ± 2 °C	0%	84 Tage	Pilottest Kompostieranlage nach EN 14045 Desintegration	Masseverlust		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PE	Actimais, SMS Trioplast	Folie 36 µm	Feldversuch in Ackerboden	90%	330 Tage	nur fragmentiert, nicht mineralisiert, Fragmente wurden noch nach 2 Jahren nachgewiesen.	Masseverlust		angegeben	Feuilloley et al. 2005
PLA	Galastic, Galastic Belgien	Folie 10 x 90 x 0.5 mm	Komposterde, Bodenfeuchtigkeit 50 - 70 %, 32°C	22%	12 Wochen		Masseverlust		nicht angegeben	Fukushima et al. 2012
PLA+Kaolinit	Galastic, Galastic Belgien; NanoBioMatters	Folie 10 x 90 x 0.5 mm	Komposterde, Bodenfeuchtigkeit 50 - 70 %, 32°C	18%	12 Wochen		Masseverlust		nicht angegeben	Fukushima et al. 2012
PLA+Montmorillonit	Galastic, Galastic Belgien; LAVIOSA MINERARIA	Folie 10 x 90 x 0.5 mm	Komposterde, Bodenfeuchtigkeit 50 - 70 %, 32°C	15%	12 Wochen		Masseverlust		nicht angegeben	Fukushima et al. 2012
PLLA	Neste Oy, Finland	Folie 45 µm	Freilandversuch im Boden in Finnland		2 Jahre	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben. Molmasse reduziert sich während des Abbautests.	SPME, GC-MS, SEC, DSC		nicht angegeben	Gallet et al. 2001
PLA	EcoPLA, Cargill	Platten 25 x 75 x 1,5 mm	Gartenkompost, 52°C, Bodenfeuchte 49% - 55%		4 Wochen	Ein prozentualer Abbau wird in dem Paper nicht angegeben.	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Ghorpade et al. 2001
PBAT-Stärke-Blend (50/50)	Ecobras, BASF	Pulver und Plättchen mit 10 x 10 mm x 720 µm	gesiebte Komposterde (< 2 mm), 60 % Feuchtigkeit, 20 ± 2°C	69%	660 Tage	Test nach ASTM D5338-98 (2003)	CO_2 Produktion	auch Papier und Naturfasern wurden getestet	nicht angegeben	Gómez et al. 2013
PHA	Metabolix	Pulver und Plättchen mit 10 x 10 mm x 620 µm	gesiebte Komposterde (< 2 mm), 60 % Feuchtigkeit, 20 ± 2°C	55%	660 Tage	Test nach ASTM D5338-98 (2003)	CO_2 Produktion	auch Papier und Naturfasern wurden getestet	nicht angegeben	Gómez et al. 2013
CA	DS-1,7	Pulver (300 - 400 µm)	Komposterde, 53 °C, 60 % Feuchte	72%	24 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Gu et al. 1993
CA	DS-2,5	Pulver (300 - 400 µm)	Komposterde, 53 °C, 60 % Feuchte	78%	60 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Gu et al. 1993
Cellulose	Merck Co. Ltd., Germany	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	25%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
Chitosan	Shanghai Boao Co. Ltd., China	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	15%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
Curdlan (Beta-1,3-Glucan)	Wako Pure Chemical Industries, Ltd., Japan	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	65%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PBS	SHYUWA Polymer Co. Ltd., Japan	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	2%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PBSA	SHYUWA Polymer Co. Ltd., Japan	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	3%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PCL	SHOWA Co. Ltd., Japan	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	26%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PE	Daqing petrochemicals Co. Ltd., Daqing, Heilongjiang Province, China	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	0%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PEA		n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	36%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PEG	Shanghai Reagent Corporation, Chinese Medicine Corporation	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	12%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PEO (Polyethylenoxid)	Liansheng Chemical Engineering Ltd. Co., Shanghai, China	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	4%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PHBHHx	KANEKA Co. Ltd., Japan	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	63%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PHBV	ZENEKA Co. Ltd., Japan	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	53%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PLA	SHIMADZU Co. Ltd., Japan	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	1%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PPC (Polypropylencarbonat)	Mengxi High Technol Co. Ltd., China	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	3%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
Pullulan (Polysaccharid)	Tokyo Kasei Kogyo Co. Ltd., Japan	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	74%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PVA	Shanghai Reagent Corporation, Chinese Medicine Corporation	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	5%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
Stärke	Wako Pure Chemical Industries, Ltd., Japan	n.a.	Salzlösung, Ackerboden als Inokulum, 30 °C	78%	14 Tage	nach ISO14852	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Guo et al. 2012
PBS	BionolleTR 1010, Showa Highpolymer Co. Ltd.	Folien 750 µm, plasmabehandelt	Boden, 42 °C	57%	4 Monate		Masseverlust	Durch die Plasmabehandlung wird die Oberfläche hydrophil	nicht angegeben	Hirotsu et al. 2000
PLA	Ca-I, Cargill	Folie	Feldversuch, Bananenfeld, Costa Rica, durchschn. Temperatur 27 °C, 80 % Luftfeuchtigkeit (Durchschnitt)		6 Monate	kein prozentualer Abbau angegeben, Abbaurate 7675 M_w/Woche, nach 6 Monaten sichtbar abgebaut	GPC		nicht angegeben	Ho et al. 1999a
PLA	Ca-I, Cargill	Folie 15 x 15 cm	Komposterde, Temperatur 50 ± 5°C, Feuchtigkeit 50 - 70 %		3 Wochen	kein prozentualer Abbau angegeben, Abbaurate 71 283 M_w/Woche, nach 3 Wochen sichtbar abgebaut	GPC		nicht angegeben	Ho et al. 1999a
PLA	Ca-I, Cargill	Folie 1,5 x 1,5	Komposterde, 28 °C	17%	182 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Ho et al. 1999b
PLA	Ca-I, Cargill	Folie 1,5 x 1,5	Komposterde, 40 °C	26%	182 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Ho et al. 1999b
PLA	Ca-I, Cargill	Folie 1,5 x 1,5	Komposterde, 55 °C	60%	175 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Ho et al. 1999b
PLA	Im Projekt hergestellt, MW 34 000 g/mol	Pulver	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	90%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche, Molmasse, Mikroorganismen)	nicht angegeben	Husárová et al. 2014
PLA	Im Projekt hergestellt, MW 34 000 g/mol	Folie 100 µm, 2 x 2 mm	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	95%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche, Molmasse, Mikroorganismen)	nicht angegeben	Husárová et al. 2014
PLA	Im Projekt hergestellt, MW 34 000 g/mol	Beschichtung auf Perlit	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	95%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche, Molmasse, Mikroorganismen)	nicht angegeben	Husárová et al. 2014
PLA	Im Projekt hergestellt, MW 61 000 g/mol	Pulver	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	100%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche,	nicht angegeben	Husárová et al. 2014

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
								Molmasse, Mikroorganismen)		
PLA	Im Projekt hergestellt, MW 61 000 g/mol	Folie 100 µm, 2 x 2 mm	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	85%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche, Molmasse, Mikroorganismen)	nicht angegeben	Husárová et al. 2014
PLA	Im Projekt hergestellt, MW 61 000 g/mol	Beschichtung auf Perlit	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	100%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche, Molmasse, Mikroorganismen)	nicht angegeben	Husárová et al. 2014
PLA	NatureWorks Ingeo 2002D	Pulver	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	80%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche, Molmasse, Mikroorganismen)	nicht angegeben	Husárová et al. 2014
PLA	NatureWorks Ingeo 2002D	Folie 100 µm, 2 x 2 mm	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	52%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche, Molmasse, Mikroorganismen)	nicht angegeben	Husárová et al. 2014
PLA	NatureWorks Ingeo 2002D	Beschichtung auf Perlit	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	95%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche, Molmasse, Mikroorganismen)	nicht angegeben	Husárová et al. 2014
PLA	VUCHV a.s.	Pulver	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	65%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche, Molmasse, Mikroorganismen)	nicht angegeben	Husárová et al. 2014
PLA	VUCHV a.s.	Folie 100 µm, 2 x 2 mm	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	61%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche, Molmasse, Mikroorganismen)	nicht angegeben	Husárová et al. 2014
PLA	VUCHV a.s.	Beschichtung auf Perlit	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	90%	95 Tage		CO_2 Produktion	Untersuchung der **Faktoren für den Bioabbau** (Oberfläche, Molmasse, Mikroorganismen)	nicht angegeben	Husárová et al. 2014
PLA	NatureWorks PLA Polymer 2003D	Folie 300 µm	Mineralisches Medium mit Belebtschlamm , 37 °C	12 - 21 %	40 Tage	vorbehandelt mit UV-Strahlung (0 bis 24 h), Maximum bei 8 h	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Hyun et al. 2013
PLA	NatureWorks PLA Polymer 2003D	Folie 300 µm	Kompost aus Tierfutter, 37 °C	32 - 44 %	40 Tage	vorbehandelt mit UV-Strahlung (0 bis 16 h), Maximum bei 8 h	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Hyun et al. 2013

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PLA	NatureWorks PLA Polymer 4032D	Pulver	Kompost aus Tierfutter, 37 °C	3%	40 Tage	Je nach Bakterien	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Hyun et al. 2013
PLA	NatureWorks PLA Polymer 4060D		Komposterde, 58 °C	52%	45 Tage	Test nach ISO 14855	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Iozzino et al. 2015
PLA+3%Gew. Fumarsäure	NatureWorks PLA Polymer 4060D		Komposterde, 58 °C	64%	45 Tage	Test nach ISO 14855	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Iozzino et al. 2015
PLA	PLLA, Neste Oy	Blasfolie 30 µm, 0,5 x 10 cm²	Substrat bestehend aus Torf und Holzspänen und Bioabfällen aus Gemüse und Obstabfälle, Temperatur schwankend zwischen ca. 30 und 70 °C	99%	70 Tage		CO_2 Produktion	**Kristallisation** 30 - 35 %	nicht angegeben	Itävaara et al. 2002
PLA	PLLA, Neste Oy	Vlies, 20 g/m², 0,5 x 10 cm²	Substrat bestehend aus Torf und Holzspänen und Bioabfällen aus Gemüse und Obstabfälle, Temperatur schwankend zwischen ca. 30 und 70 °C	48 - 73 %	70 Tage	zwei Versuche parallel, Temperaturprofil des langsamer abbauenden war niedriger.	CO_2 Produktion	**Kristallisation** 45 - 60 %, höhere Kristallinität reduziert die Hydrolyse	nicht angegeben	Itävaara et al. 2002
Stärke-PBS-Blend	Bionolle, Showa Denko	Folie	Komposterde, 50 % Feuchte, 52 °C	100%	45 tage	Test nach ISO 14855	CO_2 Produktion	**Toxizitätstests** mit Regenwürmern	nicht angegeben	Jayasekara et al. 2003
PLA	Natureworks, 96 % L-Lactid	Flasche	Kompost aus Kuhdung und Holzspänen, 63 ± 5 % Feuchte, 65 ± 5 °C, Holzboxen mit Gitterboden für die Proben	kleine Stücke verbleiben	30 Tage		Optische Begutachtung, GPC, DSC, TGA	Die Flaschen haben eine höhere Kristallinität als die Tiefziehbehälter.	nicht angegeben	Kale et al. 2006
PLA	Natureworks, 94 % L-Lactid	Tiefziehbehälter	Kompost aus Kuhdung und Holzspänen, 63 ± 5 % Feuchte, 65 ± 5 °C, Holzboxen mit Gitterboden für die Proben	wenige kleine Stücke verbleiben	30 Tage		Optische Begutachtung, GPC, DSC, TGA	Die Flaschen haben eine höhere Kristallinität als die Tiefziehbehälter.	nicht angegeben	Kale et al. 2006
PLA	Natureworks, 96 % L-Lactid	Flasche, zerschnitten 1 x 1 cm	gesiebte Komposterde (5 mm), 90% Feuchte, 58 °C	81 ± 10 %	58 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Kale et al. 2007
PHBH	AONILEX, Kaneka	k. A.	Komposterde, 58 °C	95%	28 Tage		k. A.	Datenblatt von Kaneka	angegeben	KANEKA 2014
PHBH	AONILEX, Kaneka	k. A.	Gepuffertes wässriges Medium mit Belebtschlamm, 25 °C	82%	28 Tage		k. A.	Datenblatt von Kaneka	angegeben	KANEKA 2014
PLA-Jute-Composite	TERAMAK SS300, Unitika Co., Ltd.	Platte 250 x 15 x 3 mm	Boden, pH 4,2, 50 °C	15%	90 Tage		Masseverlust	Abbau in Abhägigkeit des pH-Wertes des Bodens	angegeben	Katogi et al. 2015

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PLA-Jute-Composite	TERAMAK SS300, Unitika Co., Ltd.	Platte 250 x 15 x 3 mm	Boden, pH 5,5, 50 °C	8%	90 Tage		Masseverlust	Abbau in Abhägigkeit des pH-Wertes des Bodens	angegeben	Katogi et al. 2015
PLA-Jute-Composite	TERAMAK SS300, Unitika Co., Ltd.	Platte 250 x 15 x 3 mm	Boden, pH 7,4, 50 °C	17%	90 Tage		Masseverlust	Abbau in Abhägigkeit des pH-Wertes des Bodens	angegeben	Katogi et al. 2015
PLA-Jute-Composite	TERAMAK SS300, Unitika Co., Ltd.	Platte 250 x 15 x 3 mm	Boden, pH 4,2, Raumtemperatur	4%	90 Tage		Masseverlust	Abbau in Abhägigkeit des pH-Wertes des Bodens	angegeben	Katogi et al. 2015
PLA-Jute-Composite	TERAMAK SS300, Unitika Co., Ltd.	Platte 250 x 15 x 3 mm	Boden, pH 5,5, Raumtemperatur	2%	90 Tage		Masseverlust	Abbau in Abhägigkeit des pH-Wertes des Bodens	angegeben	Katogi et al. 2015
PLA-Jute-Composite	TERAMAK SS300, Unitika Co., Ltd.	Platte 250 x 15 x 3 mm	Boden, pH 7,4, Raumtemperatur	3%	90 Tage		Masseverlust	Abbau in Abhägigkeit des pH-Wertes des Bodens	angegeben	Katogi et al. 2015
PBAT	Ecoflex, BASF	Mulchfolie 25 µm weiß 35 µm weiß 35 µm schwarz	Tomatenpflanzung, 0 - 30 °C, 10 - 70 % Bodenfeuchte		1 Jahr	weiße Folie degradiert schneller als schwarze, mechanisceh #eigenschaften verschlechtern sich deutlich nach 2 Wochen, Molmasse verringert sich um ca. 40 % nach einem Jahr	Optische Begutachtung, Molmasse		angegeben	Kijchavengkul et al. 2008a
PBAT	Ecoflex, BASF	Mulchfolie 25 µm weiß 35 µm weiß	Komposterde, 58 °C	60%	120 Tage	Test nach ASTM D 5338	CO_2 Produktion	Vernetze Variante wurden auch getestet, diese zeigten einen geringeren Abbau.	angegeben	Kijchavengkul et al. 2008b
PBAT	BASF	Folie 1 x 1 cm	Komposterde (manure compost), pH 8, 58 °C	67%	45 Tage		CO_2 Produktion	Abbau in Abhängigkeit des Kompostes	nicht angegeben	Kijchavengkul et al. 2010
PBAT	BASF	Folie 1 x 1 cm	Komposterde yard compost), pH 8, 58 °C	34%	45 Tage		CO_2 Produktion	Abbau in Abhängigkeit des Kompostes	nicht angegeben	Kijchavengkul et al. 2010
PBAT	BASF	Folie 1 x 1 cm	Komposterde food waste compost), pH 8, 58 °C	45%	45 Tage		CO_2 Produktion	Abbau in Abhängigkeit des Kompostes	nicht angegeben	Kijchavengkul et al. 2010
PBS	SK Chemicals Inc.	Prüfstäbe	Boden, Raumtemperatur	7%	120 Tage		Masseverlust, mechanische Tests		angegeben	Kim et al. 2005
PBS-Holzmehl-Composit	PBS von SK Chemicals, 10 - 40 % Holzmehl	Prüfstäbe	Boden, Raumtemperatur	7 - 9 %	120 Tage		Masseverlust, mechanische Tests		angegeben	Kim et al. 2005
PBS-Reishülsenmehl-Composit	PBS von SK Chemicals, 10 - 40 % Reishülsenmehl	Prüfstäbe	Boden, Raumtemperatur	8 - 11 %	120 Tage		Masseverlust, mechanische Tests		angegeben	Kim et al. 2005
PBS	SK Chemicals Inc.	Prüfstäbe	Komposterde, 30 ± 2 °C, Bodenfeuchte 50 - 60 %	13%	80 Tage	Test nach ASTM D 6003-96	Masseverlust, mechanische Tests, GPC, DSc, FTIR		angegeben	Kim et al. 2006

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PBS-Reishülsenmehl-Composit	PBS von SK Chemicals, 10 - 40 % Reishülsenmehl	Prüfstäbe	Komposterde, 30 ± 2 °C, Bodenfeuchte 50 - 60 %	14 - 17%	80 Tage	Test nach ASTM D 6003-96	Masseverlust, mechanische Tests, GPC, DSc, FTIR		angegeben	Kim et al. 2006
PBS	Aldrich Chemical Co.	Pulver	gesiebte Komposterde (4 mm), 58 °C, 65 % Bodenfeuchte	82%	74 Tage	Test nach ISO 14855-2	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Kunioka et al. 2009
PBAT-PLA-Blend	BASF	Pulver	Boden, 25 °C	94%	181 Tage	Test nach ISO 17556	CO_2 Produktion	Präsentation von BASF	nicht angegeben	Künkel 2017
PLA-Flachs-Composit (80/20)	PLLA von Biomer	Prüfstäbe	Meerwasser, 8 - 19 °C	0%	2 Jahre	Die Proben haben Wasser aufgenommen, die mechanisceh Kennwerte lassen nach, ein Masserverlust wird nicht beschrieben.	Masseverlust, mechanische Kennwerte		angegeben	Le Duigou et al. 2014
PHBH	Kaneka	Pulver	Meerwasser, 27 °C	23%	28 Tage	Abbau ist temperaturabhängig, bei 11 °C 12 % Abbau nach 30 Tagen	CO_2 Produktion	Präsentation von Kaneka	angegeben	Lepoudre 2017
PHBH	Kaneka	Prüfstäbe	Meerwasser, 32 °C	42%	370 Tage		Masseverlust	Präsentation von Kaneka	angegeben	Lepoudre 2017
PHBH-$CaCO_3$-Blend	Kaneka	Prüfstäbe	Meerwasser, 32 °C	83%	280 Tage	$CaCO_3$ beschleunigt den Abbau	Masseverlust	Präsentation von Kaneka	angegeben	Lepoudre 2017
PBS-Jute-Composit (90/10)	PBS von Showa Highpolymer Co.,	30 x 40 mm	Komposterde, 30 ± 2 °C, Bodenfeuchte 60 %	63%	180 Tage	Höherer Juteanteil verlangsamt den Abbau, je höher der Faserdurchmesser, desto höher ist der Abbau	Masseverlust		nicht angegeben	Liu et al. 2009
PBS-Jutegewebe-Composit	PBS von Showa Highpolymer Co.,	30 x 40 mm	Komposterde, 30 ± 2 °C, Bodenfeuchte 60 %	40%	180 Tage		Masseverlust		nicht angegeben	Liu et al. 2009
PBS-Jutevlies-Composit	PBS von Showa Highpolymer Co.,	30 x 40 mm	Komposterde, 30 ± 2 °C, Bodenfeuchte 60 %	60%	180 Tage		Masseverlust		nicht angegeben	Liu et al. 2009
PEA (Polyesteracetal)	hergestellt im Projekt	Folie 250 µm	Meerwasser, Atlantik, pH 7,5, Temperatur n.a.	1,7%	45 Tage		Masseverlust		nicht angegeben	Martin et al. 2014
PLA	Ingeo™, Natureworks	Folie 250 µm	Meerwasser, Atlantik, pH 7,5, Temperatur n.a.	0%	45 Tage		Masseverlust		nicht angegeben	Martin et al. 2014
PBAT	Eastar Bio, Eastman	Folie 20 x 20 mm, 20 µm	Gepuffertes wässriges Medium mit Belebtschlamm, 30 ± 2 °C	15%	28 Tage		O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Massardier-Nageott et al. 2006
PCL	TONE polymer P-787, (Union Carbide/Dow	Pulver	Gepuffertes wässriges Medium mit Belebtschlamm, 30 ± 2 °C	38%	28 Tage		O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Massardier-Nageott et al. 2006

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PCL	TONE polymer P-787, (Union Carbide/Dow	Folie 20 x 20 mm, 20 µm	Gepuffertes wässriges Medium mit Belebtschlamm, 30 ± 2 °C	35%	28 Tage		O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Massardier-Nageott et al. 2006
PLA	Natureworks	Folie 20 x 20 mm, 20 µm	Gepuffertes wässriges Medium mit Belebtschlamm, 30 ± 2 °C	4%	28 Tage		O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Massardier-Nageott et al. 2006
Stärke-PCL-Blend	Mater-bi, Novamont	Folie 20 x 20 mm, 20 µm	Gepuffertes wässriges Medium mit Belebtschlamm, 30 ± 2 °C	43%	28 Tage		O_2 Verbrauch		nicht angegeben	Massardier-Nageott et al. 2006
PBS-Chitosan-Blend	k. A.	k. A.	Boden	4%	60 Tage		Masseverlust	hauptsächlich für den Abbau verantwortlich waren Pilze	nicht angegeben	Mittal et al. 2016
PBAT	Ecoflex F Blend C1200	Folie 30 µm, 15 - 20 cm	Gartenboden, 20.5 ± 0.5 C	11%	12 Monate		Masseverlust		angegeben	Napper et al. 2019
PBAT	Ecoflex F Blend C1200	Folie 30 µm, 15 - 20 cm	Feldversuch, Australien	8%	180 Tage		Masseverlust		angegeben	Napper et al. 2019
PBS	Showa Highpoymer Co.	Folie 10 x 10 mm	gesiebter Boden (2mm), 40 % Feuchte, 30 °C	15%	25 Tage		Masseverlust	hauptsächlich für den Abbau verantwortlich waren Pilze	nicht angegeben	Nishide et al. 2012
PBSA	Showa Highpoymer Co.	Folie 10 x 10 mm	gesiebter Boden (2mm), 40 % Feuchte, 30 °C	80%	20 Tage		Masseverlust	hauptsächlich für den Abbau verantwortlich waren Pilze	nicht angegeben	Nishide et al. 2012
PCL	Daicel Chemicals Industries	Folie 10 x 10 mm	gesiebter Boden (2mm), 40 % Feuchte, 30 °C	45%	30 Tage		Masseverlust	hauptsächlich für den Abbau verantwortlich waren Pilze	nicht angegeben	Nishide et al. 2012
PHBHV	Zeneca Co.	Folie 10 x 10 mm	gesiebter Boden (2mm), 40 % Feuchte, 30 °C	95%	23 Tage		Masseverlust	hauptsächlich für den Abbau verantwortlich waren Pilze	nicht angegeben	Nishide et al. 2012
PHBHV	Zeneca Co.	Folie 10 x 10 mm	gesiebter Boden (2mm), 40 % Feuchte, 52 °C	40%	20 Tage		Masseverlust	hauptsächlich für den Abbau verantwortlich waren Pilze	nicht angegeben	Nishide et al. 2012
PCL	Daicel Chemicals Industries	Folie 10 x 10 mm	gesiebter Boden (2mm), 40 % Feuchte, 52 °C	40%	20 Tage		Masseverlust	hauptsächlich für den Abbau verantwortlich waren Pilze	nicht angegeben	Nishide et al. 2013
PBSA	Showa Highpoymer Co.	Folie 10 x 10 mm	gesiebter Boden (2mm), 40 % Feuchte, 52 °C	85%	13 Tage		Masseverlust	hauptsächlich für den Abbau verantwortlich waren Pilze	nicht angegeben	Nishide et al. 2014
PBS	Showa Highpoymer Co.	Folie 10 x 10 mm	gesiebter Boden (2mm), 40 % Feuchte, 52 °C	62%	20 Tage		Masseverlust	hauptsächlich für den Abbau verantwortlich waren Pilze	nicht angegeben	Nishide et al. 2015
PCL	PLACCEL H7, Daicel Chemical Industry		Komposterde, 42 % Feuchte, 50 °C	59%	11 Tage	Zum vergleich wurde ein Abbautest in Hundefutter durchgeführt. Dort waren 84 % PCL nach 11 Tage abgebaut.	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Ohtaki et al. 1998

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PBAT	k. A.	Pulver	Boden, 25 ± 2 °C	94%	181 Tage	Test nach ISO 17556	CO_2 Produktion		nicht angegeben	OWS 2017
PBSe	k. A.	Pulver	Boden, 25 ± 2 °C	74%	141 Tage	Test nach ISO 17556	CO_2 Produktion		nicht angegeben	OWS 2017
PHB	Mirel™ P5001	Pulver	Boden, 25 ± 2 °C	86%	120 Tage	Test nach ISO 17556	CO_2 Produktion		nicht angegeben	OWS 2017
PBAT	Ecoflex F BX 7011, BASF	Folie 300 µm	Boden, 25 ± 2 °C, 60 % Feuchte	21%	180 Tage	Test nach ASTM D5988-12	CO_2 Produktion	mit Desintegrationsversuchen wurde gezeigt, dass Joncryl den Abbau verlangsamt	nicht angegeben	Palsikowski et al. 2018
PLA	Ingeo 4042D, Natureworks	Folie 300 µm	Boden, 25 ± 2 °C, 60 % Feuchte	16%	180 Tage	Test nach ASTM D5988-12	CO_2 Produktion	mit Desintegrationsversuchen wurde gezeigt, dass Joncryl den Abbau verlangsamt	nicht angegeben	Palsikowski et al. 2018
PLA	PLLA von Materia Nova	Pulver	Boden, 30°C	9%	220 Tage		CO_2 Produktion	Kompost wird sterilisiert und mit ausgewählten Mikroorganismen versetzt	nicht angegeben	Palsikowski et al. 2018
PLA	PLLA von Materia Nova	Pulver	Komposterde, 30 °C	5%	140 Tage		CO_2 Produktion	Kompost wird sterilisiert und mit ausgewählten Mikroorganismen versetzt	nicht angegeben	Palsikowski et al. 2018
PLA	PLLA von Materia Nova	Pulver	Komposterde, 58 °C	90%	230 Tage		CO_2 Produktion	Kompost wird sterilisiert und mit ausgewählten Mikroorganismen versetzt	nicht angegeben	Palsikowski et al. 2018
PLA	PLLA von Materia Nova	Pulver	Komposterde, 58 °C, 80 - 100 % Feuchte	90%	180 Tage		CO_2 Produktion	reale Bedingungen bzgl. Mikroorganismen	nicht angegeben	Palsikowski et al. 2018
PLA-PBAT-Blend (25/75)	Ingeo 4042D, Natureworks, Ecoflex F BX 7011, BASF	Folie 300 µm	Boden, 25 ± 2 °C, 60 % Feuchte	14%	180 Tage	Test nach ASTM D5988-12	CO_2 Produktion	mit Desintegrationsversuchen wurde gezeigt, dass Joncryl den Abbau verlangsamt	nicht angegeben	Palsikowski et al. 2018
PLA-PBAT-Blend (75/25)	Ingeo 4042D, Natureworks, Ecoflex F BX 7011, BASF	Folie 300 µm	Boden, 25 ± 2 °C, 60 % Feuchte	12%	180 Tage	Test nach ASTM D5988-12	CO_2 Produktion	mit Desintegrationsversuchen wurde gezeigt, dass Joncryl den Abbau verlangsamt	nicht angegeben	Palsikowski et al. 2018
PLA	4060D, Natureworks, amorph	Folie 150 µm, 50 mg	Destilliertes Wasser, 58°C	70%	30 Tage	nur Hydrolyse	Masseverlust	Mit höherer Kristallinität nimt die Abbaurate ab.	nicht angegeben	Pantani et al. 2013
PLA	2002D, Natureworks, teilkristallin 35%	Folie 150 µm, 50 mg	Destilliertes Wasser, 58°C	60%	50 Tage	nur Hydrolyse	Masseverlust	Mit höherer Kristallinität nimt die Abbaurate ab.	nicht angegeben	Pantani et al. 2013
PLA	4032D, Natureworks, teilkristallin 45%	Folie 150 µm, 50 mg	Destilliertes Wasser, 58°C	59%	50 Tage	nur Hydrolyse	Masseverlust	Mit höherer Kristallinität nimt die Abbaurate ab.	nicht angegeben	Pantani et al. 2013

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PLA	4032D, Natureworks, teilkristallin 45%	Folie 150 µm, 50 mg	Destilliertes Wasser, 58°C	55%	70 Tage	nur Hydrolyse	Masseverlust	Mit höherer Kristallinität nimt die Abbaurate ab.	nicht angegeben	Pantani et al. 2013
PLA	Natureworks	Folie 180 x 150 x 0,3 mm	Abwasserbehandlungsanlage, 1,50 m Tiefe, 25 - 32 °C	optisch verändert, leichter Rückgang der Molmasse	15 Monate		Visuelle Begutachtung, Molmasse		nicht angegeben	Rudeekit et al. 2008
PLA	Natureworks	Folie 180 x 150 x 0,3 mm	Mülldeponie, Thailand, 1 m Tiele	nur kleine Stücke verbleiben, Abnahme Molmasse	15 Monate		Visuelle Begutachtung, Molmasse		nicht angegeben	Rudeekit et al. 2008
PLA	Natureworks	Folie 180 x 150 x 0,3 mm	Komposterde, 1 m Tiefe, 45 - 70 °C, 40 - 55 % Feuchte	nur kleine Stücke verbleiben, deutliche Abnahme Molmasse	14 Tage		Visuelle Begutachtung, Molmasse		nicht angegeben	Rudeekit et al. 2008
PLA	Natureworks	Folie 20 x 20 x 0,3 mm	Komposterde, 58 ± 2 °C	86%	120 Tage	Test nach ISO 14855-99	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Rudeekit et al. 2008
PLA	Natureworks	Folie 1/2 A4, 20 - 400 µm Fasern	Feldversuch in Griechenland, Proben in Netzen, 10 - 15 cm , 17 - 28 °C	Fragmentation, stärker je dünner die Folie	11 Monate	Abnahme mech. Eigenschaften, Fasern keine sichtbaren Änderungen	Visuelle Begutachtung, Zugversuch, FTIR, DSC	Fasern wurden als Bündel in das Netz gelegt.	angegeben	Rudnik et al. 2011
PLA	Natureworks	Folie 30 µm, 20 x 20mm Folie 75 µm, 20 x 20mm Fasern	gesiebter Boden, 2 mm, Raumtemperatur, 40 % Feuchte	kaum Fragmentation	11 Monate	Abnahme mech. Eigenschaften, Fasern keine sichtbaren Änderungen	Visuelle Begutachtung, Zugversuch, FTIR, DSC		angegeben	Rudnik et al. 2011
PLA	Natureworks	Folie 30 µm, Fasern	Komposter, Proben in Netzen, 35 - 65 °C, Feuchte 45 - 602 %	kaum Fragmentation	11 Monate	Abnahme mech. Eigenschaften	Visuelle Begutachtung, Zugversuch, FTIR, DSC		angegeben	Rudnik et al. 2011
PLA	Natureworks	Folien und Fasern	Boden, 30 °C	10%	20 Tage		CO_2 Produktion	Fasern bauen langsamer ab	angegeben	Rudnik et al. 2011
PLA	PLA 2003D, Natureworks	Folien 15 x 10 mm	Gartenboden, 30 °C	10%	150 Tage		CO_2 Produktion		nicht angegeben	Satti et al. 2018
PLA	PLA 2003D, Natureworks	Folien 15 x 10 mm	Gartenboden, 30 °C	22 - 24 %	150 Tage	mit speziellen Mikroorganismen bzw. 0,2 Gew% Lactatzusatz im Boden zur Stimulierung der Mikroorganismen	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Satti et al. 2018

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PCL	TONE-787, Dow/Union Carbide	Folie 500 µm	Komposterde, 58 ± 2 °C	42%	45 Tage	nach ISO 14855	CO_2 Produktion		angegeben	Shin et al. 2004
PCL-TPS-Blend	PCL: TONE-787, Dow/Union Carbide	Folie 500 µm	Komposterde, 58 ± 2 °C	67 - 70 %	45 Tage	nach ISO 14855, je höher der TPS-Anteil desto schneller der Abbau	CO_2 Produktion		angegeben	Shin et al. 2004
TPS	Stärke von Shindongbang Inc.	Folie 500 µm	Komposterde, 58 ± 2 °C	77%	45 Tage	nach ISO 14855	CO_2 Produktion		angegeben	Shin et al. 2004
PBS	Bionolle 1001, Showa Denko	Folie 170 µm	Komposterde, 58 ± 2 °C	98%	75 Tage	nach ISO 14855	CO_2 Produktion		angegeben	Showa Denko K.K. 2015
PBS	Bionolle 3001, Showa Denko	Folie 170 µm	Komposterde, 58 ± 2 °C	97%	120 Tage	nach ISO 14855	CO_2 Produktion		angegeben	Showa Denko K.K. 2015
PBS	Bionolle 1001, Showa Denko	Folie 100 µm	Meerwasser, Feldversuch	10%	360 Tage		Masseverlust		angegeben	Showa Denko K.K. 2015
PBS	Bionolle 3001, Showa Denko	Folie 100 µm	Meerwasser, Feldversuch	70%	360 Tage		Masseverlust		angegeben	Showa Denko K.K. 2015
PBS	Bionolle 1001, Showa Denko	Folie 100 µm	Flusswasser, Feldversuch	98%	230 Tage		Masserverlust		angegeben	Showa Denko K.K. 2015
PBS	Bionolle 3001, Showa Denko	Folie 100 µm	Flusswasser, Feldversuch	96%	230 Tage		Masserverlust		angegeben	Showa Denko K.K. 2015
PBSe	im Projekt hergestellt	Pulver	Ackerboden, 58 ± 2 °C	63%	240 Tage		CO_2 Produktion	Zusätzliche Messungen von GPC und NMR während des abbaus	nicht angegeben	Siotto et al. 2013
PCL	Union Carbide	k. A.	Boden, Perlit, Raumtemperatur	20%	120 Tage		CO_2 Produktion	Perlit wurde eingesetzt, um die Boden zu reduziern und damit auch die CO_2 Abgabe des Bodens	nicht angegeben	Solar et al. 1998
PHBHV	Aldrich	k. A.	Boden, Perlit, Raumtemperatur	34%	120 Tage		CO_2 Produktion	Perlit wurde eingesetzt, um die Boden zu reduziern und damit auch die CO_2 Abgabe des Bodens	nicht angegeben	Solar et al. 1998
PVA	Mowiol	k. A.	Boden, Perlit, Raumtemperatur	8%	120 Tage		CO_2 Produktion	Perlit wurde eingesetzt, um die Boden zu reduziern und damit auch die CO_2 Abgabe des Bodens	nicht angegeben	Solar et al. 1998
TPS-Blend	MaterBi, Novamont	k. A.	Boden, Perlit, Raumtemperatur	18%	120 Tage		CO_2 Produktion	Perlit wurde eingesetzt, um die Boden zu reduziern und damit auch die CO_2 Abgabe des Bodens	nicht angegeben	Solar et al. 1998

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PLA	PLA2003D, Natureworks	Folie, 2 x 2 mm	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	75%	90 Tage		CO_2 Produktion	Zusätzlich bestimmung der abiotischen Hydrolyse in Pufferlösung (75 % nach 90 Tagen)	nicht angegeben	Stloukal et al. 2015
PLA-Nanoclay-Blend (95/5)	PLA2003D, Natureworks	Folie	Komposterde, 52 % Feuchtigkeit, 58 °C	78 - 90%	90 Tage		CO_2 Produktion	Zusätzlich bestimmung der abiotischen Hydrolyse in Pufferlösung (62 - 78 % nach 90 Tagen)	nicht angegeben	Stloukal et al. 2015
PBAT	Ecoflex F Blend C1200, BASF	Folie 35 µm, 5 x 5 mm	Komposterde, 70 % Feuchtigkeit, 55 ± 3°C	35%	28 Tage	nach ASTM D5338	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Tabasi et al. 2015
PHB	P209, Biomer	Folie 35 µm, 5 x 5 mm	Komposterde, 70 % Feuchtigkeit, 55 ± 3 C	78%	28 Tage	nach ASTM D5338	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Tabasi et al. 2015
PHB-PBAT-Blend (50/50)	P209, Biomer; Ecoflex F Blend C1200, BASF	Folie 35 µm, 5 x 5 mm	Komposterde, 70 % Feuchtigkeit, 55 ± 3°C	50%	28 Tage	nach ASTM D5338	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Tabasi et al. 2015
PLA	Natureworks, 10 % D-Lactid, Mw 150 kDa	Folie 35 µm, 5 x 5 mm	Komposterde, 70 % Feuchtigkeit, 55 ± 3 C	70%	28 Tage	nach ASTM D5338	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Tabasi et al. 2015
PLA-PBAT-Blend (50/50)	Natureworks, 10 % D-Lactid, Mw 150 kDa; Ecoflex F Blend C1200, BASF	Folie 35 µm, 5 x 5 mm	Komposterde, 70 % Feuchtigkeit, 55 ± 3°C	45%	28 Tage	nach ASTM D5338	CO_2 Produktion		nicht angegeben	Tabasi et al. 2015
P(3HB)	Imperial Chemical Industries	Folie 50 µm, 8 x 12 mm	Meerwasser, 25 °C	80%	14 Tage		Masseverlust	evtl. ist PA4 wasserlöslich	nicht angegeben	Tachibana et al. 2013
PA4	im Projekt hergestellt	Folie 50 µm, 8 x 12 mm	Meerwasser, 25 °C	80%	25 Tage		Masseverlust	evtl. ist PA4 wasserlöslich	nicht angegeben	Tachibana et al. 2013
PBST-Stärke	Mater-Bi	Folie, 22 µm	Meerwasser, Sand, Raumtemperatur	69%	236 Tage		Sauerstoffbedarf	verschiedene Messmethoden werden verglichen	nicht angegeben	Tosin et al. 2012
PBSe (Polybutylen-sebacat)	Novamont	Pulver bzw. Folie 25 µm	Meerwasser, Nährstoffe, 20 - 28 °C	31 - 100%	329 - 368 Tage		CO_2 Produktion, O_2-Verbrauch	verschiedene Messmethoden (Labor, Freiland) werden for die verschiedenen Zonen (Eulittoral, benthic, pelagic) verglichen	nicht angegeben	Tosin et al. 2016
PBSeT (Polybutylen-sebacat-cobuty-lenterephtalat)	Novamont	Pulver bzw. Folie 25 µm	Meerwasser, Nährstoffe, 20 - 28 °C	0 - 81%	329 - 368 Tage		CO_2 Produktion, O_2-Verbrauch	verschiedene Messmethoden (Labor, Freiland) werden for die verschiedenen Zonen (Eulittoral, benthic, pelagic) verglichen	nicht angegeben	Tosin et al. 2016

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PHB	Mirel P5001, Metabolix	Pulver bzw. Folie 90 - 100 µm	Meerwasser, Nährstoffe, 20 - 28 °C	25 - 100 %	329 - 368 Tage		CO_2 Produktion, O_2-Verbrauch	verschiedene Messmethoden (Labor, Freiland) werden for die verschiedenen Zonen (Eulittoral, benthic, pelagic) verglichen	nicht angegeben	Tosin et al. 2016
P(3HB,4HB)	Ningbo Tianan Biomaterials Co. Ltd.	Folie	Komposterde, 58 ± 2 °C	90%	110 Tage		CO_2 Produktion	Mit höherer Kristallinität nimt die Abbaurate ab.	nicht angegeben	Weng et al.
PHB	Ningbo Tianan Biomaterials Co. Ltd.	Folie	Komposterde, 58 ± 2 °C	80%	110 Tage		CO_2 Produktion	Mit höherer Kristallinität nimt die Abbaurate ab.	nicht angegeben	Weng et al.
PHBV	verschiedene Anteile HV, Ningbo Tianan Biomaterials Co. Ltd.	Folie	Komposterde, 58 ± 2 °C	80 - 91%	110 Tage		CO_2 Produktion	Mit höherer Kristallinität nimt die Abbaurate ab.	nicht angegeben	Weng et al.
PBS	Ire Chemical	Pulver	Komposterde, 58°C, Feuchtigkeit 65 %	18%	45 Tage	nach ASTM D5209-92 und ASTM 5338-93	CO_2 Produktion	Mit größerer Oberfläche steigt die Abbaurate.	nicht angegeben	Yang et al. 2004
PBS	Ire Chemical	Folie 50 µm, je 0,3 x 0,3; 1 x 1 und 2 x 2 cm	Komposterde, 58°C, Feuchtigkeit 65 %	12%	45 Tage	nach ASTM D5209-92 und ASTM 5338-93	CO_2 Produktion	Mit größerer Oberfläche steigt die Abbaurate.	nicht angegeben	Yang et al. 2004
PBSA	Ire Chemical	Pulver	Komposterde, 58°C, Feuchtigkeit 65 %	75%	45 Tage	nach ASTM D5209-92 und ASTM 5338-93	CO_2 Produktion	Mit größerer Oberfläche steigt die Abbaurate. Dies ist vor allem am Anfang des Abbaus zu sehen.	nicht angegeben	Yang et al. 2004
PBSA	Ire Chemical	Folie 50 µm, je 0,3 x 0,3; 1 x 1 und 2 x 2 cm	Komposterde, 58°C, Feuchtigkeit 65 %	72 - 75%	45 Tage	nach ASTM D5209-92 und ASTM 5338-93	CO_2 Produktion	Mit größerer Oberfläche steigt die Abbaurate. Dies ist vor allem am Anfang des Abbaus zu sehen.	nicht angegeben	Yang et al. 2004
PCL	Union Carbide	Pulver	Komposterde, 58°C, Feuchtigkeit 65 %	90%	28 Tage	nach ASTM D5209-92 und ASTM 5338-93	CO_2 Produktion	Mit größerer Oberfläche steigt die Abbaurate. Dies ist vor allem am Anfang des Abbaus zu sehen.	nicht angegeben	Yang et al. 2004
PCL	Union Carbide	Folie 55 µm, je 0,3 x 0,3; 1 x 1 und 2 x 2 cm	Komposterde, 58°C, Feuchtigkeit 65 %	85 - 90%	28 Tage	nach ASTM D5209-92 und ASTM 5338-93	CO_2 Produktion	Mit größerer Oberfläche steigt die Abbaurate. Dies ist vor allem am Anfang des Abbaus zu sehen.	nicht angegeben	Yang et al. 2004
PLLA	Union Carbide	Pulver	Komposterde, 58°C, Feuchtigkeit 65 %	53%	45 Tage	nach ASTM D5209-92 und ASTM 5338-93	CO_2 Produktion	Mit größerer Oberfläche steigt die Abbaurate.	nicht angegeben	Yang et al. 2004
PLLA	Union Carbide	Folie 55 µm, je 0,3 x 0,3; 1 x 1 und 2 x 2 cm	Komposterde, 58°C, Feuchtigkeit 65 %	38 - 40%	45 Tage	nach ASTM D5209-92 und ASTM 5338-93	CO_2 Produktion	Mit größerer Oberfläche steigt die Abbaurate.	nicht angegeben	Yang et al. 2004
PBS	hergestellt im Projekt	Pulver 42 µm	Komposterde, 58 ± 2 °C	72%	90 Tage	nach ISO 14855	CO_2 Produktion	Die Abbaubarkeit hängt von der Probeform ab, Pulver baut am schnellsten ab.	nicht angegeben	Zhao et al. 2005

Polymer	Type/ Hersteller	Probenform	Umgebungsbedingung	Abbau	Versuchs-dauer	Bemerkung zum Abbauverhalten	Messmethode	Sonstiges	Mechan. Eigen-schaften	Literatur
PBS	hergestellt im Projekt	Folie 40µm, 1 x 1 cm	Komposterde, 58 ± 2 °C	61%	90 Tage	nach ISO 14855	CO_2 Produktion	Die Abbaubarkeit hängt von der Probeform ab, Pulver baut am schnellsten ab.	nicht angegeben	Zhao et al. 2005
PBS	hergestellt im Projekt	Granulat, durchschn. 3 mm	Komposterde, 58 ± 2 °C	14%	90 Tage	nach ISO 14855	CO_2 Produktion	Die Abbaubarkeit hängt von der Probeform ab, Pulver baut am schnellsten ab.	nicht angegeben	Zhao et al. 2005

V. Literaturverzeichnis

[AAT98] Amass, W.; Amass, A.; Tighe, B.:
A review on biodegradable polymers: Uses, current developments in the synthesis and characterization of biodegradable polyesters, blends of biodegradable polymers and recent advances in biodegradation studies.
polymer international 1998, H. 47, S. 89–144

[ABF08 Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien

[AiF18] AiF-Cornet Projektbericht mit IGF-Vorhaben Nr. 165 EN Bewertung des Potentials von Polybutylensuccinat in Textilanwendungen (PBSTex) Berlin, 2018

[BAS20] BASF SE, Ludwigshafen (Hrsg.):
Die Biokunststoffe der BASF.
https://plastics-rubber.basf.com/global/de/performance_polymers/fpgs/fpg_biodegradable_plastics.html, Zugriff am 12.08.2020

[Bas98] Bastioli, C.:
Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials.
Polymer Degradation and Stability 1998, H. 59, S. 263–272

[Bec19] Becker, A.:
Entwicklung eines Filamentgarns mit bedarfsgerechter Abbaubarkeit.
Aachen, RWTH Aachen University: Masterarbeit, März 2019

[BIO19] BIOTEC GmbH & Co. KG (Hrsg.):
Let's go for 100% renewable resources - BIOTEC BROCHURE
Emmerich am Rhein, 2019

[BIO98] Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV).
21. September 1998

[Boa20] Boas, S.:
Untersuchung des Einflusses der Filamentquerschnittsgeometrie auf die biologische Abbaubarkeit von Multifilamentgarnen und Vliesen aus Biopolymeren
Aachen, RWTH Aachen University: Bachelorarbeit, August 2020

[BPW+18] Burgstaller, M.; Potrykus, A.; Weißenbacher, J.; Kabasci, S.; Merrettig-Bruns, U.; Sayder, B.:
Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe.
57 Aufl.: TEXTE 2018

[Bru20] Bruijn, P. de, Generals Sales Manager Synprodo b.v., Wijchen, Niederlande:
Anfrage für Biopolymere.
Persönliche Mitteilung an S. Boas (EMail)30.03.2020

[Bus20] Busert, T., Projektmanager, TECNARO GmbH, Ilsfeld:
Anfrage für Biopolymere.
Persönliche Mitteilung an S. Boas (EMail)31.03.2020

[CM06] Chen, V. J.; Ma, P. X.:
The effect of surface area on the degradation rate of nano-fibrous poly (L-lactic acid) foam.
Biomaterials 2006 Issue 20, H. 27, S. 3708–3715

[DCL+08] Du, Y.; Cao, Y.; Lu, F.; Li, F.; Wang, X.; Wang, Y.:
Biodegradation behaviors of thermoplastic starch (TPS) and thermoplastic dialdehyde starch (TPDAS) under controlled composting conditions.
Polymer Testing 2008, H. 27 (8), S. 924–930

[DIN EN 12225] DIN EN 12225
Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Prüfverfahren zur Bestimmung der mikrobiologischen Beständigkeit durch einen Erdeingrabungsversuch.
Berlin: Beuth Verlag GmbH Dezember 2000

[DIN EN ISO 11721-1] DIN EN ISO 11721-1
Bestimmung der Widerstandsfähigleit zellulosehaltiger Textilien gegen Mikroorganismen - Erdeingrabetest.
Berlin: Beuth Verlag GmbH April 2001

[DIN EN ISO 139] DIN EN ISO 139
Textilien - Normklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung.
Berlin: Beuth Verlag GmbH Oktober 2011

[DIN EN ISO 16929] DIN EN ISO 16929
Kunststoffe - Bestimmung der Zersetzungsgrades von Kunststoffmaterialien unter festgelegten Bedingungen der Kompostierung mittels einer Technikummaßstab-

Prüfung.
Berlin: Beuth Verlag GmbH Februar 2020

[DIN EN ISO 17556] DIN EN ISO 17556
Kunststoffe - Bestimmung der vollständigen aeroben Bioabbaubarkeit von Kunststoffmaterialien im Boden durch Messung des Sauerstoffbedarfs in einem Respirometer oder der Menge des entstandenen Kohlendioxids.
Berlin: Beuth Verlag GmbH September 2019

[DIN EN ISO 2062] DIN EN ISO 2062
Textilien - Garne von Aufmachungseinheiten - Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung von Garnabschnitten unter Verwendung eines Prüfgeräts mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit (CRE) (ISO 2062:2009).
Berlin: Beuth Verlag GmbH April 2010

[DIN EN ISO 29 073 Teil 3] DIN EN ISO 290 73 Teil 3
Textilie - Prüfverfahren für Vliese - Teil 3: Bestimmung der Höchtzugkraft und der Höchstzugkraftdehnung.
Berlin: Beuth Verlag GmbH August 1992

[Dol13] Dolmans, R.: Bewertung von Biopolymeren für die Herstellung schmelzgesponnener Filamentgarne Doktorarbeit am Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University, Shaker Verlag, Aachen, 2013

[DÜN12] Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln.
5. Dezember 2012

[GA13] Ghanbarzadeh, B.; Almasi, H.:
Biodegradable polymers, In: Chamy, R.; Rosenkranz, F. (Eds): Biodegradation – Life of science.
Croatia: InTech 2013, S. 141–185

[GM13] Gómez, E.; Michel, F.:
Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation.
Polymer Degradation and Stability 2013, H. 98 (12), S. 2583–2591

[Göp96] Göpferich, A.:
Mechanism of polymer degradation and erosion.
Biomaterials 1996, H. 17, S. 103–114

[Gru20] Gruhn, H.:
Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit von Filamentgarnen aus Biopolymeren in Abhängigkeit des Filamentquerschnitts und des Kristallisationsgrades.
Aachen, RWTH Aachen University: Bachelorarbeit, März 2020

[Gu03] Gu, J.:
Microbial deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances.
International biodeterioration and biodegradation 2003, H. 52 Issue 2, S. 69–91

[GVW14] Gries, T.; Veit, D.; Wulfhorst, B. (Hrsg.):
Textile Fertigungsverfahren.
1. Aufl.: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2014

[HMZ+13] Hafenus, R.; Maniura, K.; Zinn, M.; Spierings, A. B.:
Biodegradable fibers from renewable sources – Melt-spinning of polyhydroxyalkanoates (PHAs).
The fiber society conference preceding Geelong, 2013

[IKS02] Itävaara, M.; Karjomaa, S.; Selin, J.:
Biodegradation of polylactide in aerobic and anaerobic thermophilic conditions.
Chemosphere 2002, H. 46 (6), S. 879–885

[JKO10] Jung, I.; Kim, S.; Oh, T.:
Effects of Spinning Conditions on Shape Changes of Trilobal Fibers.
Textile Research Journal 2010, Vol. 80, H. 1, S. 12–18

[KAN14] KANEKA Corporation:
Aonilex Bio-based biodegradable polymer. 2014
www.kaneka.co.jp/en/, Zugriff am 14.01.2021

[KAS+07] Kale, G.; Auras, R.; Singh, S.; Narayan, R.:
Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions.
Polymer Testing 2007, H. 26 (8), S. 1049–1061

[KKL+16] Kim, S.; Kim, P.; Lim, J.; An, H.; Suuronen, P.:
Use of biodegradable driftnets to prevent ghost fishing. Physical properties and fishing performance for yellow croaker.
Anim Conserv 2016, 19 (4), S. 309–319

[KKO+12] Karaca, E.; Kahraman, N.; Omeroglu, S.; Becerir, B.:
Effects of Fiber Cross Sectional Shape and Weave Pattern on Thermal Comfort Properties of Polyester Woven Fabrics.
Fibres and Textiles in Eastern Europe 2012, H. 3 (92), S. 67–72

[KM13] Kun, E.; Marossy, K.:
Effect of crystallinity on PLA's microbiological behaviour
Materials Science Forum 2013, H. 752, S. 241–247

[KT17] Kumar, S.; Thakur, K. S.:
Bioplastics – classification, production and their potential food applications.
Journal of hill agriculture 2017, 8, S. 118–129

[Lam13] Lambert, S.:
Environmental risk of polymers and their degradation products.
University of York: PhD thesis, 2013

[Lep17] Lepoudre, E.:
Development of PHBH™based Marine Biodegradable Applications.:
KANEKA Belgium N.V. 12th European Bioplastics ConferenceBerlin, 28. und 29. November 2017

[LLY10] Li, F.; Luo, S.; Yu, J.:
Mechanical, thermal properties and isothermal crystallization kinetics of biodegradable poly(butylene succinate-co-terephthalate) (PBST) fibers.
Journal of Polymer Research 2010, H. 17 (3) Issue 2, S. 279–287

[LOW+05] Loo, S.C.J.; Ooi, C. P.; Wee, S.H.E.; Boey, Y.C.F.:
Effect of isothermal annealing on the hydrolytic degradation rate of poly(lactide-co-glycolic) (PLGA) 2005, H. 26, S. 2827–2833

[LP11] Luckachen, G. E.; Pillai, C.K.S.:
Biodegradable polymers- A recview on recent trends and emerging perspectives
Journal of Polymers and the Environment 2011, H. 19, S. 637–676

[LSB14] Lambert, S.; Sinclair, C.; Boxall, A.:
Occurrence, degradation and effect of polymer-based materials in the environment.
Review of environmental contamination and toxicology 2014, H. 227, S. 1–53

[MPC+06] Massardier-Nageotte, V.; Pestre, C.; Cruard-Pradet, T.; Bayard, R.:
Aerobic and anaerobic biodegradability of polymer films and physico-chemical characterization.
Polymer Degradation and Stability 2006, H. 91 (3), S. 620–627

[Nat18] NatureWorks LLC (Hrsg.)::
PLA IngeoTM 6400D Technical Data Sheet 2018
https://www.natureworksllc.com/~/media/Files/NatureWorks/Techni-cal-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDa-taSheet_6400D_fiber-melt-spinning_pdf.pdf, Zugriff am 17.02.2020

[Nat21] Regulatory Affairs 2021
https://www.natureworksllc.com/Resources/Regulatory-Affairs, Zugriff am 14.01.2021

[Nov20] Novamont S.p.A., Novara, Italien (Hrsg):
Der biologisch abbaubare und kompostierbare Biokunststoff. Das Original - kontrolliert, innovativ, garantiert.
http://materbi.com/de/, Zugriff am 13.08.2020

[Oce20] Pressemitteilungen 2020
https://oceansafe.de/de/services/presseportal/, Zugriff am 14.01.2021

[Oka02] Okada, M.:
Chemical syntheses of biodegradable polymers
Progress in polymer science 2002, H. 27, S. 87–133

[OL06] Ohkita, T.; Lee, S.:
Thermal degradation and biodegradability of poly (lactic acid)/corn starch biocomposites.
Journal of Applied Polymer Science 2006, H. 100 (4), S. 3009–3017

[PPN+11] Patel, P. N.; Parmar, K. G.; Nakum, A. N.; Patel, M. N.; Patel, P. R.; Patel, V. R.; Sen, D. J.:
Biodegradable polymers: An ecofriendly approach in Newer Millenium.
Asian journal of biomedical and pharmaceutical sciences 2011, H. 1 (3), S. 23–39

[PTT18] PTT MCC Biochem Company Limited (Hrsg.):
Nature to Nature - BioPBS-Brochure.
Bangkok, Thailand, 2018

[PTT18d] BioPBS FD 72PM/ PD72PB Technical Data Sheet - injection molding for general purpose. 2018
http://www.pttmcc.com/new/download/BioPBS_FD72PM_and_FD72PB_Technical_Data_Sheet_for_Injection_Molding.pdf, Zugriff am 14.01.2021

[PTT20a] PTT MCC Biochem Company Limited (Hrsg.):
BioPBS™ FD92PM / FD92PB Technical Data Sheet - Film.
2020

[PTT20b] PTT MCC Biochem Company Limited (Hrsg.):
BioPBS™ FZ71PM / FZ71PB Technical Data Sheet - Injection molding for general purpose.
2020

[PTT20c] PTT MCC Biochem Company Limited (Hrsg.):
BioPBS™ FZ78TM Technical Data Sheet - Fibers and Nonwoven.
2020

[RHB12] Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M. (Hrsg.):
Mechanisches Verhalten der Werkstoffe.
4. Aufl., Wiesbaden: Springer-Verlag GmbH 2012

[SCC98] Solaro, R.; Corti, A.; Chiellini, E.:
New Respirometric Test Simulating Soil Burial Conditions for the Evaluation of Polymer Biodegradation.
Journal of Environmental Polymer Degradation 1998, H. 6 (4), S. 203–208

[Sch20] Schmeling, J., Technischer Manager der MCPP Germany GmbH, Düsseldorf:
Unterschiede der PBS Grades und biologische Abbaubarkeit.
Persönliche Mitteilung an S. Boas (Emails und Telefonate)Mai - Juli 2020

[SDB96] Suh, H.; Duckett, K.; Bhat, G.:
Biodegradaböe and Tensile Properties of Cotton/ Cellulose Acetate Nonwovens.
Textile Research Journal (April 1996), H. 66 (4), S. 230–237

[Shi16] Shivam, P.:
Recent developments on biodegradable polymers and their future trends.
International research journal of engineering and technology 2016, 4 (1), S. 17–26

[Sho15] Showa Denko K. K.:
Bionolle™ aliphatic polyester. 2015, Produktflyer

[SSN+11] Sekiguchi, T.; Saika, A.; Nomura, K.; Watanabe, T.; Watanabe, T.; Fujimoto, Y. e. a.:
Biodegradation of aliphatic polyesters soaked in deep seawaters and isolation of poly(ε-caprolactone)-degrading bacteria.
Polymer Degradation and Stability 2011, 96 (7), S. 1397–1403

[TC06] Tokiwa, Y.; Calabia, B.:
Biodegradability and biodegradation of poly(lactide).
Applied Microbiology and Biotechnology 2006, H. 72 (2), S. 244–251

[Thi20] Thielen, M.:
Biokunststoffe - Pflanzen Rohstoffe Produkte.
7. überarbeitete Auflage, Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) 2020

[TIK+01] Takadara, W.; Ito, H.; Kikutani, T.; Okui, N.:
Studies on High-Speed Melt Spinning of Noncircular Cross-Section Fibers. I. Structural Analysis of As-Spun Fibers.
Journal of Applied Polymer Science 2001, H. 80, S. 1575–1581

[Tot20] Total Corbin PLA, Gorinchem, Niederlande (Hrsg.):
PLA polymers, Luminy neat PLA resins, and sample compounds from Total Corbin PLA
https://www.total-corbion.com/products/pla-polymers/, Zugriff am 13.08.2020

[TR05] Twarowska-Schmidt, K.; Ratajska, M.:
Biodegradability of Non-Wovens Made of Aliphatic-Aromatic Polyester.
Fibers & Textiles in Eastern Europe (2005), Vol. 13, H. 1 (49), S. 71–74

[TÜV12]TÜV Austria: OK compost HOME: Initial acceptance tests, Program OK 2, Home compostability of products.
01.03.2012

[TÜV21]Doc Center - FAQ NEN-biobased% content vs OK biobased 2021
https://www.tuv-at.be/green-marks/doc-center/, Zugriff am 14.01.2021

[TWS+12] Tosin, M.; Weber, M.; Siotto, M.; Lott, C.; Degli Innocenti, F.:
Laboratory test methods to determine the degradation of plastics in marine environmental conditions.
Frontiers in Microbiology 2012, H. 3, S. 225

[Ver20] Verhulst, I., Technical Account Manager RB Biobased Institute b.v., Osterhout, Niederlande:
Anfrage für Biopolymere.
Persönliche Mitteilung an S. Boas (EMail)01.04.2020

[Voß20] Voß, N., Stellvertretender Leiter Vertrieb, FKuR Kunststoff GmbH:
Anrage für Biopolymere.
24.03.2020

[VT09] Vroman, I.; Tighzert, L.:
Biodegradable polymers
Materials 2009, H. 2, S. 307–334

[WWW18] https://www.trevira.de/de/textilien-stoffe-markenfasern-trevira/nonwovens-vliesstoffe-hygiene.html, Zugriff am 23.09.2018

[WWW21] EDANA:
Facts and Figures.
https://www.edana.org/nw-related-industry/nonwovens-markets, Zugriff am 12.01.2021

[XG10] Xu, J.; Guo, B.:
Poly(butylene succinate) and its copolymers. Research, development and industrialization.
Biotechnology Journal 2010, H. 5 (11), S. 1149–1163