



Green Packaging – abbaubare Polymersysteme

Vorwissenschaftliche Arbeit verfasst von

Stefanie Mörth
8B

Betreuer/in: MMag.^a Sigrid Diethart

2020/2021

Europagymnasium Leoben
8700 Leoben, Moserhofstraße 7a

Abstract

The increasing amount of packaging waste is an important issue nowadays. Especially plastic waste is a problem because it pollutes the environment and it is difficult to recycle. New types of packaging, which are environmentally friendly, sustainable and mostly biodegradable, are constantly being part of the new trend „Green Packaging“. The aim of this paper is to give an overview of literature on this topic and examine the properties of three specific biopolymers which are used as materials for „Green Packaging“.

This work is divided up into a theoretical and a practical part. The theoretical part describes basic knowledge of „Green Packaging“ and biopolymers. For the practical part two experiments were carried out. The biopolymers polyvinylalcohol, polylactic acid and starch polymers were mixed and pressed into foils with different compositions. The first experiment involved composting. The foils were cut into pieces and were buried in the compost for a few weeks. The second experiment was conducted using selected microorganisms to create similar conditions to those in a sewage treatment plant. The foils were put into several beakers with different amounts of microorganisms. Before and after the experiments tensile tests and DSC analysis were made.

The findings are that the foils which were mixed with polyvinylalcohol lost the most weight because of the watersolubility of polyvinylalcohol. But these mixed foils had the lowest tensile strength and elongation at rupture.

Vorwort

Bei der Suche nach einem passenden Thema für meine vorwissenschaftliche Arbeit war mir von Anfang an klar, dass ich ein naturwissenschaftliches Thema wählen werde. Im Wahlpflichtfach Chemie begeisterte mich meine Professorin Frau MMag.^a Diethart für verschiedenste Themen – unter anderem für Kunststoffe. In weiterer Folge engagierte sie sich für ein Praktikum am Department für Kunststofftechnik an der Montanuniversität Leoben, wobei ich vier Wochen lang dort arbeiten und mein Wissen rund um Biopolymere erweitern konnte.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Frau MMag.^a Sigrid Diethart für ihre Betreuung, ihr Engagement und ihre Unterstützung bedanken. Von der Themenfindung bis zur fertigen Arbeit hat sie mich jederzeit in all meinen Fragen beraten und mir bei Schwierigkeiten weitergeholfen. Mit ihrer Begeisterung für Naturwissenschaften hat sie auch mein Interesse dafür gestärkt und meinen Entschluss, ein technisches Studium zu beginnen, gefestigt.

Ein weiteres Dankeschön gilt Frau Assoz.-Prof.ⁱⁿ Dipl.-Ing.ⁱⁿ Dr.ⁱⁿ mont. Katharina Resch-Fauster und Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Feuchter, durch welche ich ein FFG-Praktikum am Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe der Montanuniversität machen konnte.

Weiters möchte ich mich bei Frau Dipl.-Ing.ⁱⁿ Nadine Wild bedanken, bei welcher ich mein Praktikum durchführen durfte. Sie hat mich während der gesamten Praktikumszeit bei allen Versuchen und Arbeitsschritten unterstützt und mir hilfreiche Ansätze für das Umsetzen dieser Arbeit gegeben.

Mautern, 05.01.2021

Stefanie Mörth

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	2
Vorwort.....	3
Inhaltsverzeichnis.....	4
1 Einleitung	6
2 Green Packaging	7
3 Ausgewählte Biopolymere im Green-Packaging-Bereich	9
3.1 Allgemeine Grundlagen zur Einteilung von Biopolymeren	9
3.1.1 Einteilung anhand der Ausgangsstoffe und der Abbaubarkeit	9
3.1.2 Einteilung anhand des strukturellen Aufbaus	11
3.1.3 Einteilung anhand der Reaktionsart	13
3.2 Polyvinylalkohol	16
3.2.1 Chemischer Aufbau.....	16
3.2.2 Herstellung.....	17
3.2.3 Eigenschaften und Verwendung.....	18
3.3 Stärke	22
3.3.1 Chemischer Aufbau.....	22
3.3.2 Gewinnung.....	24
3.3.3 Eigenschaften und Verwendung.....	25
3.4 Polylactid (PLA).....	28
3.4.1 Milchsäure	28
3.4.2 Herstellung.....	28
3.4.3 Eigenschaften und Verwendung.....	30
4 Kompostierung.....	31
4.1 Biologische Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit	31

Green Packaging – abbaubare Polymersysteme

4.2	Die Phasen des Rotteprozesses	31
4.3	Beeinflussende Faktoren.....	32
4.3.1	Temperatur	33
4.3.2	Sauerstoff.....	34
4.3.3	Wassergehalt	34
4.3.4	pH-Wert	35
4.4	Mikroorganismen.....	35
4.4.1	Bakterien und Pilze	35
4.4.2	Mikrobieller Abbau	36
4.5	Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit von Biopolymeren.....	37
5	Praktischer Teil.....	38
5.1	Versuche zur Abbaubarkeit.....	38
5.1.1	Herstellung der Folien.....	38
5.1.2	Versuche zur Kompostierbarkeit	40
5.1.3	Versuche zur Abbaubarkeit bei Bedingungen ähnlich einer Kläranlage	45
5.2	Verfahren zur Eigenschaftsbestimmung.....	50
5.2.1	Zugversuche nach ISO 527	50
5.2.2	Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)	54
6	Zusammenfassung	57
7	Literaturverzeichnis	59
8	Abbildungsverzeichnis	61
9	Tabellenverzeichnis	65
10	Anhang.....	66
	Selbstständigkeitserklärung.....	70
	Zustimmung zur Aufstellung in der Schulbibliothek.....	70

1 Einleitung

Der zunehmende Verpackungsmüll und die daraus resultierenden Umweltprobleme gewinnen immer mehr an Bedeutung. Insbesondere Kunststoffverpackungen spielen eine große Rolle, da diese aufgrund ihrer praktischen und leichten Herstellbarkeit vielfältig und häufig eingesetzt werden. Jedoch können sie aufgrund fehlender Mülltrennung und Vermischungen mit anderen Materialien nur schwer recycelt werden, zusätzlich verschmutzen sie aufgrund ihrer Langlebigkeit und Inhaltsstoffe die Umwelt. Um diese Probleme zu lösen hat sich der Trend des „Green Packaging“ etabliert. Dabei sollen Verpackungen entwickelt werden, die umweltfreundlich, nachhaltig und bestenfalls auch biologisch abbaubar sind. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Thema „Green Packaging“ und behandelt sowohl theoretische als auch praktische Aspekte ausgewählter Biopolymere, die für den Einsatz auf dem Verpackungssektor in Frage kommen.

Diese Arbeit ist in zwei Teile gegliedert, in einen theoretischen und einen praktischen Teil. Der erste Teil beruht auf Literaturrecherchen und bildet das Basiswissen für die Versuche im zweiten Teil.

Im theoretischen Teil wird das Thema rund um „Green Packaging“ erläutert und ein allgemeiner Überblick über Biopolymere gegeben. Die drei ausgewählten Biokunststoffe *Polyvinylalkohol*, *Polylactid* und *Stärke*, welche die Grundlage der nachfolgenden experimentellen Versuche bilden, werden genauer betrachtet.

Im praktischen Teil werden zwei Versuchsabläufe beschrieben, die sich mit der Abbaubarkeit der Polymere beschäftigen. Hierzu sind aus den gewählten Biopolymeren verschiedene Folien mit unterschiedlichen Zusammensetzungen hergestellt worden. Diese sind für die erste Versuchsreihe in Stücke geschnitten und kompostiert worden, um die Kompostierbarkeit der Folien zu untersuchen. In der zweiten Versuchsreihe sind mithilfe von Mikroorganismen Bedingungen ähnlich einer Kläranlage nachgestellt worden, um die Abbaubarkeit der Folien bei diesen Verhältnissen zu ermitteln. Vor und nach den Versuchen sind jeweils DSC-Messungen (Dynamische Differenzkalorimetrie) und Zugversuche durchgeführt worden, deren Ergebnisse jeweils beschrieben und diskutiert werden.

2 Green Packaging

Green Packaging beschreibt Verpackungen, die entweder wiederverwertet oder biologisch abgebaut werden können und während ihres gesamten Lebenszyklus weder den Menschen noch die Umwelt schädigen. Derartige Verpackungen müssen also umweltfreundlich sein, indem sie vollständig recycelt werden können, nur aus natürlichen Rohstoffen bestehen oder gänzlich abgebaut werden können. So soll die Nachhaltigkeit der Produkte gewährleistet werden und weder die Umwelt noch die Menschen zu Schaden kommen.¹

Heutzutage werden Kunststoffverpackungen, die auf bioabbaubaren Ausgangsmaterialien basieren, immer wichtiger. Verglichen mit konventionellen Kunststoffen weisen sie einige Vorteile auf, der wichtigste dabei ist die Bioabbaubarkeit. Materialien, die biologisch abgebaut werden können, gewinnen immer mehr an Bedeutung, da kein Müll nach der Nutzung entsteht. Weiterführend spielt die Kompostierbarkeit eine wesentliche Rolle, da hierbei die Materialien auf natürlichem Wege zerkleinert werden, bis nur noch Wasser, Kohlenstoffdioxid und Humus vorhanden sind. Dabei hat sich der Begriff „green“ etabliert, der darauf hinweist, dass das Produkt oder die Technologien und Werkstoffe, die zur Produktion genutzt worden sind, weniger Auswirkungen auf die Umwelt haben.²

Verpackungen sind hauptsächlich dazu da, die Qualität und den Schutz des Inhalts zu gewährleisten und dessen Lebenserwartung zu steigern. Somit erledigen sie einen wesentlichen Beitrag beim Transport, bei der Lagerung und bei der Auslieferung bis zum Konsum. Dabei soll der Kontakt des Produktes, insbesondere bei Lebensmitteln, mit schädlichen Mikroorganismen oder Verschmutzungen vermieden werden. Dies führt zu einer Verlängerung der Haltbarkeit, wodurch weniger Nahrungsmittel verschwendet werden.³ Bisher wurden dafür konventionelle Kunststoffe eingesetzt, weil sie praktische Eigenschaften, wie die Undurchlässigkeit gegenüber Sauerstoff oder mechanische

¹ Vgl. Zhang u. Zhao, 2012.

² Vgl. Abou-Kandil u.a., 2019.

³ Vgl. Han u.a., 2018.

Vorteile, wie eine gute Dehnbarkeit, aufweisen. Jedoch sind diese Materialien mit Problemen verbunden. Einerseits können vor allem Lebensmittelverpackungen aufgrund der Verschmutzungen nur schwer recycelt werden und andererseits können konventionelle Kunststoffe nicht biologisch abgebaut werden. Um die Umwelt nicht zu belasten, werden vor allem im Verpackungssektor Biokunststoffe entwickelt, wobei die Bioabbaubarkeit und die Kompostierbarkeit im Vordergrund stehen.⁴ Wie in Abbildung 1 erkennbar, sind rund 60 % der Kunststoffabfälle in der EU auf Verpackungsmaterial zurückzuführen. Dies zeigt, wie signifikant dieser Bereich ist und dass jegliche Änderungen einen immensen Einfluss haben. Daher ist hier der Umstieg auf umweltfreundliche und nachhaltige Methoden besonders wichtig.

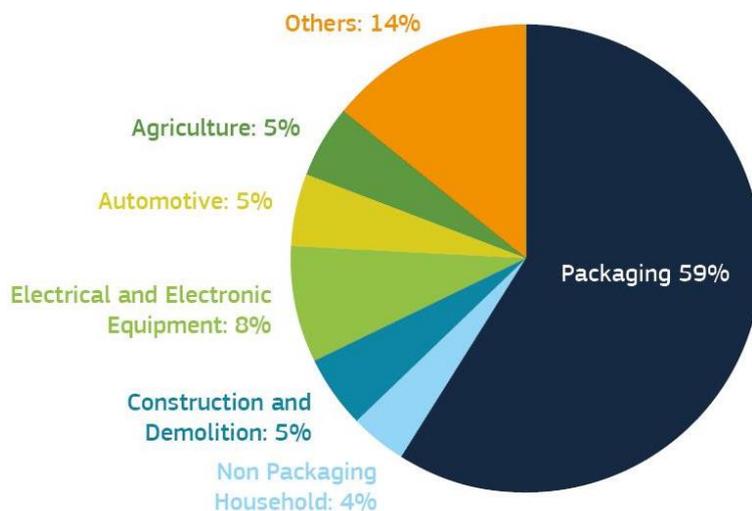


Abbildung 1: Kunststoffabfälle in der EU

⁴ Vgl. Dalla Rosa u.a., 2008.

3 Ausgewählte Biopolymere im Green-Packaging-Bereich

3.1 Allgemeine Grundlagen zur Einteilung von Biopolymeren

Um den Begriff „Biopolymer“ zu definieren, müssen zwei wesentliche Aspekte betrachtet werden: Einerseits bezieht er sich auf den Ausgangsrohstoff, der entweder natürlichen oder petrochemischen Ursprungs sein kann, andererseits spielt die Abbaubarkeit, die allein aufgrund bestimmter chemischer Strukturen bestimmt wird, eine Rolle.

3.1.1 Einteilung anhand der Ausgangsstoffe und der Abbaubarkeit

Biokunststoffe müssen im Gegensatz zu konventionellen Kunststoffen entweder biobasiert, biologisch abbaubar oder beides sein. So können Biopolymere in drei Kategorien eingeteilt werden (siehe Abbildung 2). Es gibt Biokunststoffe, die auf natürlichen Rohstoffen basieren und biologisch abbaubar sind. Es gibt Biopolymere, die einen petrochemischen Ursprung haben und biologisch abbaubar sind. Zur dritten Sparte gehören jene Kunststoffe, die zwar biobasiert sind, aber nicht biologisch abgebaut werden können.⁵

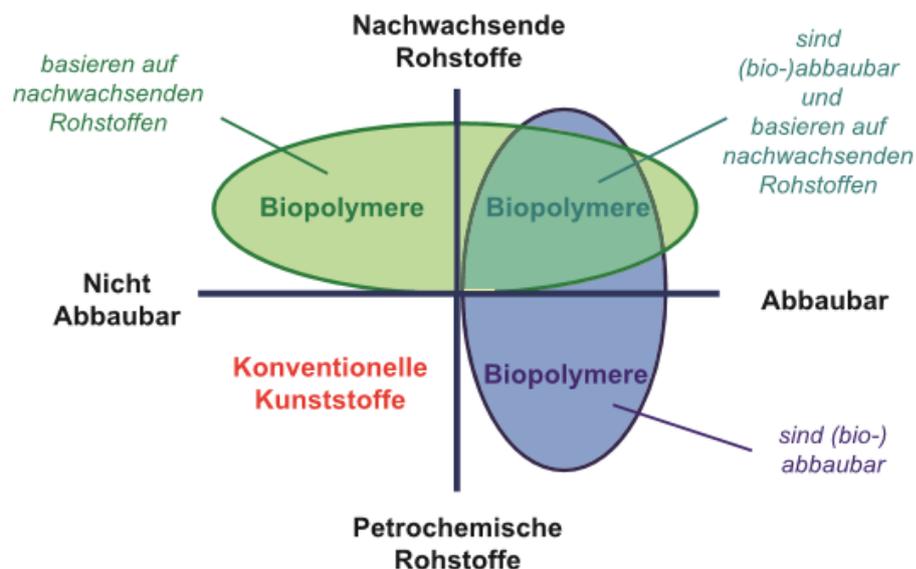


Abbildung 2: Einteilung von Biopolymeren

⁵ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 5-9.

3.1.1.1 Abbaubare biobasierte Polymere

Kunststoffe, die zu dieser Kategorie gehören, werden aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt und sind biologisch abbaubar. Werkstoffe dieser Sparte waren die ersten, die explizit als Biopolymere gekennzeichnet waren, sie waren nicht nur abbaubar, sondern sogar kompostierbar. Die Ausgangsstoffe dieser Kunststoffe können einerseits pflanzlichen Ursprungs sein, Beispiele dafür sind Cellulose, Zucker, Stärke oder Pflanzenöle. Andererseits können als Grundlage auch tierische Rohstoffe, wie Chitin oder Casein, dienen.

3.1.1.2 Abbaubare petrobasierte Polymere

Kunststoffe, die auf petrochemischen Rohstoffen basieren und biologisch abbaubar sind, bilden eine weitere Sparte der Biopolymere. Wie auch konventionelle Polymere bestehen sie aus Kohlenwasserstoffverbindungen, die von fossilen Rohstoffen, wie Erdöl oder Kohle, stammen. Im Gegensatz zu konventionellen Kunststoffen, die eine lange Haltbarkeit aufweisen sollen, werden die Eigenschaften von petrobasierten Biopolymeren so angepasst, dass der Kunststoff unter bestimmten Voraussetzungen abbaubar ist. So werden Heteroatome, wie Sauerstoff oder Stickstoff, in die Kunststoffe eingebaut, um unter bestimmten Umweltbedingungen eine geeignete Abbaubarkeit zu erzielen. Zu den petrobasierten, abbaubaren Polymeren zählen hauptsächlich Polyvinylalkohole (PVAL) und Polycaprolactone (PCL).⁶

3.1.1.3 Nicht abbaubare biobasierte Polymere

Schon Ende des 19. Jahrhunderts wurden nicht abbaubare Polymere hergestellt, die auf natürlichen Rohstoffen basieren, diese wurden aber noch nicht als Biopolymere bezeichnet. Da zu dieser Zeit noch keine fossilen Rohstoffe verfügbar waren, griff man vor allem auf Cellulose und Naturlatex zurück, um geeignete Werkstoffe zu produzieren. Im Gegensatz dazu geht es heutzutage nicht um eine aktuelle Knappheit an petrochemischen Ressourcen, sondern um das langfristige Vorhandensein natürlicher Rohstoffe verglichen mit den erschöpfbaren Erdölreserven.

⁶ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 5-9; 94.

3.1.1.4 Blends und Copolymere

Eine weitere Kategorie, die zur Einteilung der Biopolymere notwendig ist, ist die der Co- und Terpolymere sowie der Blends. Diese Werkstoffe entstehen, wenn mehrere Kunststoffe verschiedener Gruppen vermischt werden. Weiters werden einige Kunststoffe mit Additiven versehen, um bestimmte Eigenschaften zu erzielen, weshalb diese ebenfalls in die Gruppe der Mischungen fallen. So können biobasierte Polymere mit petrobasierten Additiven vermischt werden, wodurch der biobasierte Anteil abnimmt. Weiters kann die Abbaubarkeit eines Werkstoffes durch nicht abbaubare Additive negativ beeinflusst werden.⁷

3.1.2 Einteilung anhand des strukturellen Aufbaus

Polymere können in drei Kategorien eingeteilt werden, die jeweils durch unterschiedliche chemische oder physikalische Eigenschaften gekennzeichnet sind. Wie in Abbildung 3 erkennbar, heißen diese Gruppen *Thermoplaste*, *Duromere* und *Elastomere*.

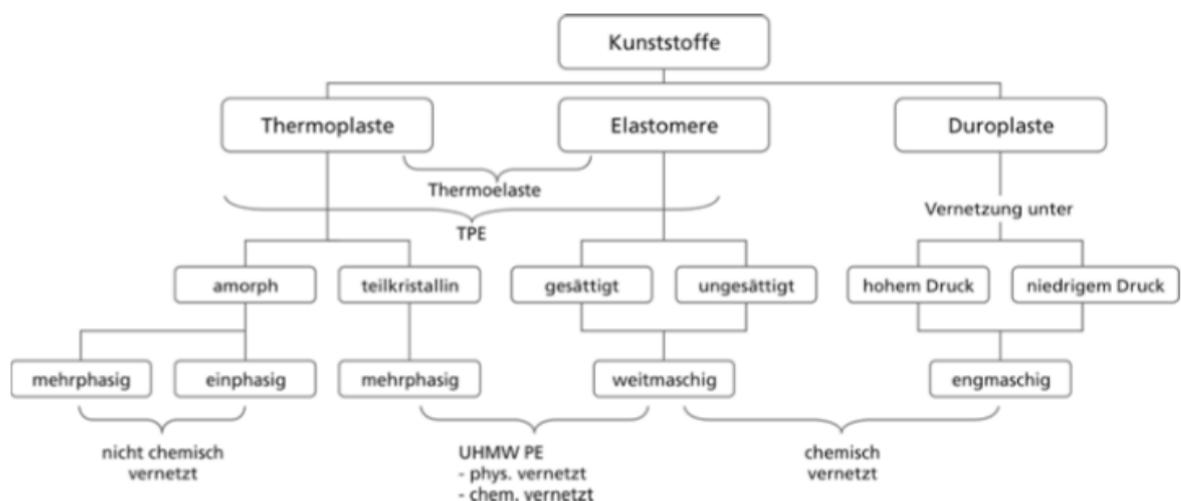


Abbildung 3: Einteilung von Kunststoffen

⁷ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 7f.

3.1.2.1 Thermoplaste

Thermoplaste, auch Plastomere genannt, sind Kunststoffe, die entweder eine amorphe oder teilkristalline Struktur besitzen (siehe Abbildung 3). Sie sind nur geringfügig vernetzt (siehe Abbildung 4), für den Zusammenhalt der Moleküle sorgen vor allem sekundäre Bindungen wie zum Beispiel Wasserstoffbrückenbindungen oder Van-der-Waals-Kräfte. Bei hohen Molmassen können Verschlaufungen auftreten. Aufgrund dieser Struktur sind die Polymerketten bei Belastungen oder hohen Temperaturen instabil. Bei amorphen Thermoplasten spricht man vom Erweichen und bei teilkristallinen vom Schmelzen oder Fließen. Nach dem Erhitzen kann der Kunststoff im flüssigen Zustand verarbeitet und danach abgekühlt werden. Dieser Vorgang vom Schmelzen bis zum Abkühlen kann beliebig oft wiederholt werden. Weitere Eigenschaften von Thermoplasten sind eine eher geringe Zugfestigkeit, Steifigkeit und Reißdehnung.⁸

3.1.2.2 Duroplaste

Duroplaste sind Polymere, die chemisch stark vernetzt sind und dabei ein engmaschiges Netzwerk bilden (siehe Abbildung 4). Der Zusammenhalt des Kunststoffs wird durch primäre Bindungen gewährleistet, die der Grund für die starke Vernetzung sind. Weiters halten Verschlaufungen und sekundäre Bindungen die Struktur zusammen. Nach einmaliger Vernetzung sind diese Kunststoffe nicht mehr einschmelzbar beziehungsweise recycelbar. Ein wesentlicher Vorteil dieser Werkstoffe ist, dass sie wärmebeständig sind. Zusätzlich haben sie eine hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit, jedoch ist die Reißdehnung sehr gering.

3.1.2.3 Elastomere

Elastomere halten, gleich wie Duroplaste, über primäre und sekundäre Bindungen und Verschlaufungen zusammen, der Unterschied dabei ist, dass Elastomere weitmaschig vernetzt sind (siehe Abbildung 4). Wie in Abbildung 3 ersichtlich, kann man Elastomere in zwei Gruppen einteilen. Einerseits gibt es gesättigte Polymere, die keine Doppelbindungen aufweisen, andererseits gibt es ungesättigte, bei welchen Doppelbindungen

⁸ Vgl. Domininghaus u.a., 2008, S. 5-10.

vorhanden sind. Eine Gemeinsamkeit mit Duroplasten ist, dass Elastomere ebenfalls nach der Vernetzung nicht mehr einschmelzbar sind. Eine besondere Eigenschaft dieser Kunststoffe ist, dass sie gummielastisch sind. Weiters besitzen sie eine mittlere bis hohe Reißdehnung, jedoch sind Zugfestigkeit und Steifigkeit gering.⁹

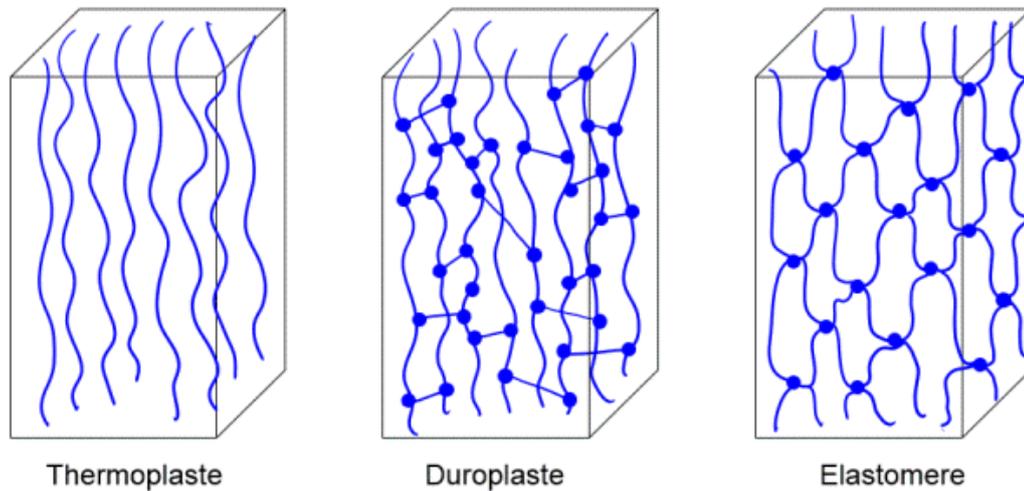


Abbildung 4: Struktur von Kunststoffen

3.1.3 Einteilung anhand der Reaktionsart

Es gibt drei Reaktionsarten, um Biopolymere herzustellen: die Polymerisation, die Polyaddition und die Polykondensation.

3.1.3.1 Polymerisation

Die Polymerisation ist eine Kettenreaktion, die vor allem bei gleichen oder gleichartigen Monomeren mit Doppelbindungen angewandt werden kann. Die Doppelbindungen werden aufgebrochen, indem die Monomere Wärme, Strahlung oder Initiatoren ausgesetzt werden. Danach verbinden sie sich über Einfachbindungen zu Polymeren. Polymerisationen sind exotherme Reaktionen und geben bei der Herstellung somit Wärme ab. Weiters erfolgen solche Reaktionen ohne Abspaltung von anderen niedermolekularen Stoffen.

⁹ Vgl. Domininghaus u.a., 2008, S. 5-10.

In Abbildung 5 ist die Polymerisation am Beispiel von Polyethen dargestellt. Hierbei erkennt man bei Ethen die Doppelbindung, die aufgebrochen werden muss, um Polyethen zu bilden.¹⁰

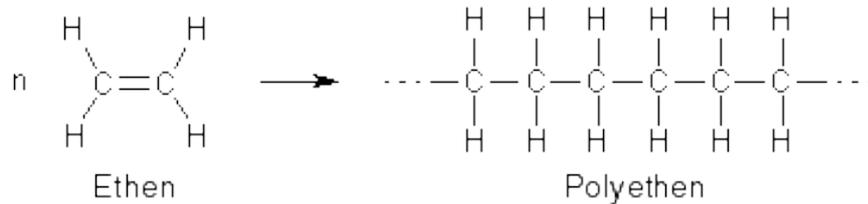


Abbildung 5: Polymerisation am Beispiel von Polyethen

3.1.3.2 Polyaddition

Die Polyaddition ist eine Stufenreaktion, bei der gleiche oder verschiedenartige Monomere mit reaktionsfähigen Endgruppen verbunden werden. Die einzelnen Reaktionsschritte sind abhängig voneinander und bedingen jeweils den nächsten Schritt. Die Polyaddition verläuft wie die Polymerisation ohne Abspaltung eines Nebenproduktes. In Abbildung 6 ist die Polyaddition von Polyurethan zu sehen. Dabei kann man die reaktionsfähigen Endgruppen, in diesem Fall Hydroxy- und Isocyanatgruppen, erkennen.

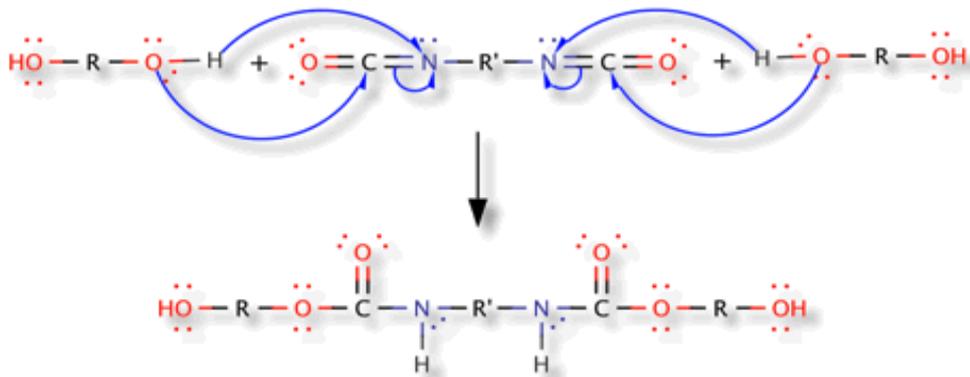


Abbildung 6: Polyaddition am Beispiel von Polyurethan

¹⁰ Vgl. Dominghaus u.a., 2008, S. 18-26.

3.1.3.3 Polykondensation

Die Polykondensation ist eine Stufenreaktion, bei welcher alle Reaktionsschritte voneinander unabhängig sind. Bei solchen Reaktionen reagieren, wie bei der Polyaddition, gleich- oder verschiedenartige Monomere mit funktionsfähigen Endgruppen miteinander. Dabei erfolgt immer eine Abspaltung eines niedermolekularen Stoffes, wie beispielsweise Wasser, Ammoniak oder Chlorwasserstoff.¹¹ In Abbildung 7 ist die Polykondensation anhand eines Carbonsäureamids dargestellt. Hierbei ist die Hydroxygruppe der Dicarbonsäure wieder als reaktionsfähige Endgruppe zu erkennen, diese reagiert mit dem Wasserstoff des Diamins unter Bildung von Wasser, welches abgespalten wird.

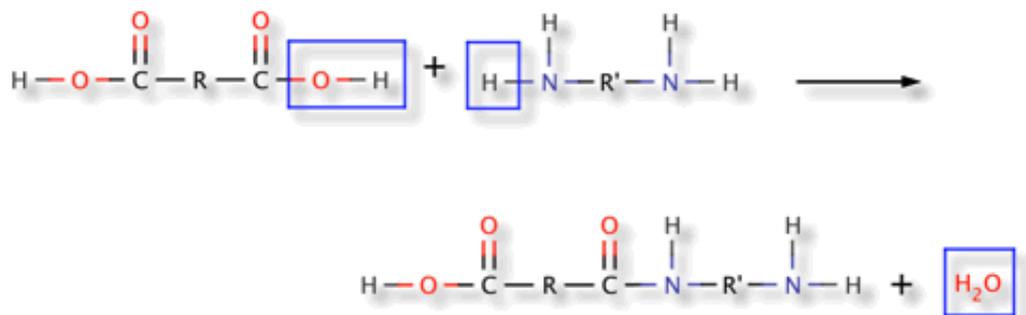


Abbildung 7: Polykondensation am Beispiel eines Carbonsäureamids

¹¹ Vgl. Dominghaus u.a., 2008, S. 18-26.

3.2 Polyvinylalkohol

Polyvinylalkohol, abgekürzt durch PVAL oder PVOH, ist ein synthetisch hergestellter Kunststoff, der meistens wasserlöslich ist. PVOH wurde durch die Erfindung der Vinylnfaser wichtig und seine Produktion steigt seit Ende des Zweiten Weltkrieges jährlich an. PVOH wird vor allem in der Papier-, Textilfaser- und Klebstoffindustrie benötigt. Weiters ist Polyvinylalkohol auch ein wichtiger Rohstoff für die Herstellung von Polyvinylbutyral, dieses wird als Verbundglas- oder Sicherheitsglasfolie in der Automobilbranche verwendet.¹²

3.2.1 Chemischer Aufbau

Anhand der chemischen Struktur kann Polyvinylalkohol zur Gruppe der Polymethylene gezählt werden. Polymethylene sind Biokunststoffe, die grundsätzlich als lineare Homopolymerisate bezeichnet werden können.¹³ Dies bedeutet, dass sie Thermoplasten sind, wobei viele gleichartige Monomere in einer Kettenreaktion zu einem Polymer reagieren.¹⁴ Weiters entstehen Polymethylene aus ungesättigten Monomeren, das heißt, dass das Kohlenstoff-Atom nicht durch vier Wasserstoff-Atome abgesättigt ist. Daraus folgt, dass bei der Polymerisation eine gesättigte Kohlenwasserstoffkette gebildet wird, die frei von Heteroatomen ist. Dies ist der Grund, dass Kunststoffe dieser Art wenig Angriffspunkte für Mikroorganismen haben und somit eine hohe Beständigkeit aufweisen. In weiterer Folge gehört Polyvinylalkohol zur Gruppe der Polyvinyle. Diese Sparte zeichnet sich dadurch aus, dass an einer Stelle statt eines weiteren Wasserstoffatoms ein anderes Atom oder eine Atomgruppe gebunden ist.¹⁵ Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, befindet sich an dieser Stelle bei PVOH eine Hydroxygruppe. In Abbildung 9 ist die Struktur des Polyvinylalkohols zu sehen, welche ich mithilfe von Molekülbausteinen gebaut habe.

¹² Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 94f.

¹³ Vgl. ebd., S. 153.

¹⁴ Vgl. Domininghaus u.a., 2008, S. 17ff.

¹⁵ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 153.

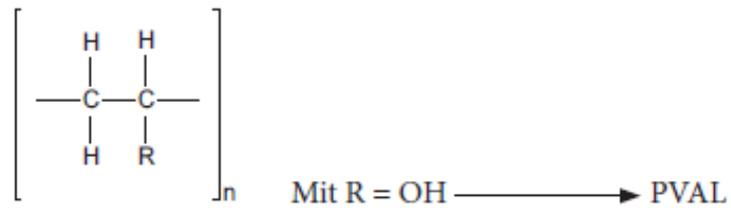


Abbildung 8: Strukturformel der Polyvinyle



Abbildung 9: Polyvinylalkohol dargestellt mittels Molekülbausteinen

3.2.2 Herstellung

Vinylalkohol entsteht durch die Reaktion von Ethin (C_2H_2) mit Wasser (H_2O). Durch die schnelle Isomerisierung geht Vinylalkohol jedoch sofort nach der Bildung in die energetisch günstigere Keton-Form über, weshalb PVOH nicht durch eine Polymerisation von Vinylalkohol hergestellt werden kann. Dies wird durch die Keto-Enol-Tautomerie beschrieben (siehe Abbildung 10). Bei einer Tautomerie stehen die zwei Moleküle, die sich durch eine Umlagerung unterscheiden, im Gleichgewicht. In diesem Fall steht die Keton-Form *Acetaldehyd*, die zu mehr als 99,99 % auftritt, der Enol-Form *Vinylalkohol*, die zu weniger als 0,01 % auftritt, gegenüber. Deshalb wird zur Herstellung von Vinylalkohol Essigsäurevinylester verwendet, da die Isomerisierung hier nicht stattfinden kann. In einer Polymerisationsreaktion wird aus Vinylacetat Polyvinylacetat hergestellt. Anschließend bildet sich in einer Verseifungsreaktion aus Polyvinylacetat Polyvinylalkohol.¹⁶

¹⁶ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 95f.

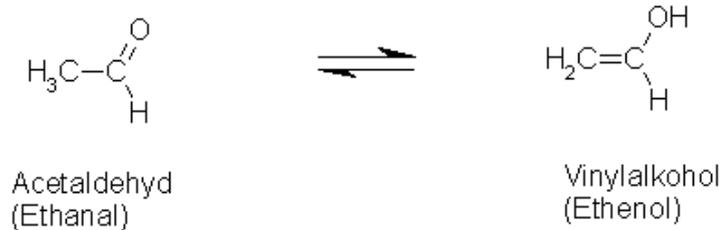


Abbildung 10: Keto-Enol-Tautomerie von Acetaldehyd und Vinylalkohol

3.2.3 Eigenschaften und Verwendung

Polyvinylalkohol ist nach der Herstellung als geruchsloses, weißes Granulat verfügbar. PVOH allein ist als Gießfilm zu spröde, um eingesetzt werden zu können. Diese Sprödigkeit kann auf verschiedene Weisen verringert werden. Einerseits kann bei der Herstellung lediglich eine Teilverseifung stattfinden, wobei Acetylgruppen im PVOH bleiben. Andererseits kann auch eine Wasseraufnahme erfolgen, wobei Wasser als flüchtiger äußerer Weichmacher dient. Zusätzlich kann Glycerin oder Glykol hinzugegeben werden, sodass das Wasser nicht verdunsten kann. Durch diese Veränderungen erreicht PVOH eine gute thermoplastische Verarbeitbarkeit.

3.2.3.1 Hydrolyse- und Polymerisationsgrad

Die Eigenschaften von Polyvinylalkohol werden hauptsächlich vom Polymerisationsgrad und vom Hydrolysegrad bestimmt. Dabei gibt es vollhydrolysierte Polyvinylalkohole, die einen Hydrolysegrad von 97,5-99,5 Mol-% aufweisen und teilhydrolysierte PVOH mit einem Hydrolysegrad von 87-89 Mol-%. Zusätzlich gibt es noch mehrere Zwischenstufen.

Der Polymerisationsgrad zeigt grundsätzlich an, wie viele Monomere in einer Kette enthalten sind und wird durch die dynamische Viskosität beschrieben. Die Viskosität beschreibt, wie zähflüssig eine Substanz ist. Je länger die Polymerketten sind und je höher somit der Polymerisationsgrad ist, desto viskoser ist das Material. Bei PVOH gibt es viele verschiedene Gruppierungen, dabei sind sowohl niederviskose und hochviskose, als auch Polymere mit mittlerer Viskosität vorhanden.¹⁷

¹⁷ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 176f.

3.2.3.2 Wasserlöslichkeit

Die Löslichkeit von PVOH in Wasser ist abhängig vom Polymerisationsgrad und vom Hydrolysegrad. Hydroxygruppen verursachen Wasserstoffbrückenbindungen, die starke zwischenmolekulare Wechselwirkungen bedingen. Somit nimmt die Wasserlöslichkeit vor allem bei niedrigen Temperaturen mit steigendem Hydrolysegrad ab. Gegenteilig wirken sich die hydrophoben Acetatgruppen aus, die aufgrund einer Teilverseifung vorhanden sind. Sie verringern die Anzahl der Wasserstoffbrückenbindungen, dadurch erhöht sich die Wasserlöslichkeit. In Abbildung 11 ist zu erkennen, dass die Löslichkeit von Polyvinylalkohol in Wasser vor allem bei niedrigen Temperaturen stark vom Hydrolysegrad abhängt. Bei 20 °C und ab einem Hydrolysegrad von 90 Mol-% sinkt die Wasserlöslichkeit immer weiter ab. Bei Temperaturen von 40 °C beziehungsweise 60 °C erkennt man einen radikalen Abfall der Löslichkeit bei etwa 97 Mol-%, was einem vollhydrolysierten PVOH entspricht. So ist aus Abbildung 11 zu schließen, dass zum vollständigen Lösen von vollhydrolysiertem PVOH nur Wasser mit einer Temperatur von 80 °C oder darüber geeignet ist.¹⁸

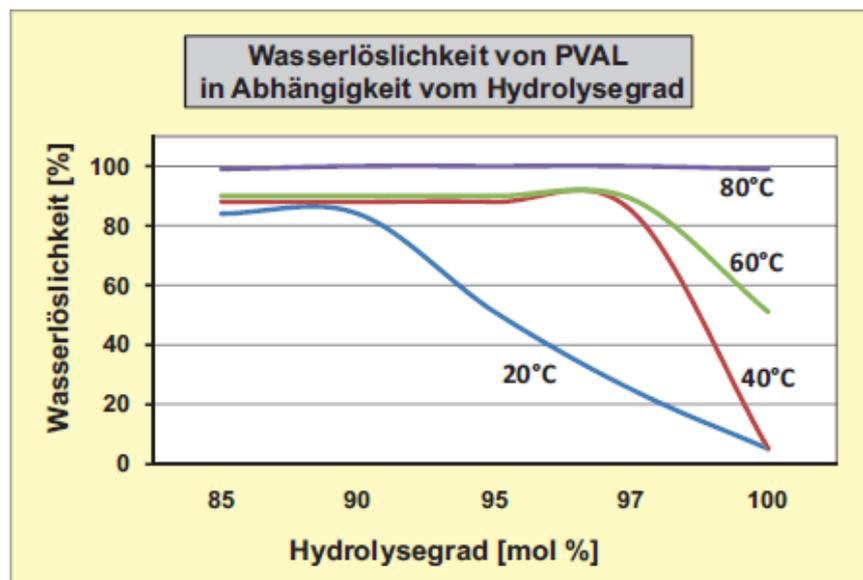


Abbildung 11: Wasserlöslichkeit von PVOH

¹⁸ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 178f.

3.2.3.3 Abbaubarkeit

Es gibt zwei Wege, um die Abbaubarkeit von Polyvinylalkohol zu beschreiben. Einerseits kann man die Abbaubarkeit von PVOH in wässriger Lösung betrachten, andererseits den Abbauprozess in ungelöster Form. Dabei kann grundsätzlich gesagt werden, dass PVOH-Folien in gelöster Form unter den Bedingungen, wie sie in einer Kläranlage gegeben sind, abgebaut werden können. Im Gegensatz dazu steht die Kompostierung von ungelösten Folien. Polyvinylalkohol hat eine stark adhäsive Bindung zu den Erdteilchen. Daher kann PVOH nicht vollständig gelöst und die gebundenen Partikel nicht gänzlich abgebaut werden. In diesem Zusammenhang hat sich bei Versuchen zur Kompostierung gezeigt, dass ein rascher Primärabbau vorliegt, jedoch Sekundär- und Endabbau gar nicht oder nur sehr langsam ablaufen.

Ein Faktor, der die Abbaubarkeit beeinflusst, ist die Copolymerisation. Um die Eigenschaften von PVOH-Folien zu verbessern, werden häufig andere Monomere, wie zum Beispiel Ethen, eingebaut, welche aber die Abbaubarkeit verschlechtern.

3.2.3.4 Anwendungsgebiete

Vollhydrolysierte Polyvinylalkohole werden bei der Papierherstellung verwendet, da sie beständig gegenüber Fetten, Lösungen und Wasser sind. Weiters verbessern sie die mechanischen Eigenschaften von Papier. Aus diesen Gründen kommen sie dort als Barrierschicht zum Einsatz. Nach der Weiterverarbeitung zu Polyvinylbutyral wird dieser Werkstoff als Sicherheitsglasfolie zwischen zwei Scheiben benutzt.

Teilhydrolysierte Polyvinylalkohole werden bei der Klebstoffherstellung verwendet, da sie eine hohe Klebkraft haben und auch auf Papier und Holz gut haften. Weiters ist es mit Polyvinylalkoholen möglich, die Viskosität des Klebstoffes optimal anzupassen. Im Textilbereich werden PVOH-Beschichtungen benötigt, da diese eine gute Haftung gegenüber Cellulosefasern oder synthetischen Fasern aufweisen. Weiters führen sie zu einer Steigerung der mechanischen Fasereigenschaften.

Eine andere Form der Verwendung findet PVOH als Thermoplast. Hierbei müssen die Polymere mit Weichmachern und Extrusionshilfsmitteln versehen werden, um den Werkstoff weiter verarbeiten zu können.

Zusätzlich werden Polyvinylfasern hergestellt, die aufgrund ihrer chemischen Vernetzung nicht in Wasser löslich sind. Mit anderen Fasern können sie versponnen werden und dienen als Gewebe für Netze, Filter und Schutzbekleidungen.¹⁹

Wasserlösliche PVOH-Folien

Auf dieses Anwendungsgebiet wird hier zusätzlich genauer eingegangen, da diese Folien als wesentliches Ausgangsmaterial bei den Versuchen in Kapitel 5 dienen. Aus Polyvinylalkoholen können verschiedene Folien hergestellt werden, die als Trennschicht oder Barrierschicht auf anderen Kunststoffen benutzt werden. Wasserlösliche PVOH-Folien haben zahlreiche Eigenschaften, welche die Produktion solcher Werkstoffe attraktiv machen. Es können klare Folien hergestellt werden, die sich sehr gut färben oder bedrucken lassen. Zusätzliche Vorteile bei der Produktion dieser Folien sind die gute Verklebbarkeit und die Schweißbarkeit. Weiters sind sie gegenüber Gasen, wie Stickstoff, Sauerstoff, Helium oder Kohlenstoffdioxid, undurchlässig, weisen aber eine hohe Durchlässigkeit gegenüber Wasserdampf auf. Der wesentlichste Aspekt bei PVOH-Folien ist, dass sie in wässriger Lösung biologisch abgebaut werden können.

Diese Eigenschaften spielen vor allem bei wasserlöslichen Verpackungen eine große Rolle. PVOH-Folien werden im Verpackungssektor eingesetzt, wobei hauptsächlich Düngemittel, Pestizide oder trockene Reinigungsmittel damit verpackt werden. Ein weiteres Anwendungsgebiet der Folien ist in Krankenhäusern. Hier werden wasserlösliche Wäschesäcke verwendet, um den Kontakt von Personen mit der infizierten Wäsche zu vermeiden und höchstmögliche Hygienestandards zu garantieren. Bei allen Verwendungszwecken geht es vorrangig um die vollständige Auflösung der Folien im Wasser. So können herkömmliche Kunststoffverpackungen umgangen werden und es entsteht kein Verpackungsmüll.²⁰

¹⁹ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 177-183.

²⁰ Vgl. ebd., S. 178-183.

3.3 Stärke

3.3.1 Chemischer Aufbau

Stärke ist ein Polysaccharid, welches grundlegend aus Glucose-Molekülen aufgebaut ist, die 1,4-glykosidisch verbunden sind. Dabei bilden zwei Stoffe die Stärkestruktur: Amylose und Amylopektin. Amylose besteht aus rund 1000-4500 Glucose-Einheiten, welche 1,4-glykosidische Verbindungen aufweisen (siehe Abbildung 12). Weiters sind keine Verzweigungen vorhanden, wodurch die Moleküle den Aufbau einer Helix annehmen. In den Hohlraum dieser schraubenförmigen Struktur können Fremdstoffe eingelagert werden. Amylopektin besitzt die Struktur eines Stranges, welcher aus ungefähr 6000 Glucose-Einheiten besteht. Es folgen immer ungefähr 25 1,4-glycosidische Bindungen, die von einer 1,6-glycosidischen Verzweigung getrennt werden. Durch diese Verzweigungen können, wie in Abbildung 13 ersichtlich, Einzelstränge miteinander verbunden werden, wodurch ein großes Netzwerk entsteht. In welchem Verhältnis Amylose und Amylopektin stehen, ist pflanzenabhängig.²¹

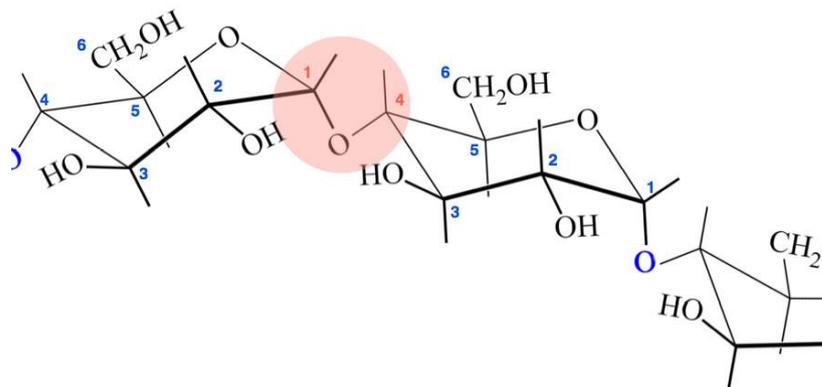


Abbildung 12: Struktur der Amylose

²¹ Vgl. Behr u. Seidensticker, 2018, S. 160ff.

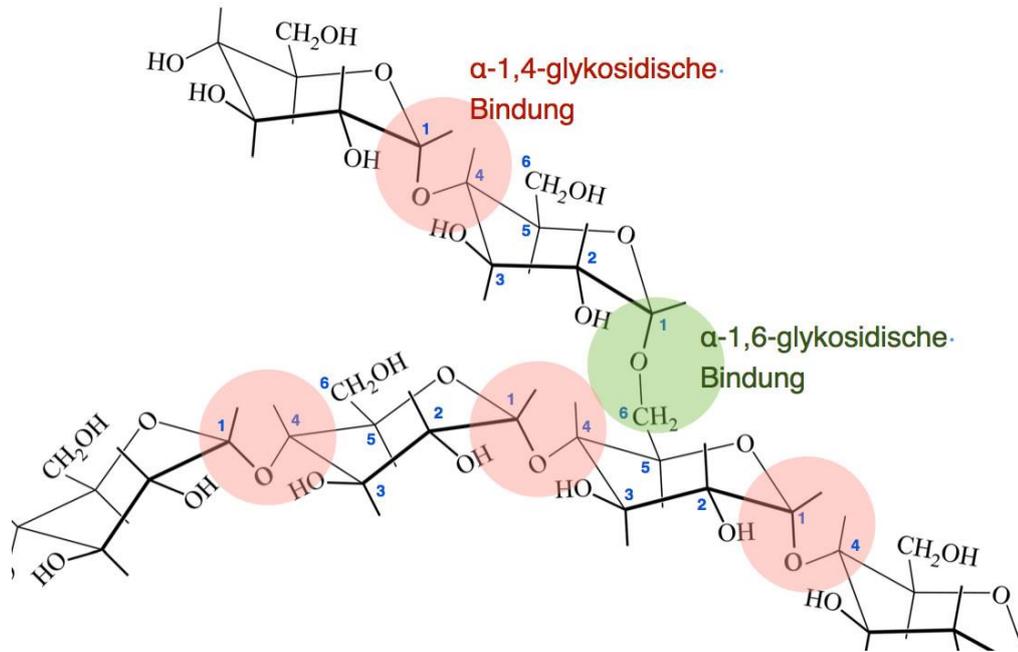


Abbildung 13: Struktur des Amylopektins

In Abbildung 14 ist ein Ausschnitt eines Stärkemoleküls dargestellt, welches ich mit Molekülbausteinen gebaut habe. Hierbei sind drei Glucose-Moleküle ersichtlich, die jeweils 1,4-glykosidisch verbunden sind.

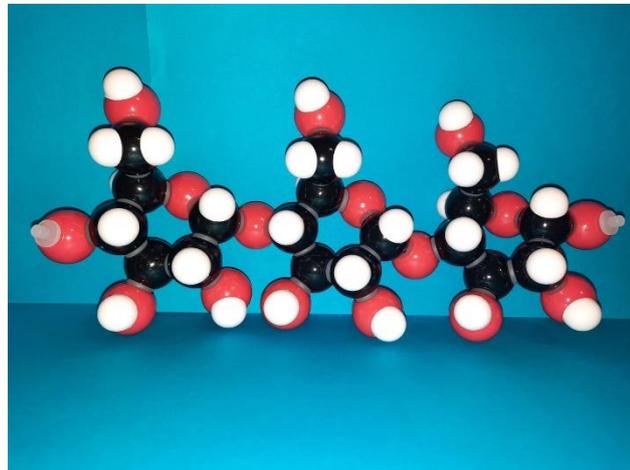


Abbildung 14: Stärke dargestellt mittels Molekülbausteinen

3.3.2 Gewinnung

Die Gewinnung von Stärke erfolgt bei jeder Art anders, jedoch gibt es ein grundlegendes Prinzip, das für alle gilt. Zuerst werden die geernteten Materialien gereinigt und von Fremdstoffen getrennt. Danach werden sie zerkleinert, sodass die Zellen der Pflanzen zerstört werden und die Stärkekörner gewonnen werden. Im nächsten Schritt werden die Rohstoffe mit Wasser verdünnt, wobei eine Suspension entsteht, woraus in weiterer Folge Öle und Fasern getrennt werden. Um die enthaltenen Proteine ebenfalls zu entfernen, wird die Suspension in Zentrifugen oder Hydrozyklonen gegeben.²² In Abbildung 15 ist der Vergleich zwischen den geernteten Rohstoffen und der daraus gewonnenen Stärke zu sehen. Hierbei ist erkennbar, dass zu rund einem Drittel Weizen, zu einem weiteren Drittel Mais und zum letzten Drittel Kartoffeln und weitere Pflanzen für die Gewinnung von Stärke geerntet werden. Die Masse dieser Rohstoffe belief sich im Jahr 2018 in der EU auf 23,8 Millionen Tonnen. Dem gegenüber stehen 10,7 Millionen Tonnen Stärkeprodukte. Die Stärkeausbeute aus einem Rohstoff beträgt demnach rund 45 %, wobei dieser Wert pflanzenabhängig ist. Aus Maispflanzen kann am meisten Stärke gewonnen werden, an zweiter Stelle befindet sich Weizen.

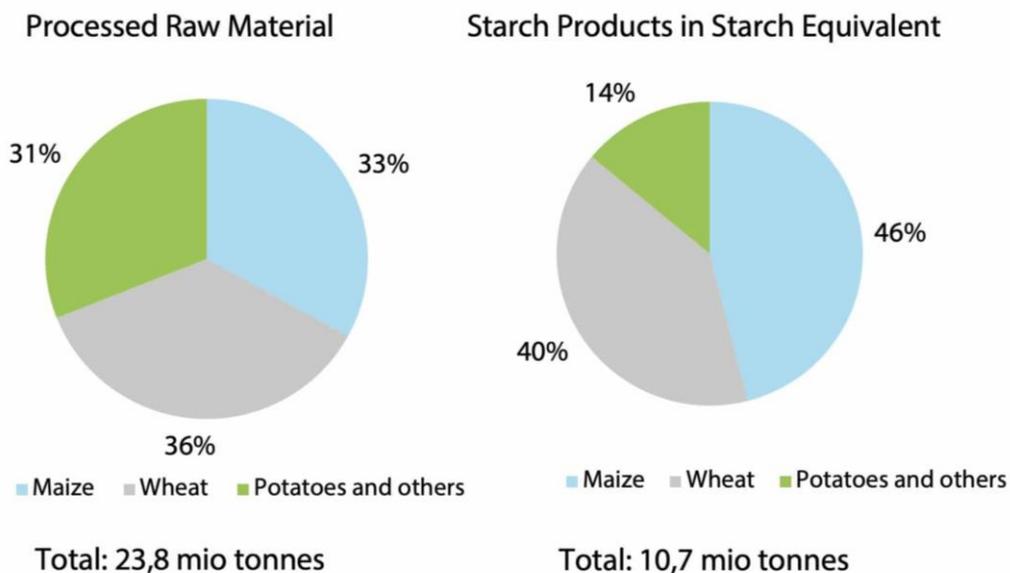


Abbildung 15: Vergleich der Mengen an Pflanzenrohstoffen und daraus gewonnener Stärke in der EU 2018

²² Vgl. Behr u. Seidensticker, 2018, S. 163f.

3.3.3 Eigenschaften und Verwendung

Stärke wird hauptsächlich als Nahrungsmittel verwendet, sie dient in erster Linie den Tieren und Menschen als Energielieferant. Wenn sie direkt aus den Ausgangsrohstoffen gewonnen wird, spricht man von nativer Stärke. Diese wird vor allem in der Nahrungsmittelindustrie eingesetzt. Native Stärke weist jedoch wenig Stabilität und eine ungünstig hohe Viskosität auf, zusätzlich ist sie von Partikelbildung betroffen, weshalb sie für industrielle Anwendungen nicht geeignet ist. Aus diesen Gründen muss Stärke modifiziert werden, wobei es drei Arten gibt. Es kann eine thermische Behandlung durchgeführt werden, wobei die chemische Struktur und teilweise auch die Kornstruktur erhalten bleiben. Bei der zweiten Modifikation entstehen sogenannte derivatisierte Stärken, wobei diese auf der Reaktivität der Hydroxygruppen basiert. Einerseits kann eine Umsetzung zu Stärkeethern oder Stärkeestern erfolgen, andererseits auch eine Oxidation der Hydroxygruppen. Als dritte Modifikation kann eine Hydrolyse der Acetalbindungen durchgeführt werden. Hierbei entstehen Stärken mit geringen Molmassen oder einzelne Zuckerbausteine. Die Hydrolyse kann mit Säuren oder Enzymen vonstattengehen, wobei letztere „Verzuckerung“ genannt wird. Die Produkte der Verzuckerung werden als verzuckerte Stärken bezeichnet. Bei allen drei Modifikationsarten entstehen, mit Ausnahme bei der Verzuckerung, sogenannte modifizierte Stärken.²³ In Abbildung 16 ist zu sehen, in welchem Verhältnis native Stärken, modifizierte Stärken und verzuckerte Stärken zur Anwendung kommen. Verzuckerungsprodukte kommen mit über 50 % am häufigsten zum Einsatz. Da sie hauptsächlich in Nahrungsmitteln vorhanden sind, kann man einen direkten Bezug zu Abbildung 17 herstellen. In dieser ist zu erkennen, dass Stärke zu über 50 % in Lebensmitteln verwendet wird. Ein weiterer wichtiger Anwendungssektor für Stärke ist, wie in Abbildung 17 ersichtlich, die Papierindustrie. Hierbei dient Stärke der Imprägnierung von Papier, um ein Verlaufen der Tinte zu verhindern, und für das Verkleben von Wellpappe.²⁴

²³ Vgl. Behr u. Seidensticker, 2018, S. 164ff.

²⁴ Vgl. ebd., S. 166.

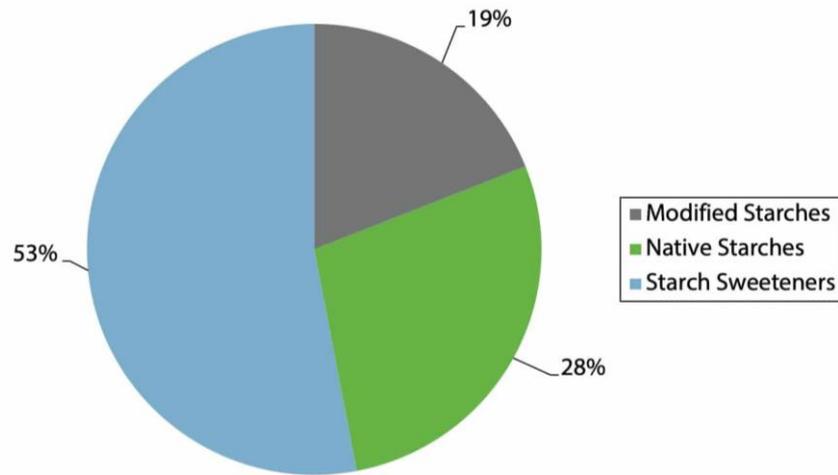


Abbildung 16: Verwendungsverhältnis von nativer Stärke, modifizierter Stärke und Verzuckerungsprodukten

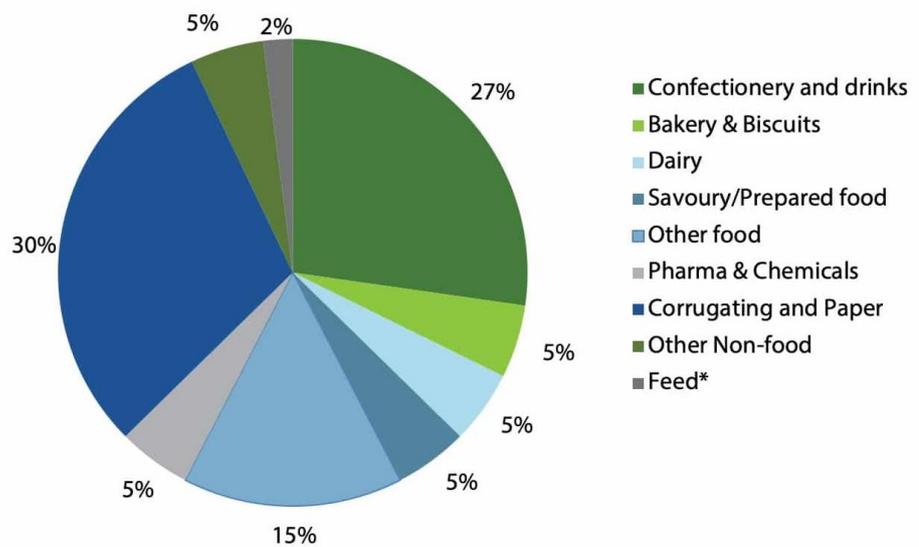


Abbildung 17: Verwendung von Stärke in der EU 2018

Stärkepolymere

Auf diesen Anwendungsbereich wird näher eingegangen, da Stärkepolymere bei den Versuchen in Kapitel 5 verwendet werden. Einer der wichtigsten Biokunststoffe ist die thermoplastische Stärke. Um diese herzustellen wird native Stärke zunächst mit einem Weichmacher, wie zum Beispiel Glycerin, Wasser oder Hydroxycarbonsäuren, vermischt. Dadurch wird die Glasübergangstemperatur, die bei 80 °C liegt und eine hohe Sprödigkeit bedingt, gesenkt.²⁵ Dieses Gemisch kommt anschließend in einen Extruder, wobei es bestimmten Temperaturen, Scherkräften und einem bestimmten Druck ausgesetzt ist. Die Stärkekörner werden zerkleinert und die Kristallinität sowie die Sprödigkeit verringert, wodurch das Gemisch gut weiterverarbeitet werden kann.²⁶ Thermoplastische Stärke kann aufgrund schlechter Eigenschaften, wie Sprödigkeit und Wasserunbeständigkeit, nicht selbstständig als Werkstoff verwendet werden. Daher wird sie meistens mit anderen Materialien vermischt und kommt in Blends zum Einsatz. Thermoplastische Stärken werden hauptsächlich als Zusatzmaterial eingesetzt, da sie billig sind und die Abbaurate und die Abbaugeschwindigkeit erhöhen. Da Stärkeblends jedoch noch immer Eigenschaften aufweisen, die der unverarbeiteten nativen Stärke zu Grunde liegen, werden sie nur begrenzt in technischen Anwendungsbereichen eingesetzt und dienen vor allem als Biomüllbeutel und Agrarfolien. Die Eigenschaften der Stärkeblends können abhängig von den eingesetzten Additiven und den Mengenverhältnissen sehr unterschiedlich sein.²⁷

²⁵ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 135f.

²⁶ Vgl. Behr u. Seidensticker, 2018, S. 166.

²⁷ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 195ff.

3.4 Polylactid (PLA)

Polylactid, auch Polymilchsäure genannt, ist ein Biopolymer, das aus Milchsäuremonomeren synthetisiert wird.

3.4.1 Milchsäure

Die chemische Bezeichnung der Milchsäure lautet 2-Hydroxypropansäure, diese hat sowohl eine Säurefunktion als auch eine Alkoholfunktion. Somit ist jene bifunktionell und kann einen Homopolyester, die Polymilchsäure, bilden. Weiters hat diese Säure ein asymmetrisches Kohlenstoffatom und kann somit in zwei optisch aktiven Formen, der L- und D-Milchsäure, vorgefunden werden (siehe Abbildung 18). Milchsäure wird in den Muskeln bei hohen Anstrengungen gebildet und ist in Sauermilchprodukten vorhanden. Synthetisch wird sie einerseits durch petrochemische Prozesse, andererseits durch Fermentation von Glucose mit Mikroorganismen hergestellt, wobei letztere die häufigste Form ist. Dazu werden Rohstoffe wie Zucker, Maisstärke oder Melasse herangezogen.²⁸

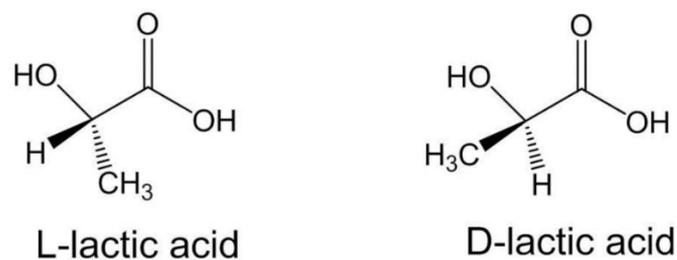


Abbildung 18: Gegenüberstellung L-Milchsäure und D-Milchsäure

3.4.2 Herstellung

Bei der fermentativen Herstellung von Polymilchsäure, welche in Abbildung 19 dargestellt ist, verstoffwechseln zunächst Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen und gleichbleibendem pH-Wert die dafür bestimmten Rohstoffe zu Milchsäure. Diese wird als Natrium-, Calcium- oder Ammoniumlactat von der restlichen Fermentationsbrühe getrennt. Um die Milchsäure freisetzen zu können, wird Schwefelsäure hinzugegeben.

²⁸ Vgl. Behr u. Seidensticker, 2018, S. 115; 330.

Dabei fallen große Mengen an Calciumsulfat als Abfallprodukt an. Im nächsten Schritt erfolgt eine Präpolymerisation, wobei Milchsäureoligomere entstehen. Diese werden anschließend bei geringerem Druck und höheren Temperaturen zu Lactiden katalytisch depolymerisiert. Im letzten Schritt wird Polymilchsäure hergestellt, indem eine Ringöffnungspolymerisation mithilfe von Übergangsmetallkatalysatoren durchgeführt wird.^{29, 30} In Abbildung 20 ist die Struktur eines Polylactids ersichtlich, welche ich mittels Molekülbausteinen gebaut habe.

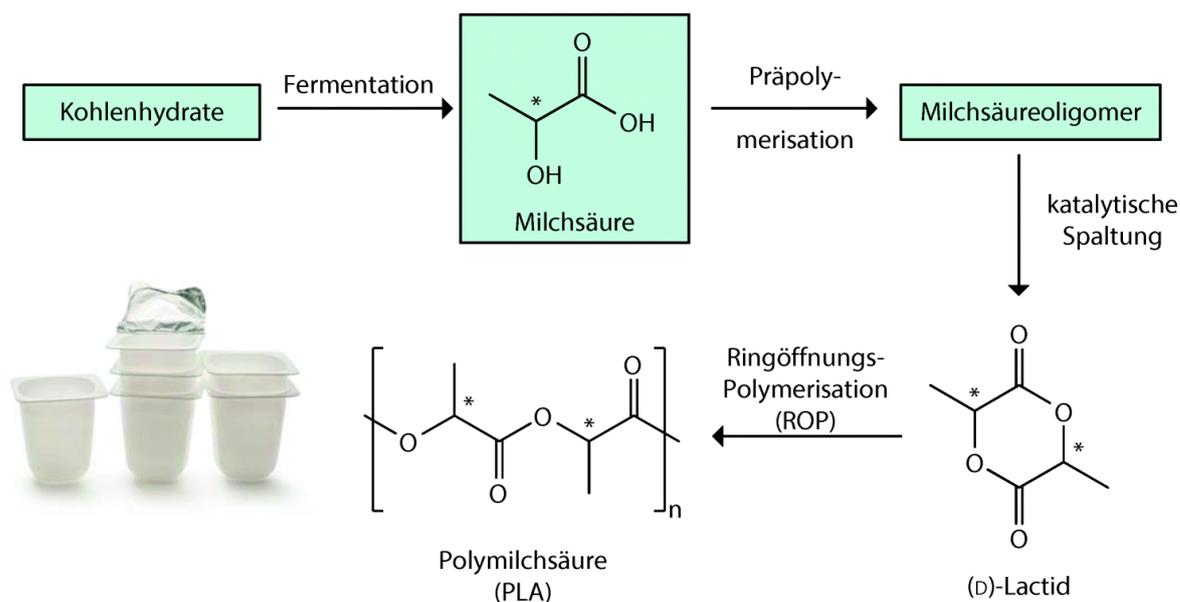


Abbildung 19: Syntheseweg der Polymilchsäure

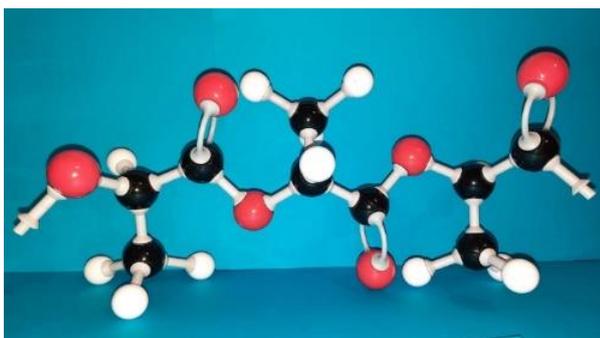


Abbildung 20: Polylactid dargestellt mittels Molekülbausteinen

²⁹ Vgl. Behr u. Seidensticker, 2018, S. 330f.

³⁰ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 104-107.

3.4.3 Eigenschaften und Verwendung

Die Eigenschaften von verschiedenen Polymilchsäuren können unterschiedlich sein, sie hängen vom Verhältnis der Isomere L- und D-Milchsäure, dem Molekulargewicht und der Kristallinität ab. Polylactide zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine hohe Kratzfestigkeit und Transparenz aufweisen, Fett und Wasser abweisen sowie kompostierbar sind. Daher werden sie bevorzugt für Lebensmittelverpackungen und Folien verwendet. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass Polylactide nicht wärmeformbeständig sind und eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit besitzen, wodurch sie nicht für alle Verpackungsarten geeignet sind. Aus diesem Grund werden Polylactide häufig mit Additiven vermischt, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern. Vor allem die Festigkeit und Zähigkeit werden optimiert, um eine bessere Verarbeitbarkeit zu gewährleisten und verschiedenste Produkte wie Folien und Flaschen herstellen zu können. Jedoch können etwaige Modifikationen die Kompostierbarkeit verschlechtern.³¹

³¹ Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 187-191.

4 Kompostierung

4.1 Biologische Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit

Der Vorgang der Kompostierung ist eine Methode, um einen Werkstoff biologisch abzubauen, jedoch haben die Begriffe „biologisch abbaubar“ und „kompostierbar“ unterschiedliche Bedeutungen. Ein Werkstoff wird als biologisch abbaubar definiert, wenn alle organischen Bestandteile durch einen biologischen Prozess vollständig abgebaut werden, wobei die Zeitspanne vom Beginn des Primärabbaus bis zum Endabbau nicht relevant ist. Kompostierbar sind jene Materialien, die unter den gegebenen Voraussetzungen in einem Kompostierungsprozess innerhalb eines Kompostierungszyklus vollständig in Wasser, Kohlenstoffdioxid und Biomasse zerlegt werden können.³²

Bei der Kompostierung geht es grundlegend um den Abbau organischer Abfälle. Es erfolgt ein aerober Abbau durch verschiedene Mikroorganismen unter sauerstoffreichen Bedingungen. Im Laufe der Kompostierung erhöht sich die Temperatur und Wärmeenergie wird frei. Als Produkt dieses Prozesses entsteht Kompost, der entweder als Komposterde oder als Bodenverbesserer wieder dem Kreislauf der Natur zurückgeführt werden kann, wobei er die Wasserhaltekapazität der Böden steigert und das Pflanzenwachstum fördert.³³

4.2 Die Phasen des Rotteprozesses

Es gibt drei Phasen, die während einer Kompostierung stattfinden, diese heißen Abbau-, Umbau- und Aufbauphase.

Im ersten Abschnitt bilden sich zuerst vor allem mesophile Mikroorganismen. Mesophile Lebewesen bevorzugen Temperaturen zwischen 20 und 45 °C.³⁴

³² Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 24-27.

³³ Vgl. Cord-Landwehr u. Kranert, 2010, S. 185.

³⁴ Vgl. Antwerpes, 2018.

Durch ihre hohe Aktivität aufgrund der hohen Verfügbarkeit an Kohlenstoffquellen vergrößert sich die thermische Leistung rasant und die Temperatur im Kompost steigt. Bei über 45 °C können mesophile Mikroorganismen nicht mehr überleben, sie sterben ab und es bilden sich thermophile Mikroorganismen, vorrangig Bakterien, wie Aktinomyzeten, und Pilze. Thermophil bedeutet, dass sich diese Lebewesen bei Temperaturen zwischen 45 °C und 80 °C am wohlsten fühlen.³⁵ Bei einem Anstieg der Temperatur auf rund 70 °C stellt sich die Aktivität der thermophilen Mikroorganismen ein und die Temperatur beginnt zu sinken. In dieser Phase werden leicht abbaubare Substanzen zerlegt. Anschließend kommt es wieder zu einem Anstieg mesophiler Mikroorganismen, die aufgrund von Sporen- und Konidienbildung nicht abgestorben sind. In der Umbauphase werden höher molekulare Verbindungen von den mesophilen Mikroorganismen veratmet. Weiterhin erfolgt ein geringfügiges Absinken der Temperatur. In der Aufbauphase, die im fortgeschrittenen Rottestadium erfolgt, sinkt die Temperatur vollständig ab. Hierbei werden auch biogene Makromoleküle, also Biopolymere, durch Pilze und Aktinomyzeten zersetzt.³⁶

4.3 Beeinflussende Faktoren

Um einen möglichst schnellen Abbau organischer Verbindungen im Kompost zu gewährleisten, müssen einige Faktoren berücksichtigt werden. Einerseits spielt der Temperaturbereich eine große Rolle, da zu hohe Temperaturen ein zu rasches und starkes Absterben der Mikroorganismen bedingen und den Abbau beenden können. Andererseits ist der Wassergehalt sehr wichtig, dieser kann sich durch die Wärme verringern, was sich negativ auf den Kompostierungsvorgang auswirkt. Zusätzlich ist eine ausreichende Versorgung mit Sauerstoff notwendig, da es sonst zu einem unvollständigen Abbau kommt.

³⁵ Vgl. Antwerpes, 2018.

³⁶ Vgl. Cord-Landwehr u. Kranert, 2010, S. 186; 191.

4.3.1 Temperatur

Die Temperatur beeinflusst maßgeblich die Entwicklung der Mikroorganismen und deren Aktivität. Je höher die Temperatur ist, desto höher ist auch die mikrobielle Aktivität bis zu einem bestimmten Grenzbereich. Dabei laufen unter 5 °C Vorgänge nur sehr langsam ab und über 75 °C kommt es zu einer Inaktivierung dieser Lebewesen. Weiters hat die Temperatur einen Einfluss auf die Löslichkeit des Sauerstoffs in Wasser und auf den Stickstoffabbau. Stickstoffverluste können verringert werden, indem die Temperatur nicht über 55 °C ansteigt. Dem gegenüber steht jedoch die hygienische Ansichtsseite. Denn um eine Entseuchung des Kompostes zu erzielen, muss eine Temperatur von 60 °C mehrere Tage gehalten werden. In Abbildung 21 ist die Änderung der Temperatur während eines Kompostierungsprozesses zu erkennen. Schon in der Abbauphase erreicht die Temperatur ihren Höhepunkt, wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt worden ist. Bis zum Ende des Prozesses sinkt die Temperatur wieder bis zu den Ausgangswerten ab.³⁷

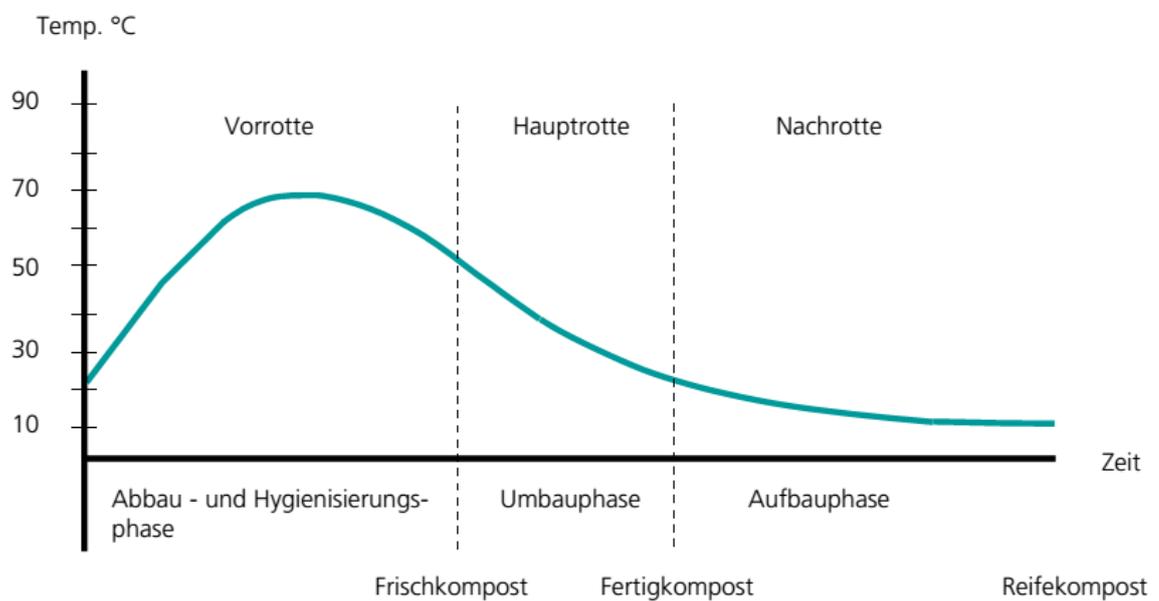


Abbildung 21: Temperaturverlauf während einer Kompostierung

³⁷ Vgl. Cord-Landwehr u. Kranert, 2010, S. 190ff.

4.3.2 Sauerstoff

Sauerstoff kann zum Kompost einerseits auf natürliche Weise gelangen, wobei man von passiver Belüftung spricht. Andererseits kann er auch zwangsweise zugeführt werden, was einer aktiven Belüftung entspricht. Sauerstoff ist sehr wichtig für die Kompostierung, da er eine Grundvoraussetzung für das Leben aerober Mikroorganismen ist, zusätzlich steigert er ihre Aktivität. Weiters kann durch eine ausreichende Belüftung mit Sauerstoff Kohlenstoffdioxid besser abgeführt werden und gegebenenfalls die Rotte zusätzlich etwas getrocknet werden. Ein weiterer positiver Aspekt ist, dass durch eine Belüftung ein Wärmestau vermieden werden kann und somit die Mikroorganismen länger aktiv bleiben. Um die passende Menge an Sauerstoff dem Kompost zuzuführen, muss zuerst der Sauerstoffbedarf der Mikroorganismen berücksichtigt werden. Diese nehmen den in Wasser gelösten Sauerstoff auf. Da dieser schnell verbraucht wird, muss immer neuer Sauerstoff zwischen den Poren vorhanden sein. Weiters müssen die Temperatur und der optimale Wassergehalt betrachtet werden, um die passende Belüftung zu erzielen.³⁸

4.3.3 Wassergehalt

Der richtige Wassergehalt ist einer der wichtigsten Kriterien für eine optimale Kompostierung. Ein hoher Wassergehalt begünstigt die Nährstoffversorgung der Mikroorganismen sowie den Abtransport von Stoffwechselprodukten. Diese Vorgänge können nur in wässriger Lösung ablaufen, da die Stoffe durch eine semipermeable Zellmembran diffundieren müssen. Im Gegensatz dazu steht die passende Sauerstoffversorgung. Ist der Wassergehalt im Kompost zu hoch, kann Sauerstoff den Mikroorganismen nicht mehr in ausreichender Menge zugeführt werden. Der optimale Wassergehalt hängt somit von der Porenstruktur ab. Saugfähige Materialien mit großen Porenräumen können mehr Wasser bei gleichem Luftporenvolumen aufnehmen als weniger saugfähige. Je nach Struktur sollte der Wassergehalt zwischen 45 % und 65 % liegen. Unter 25 % ist die mikrobielle Aktivität gering und unter 10 % nicht vorhanden.³⁹

³⁸ Vgl. Cord-Landwehr u. Kranert, 2010, S. 193.

³⁹ Vgl. ebd., S. 195f.

4.3.4 pH-Wert

Der pH-Wert ist ein weiterer signifikanter Faktor, der den Verlauf einer Kompostierung beeinflusst. Grundsätzlich sollte der pH-Wert am Beginn einer Kompostierung nicht zu sauer sein und in einem Bereich zwischen pH 7 und 11 liegen. Während der Kompostierung verändert sich der pH-Wert. In der Abbauphase sinkt er auf bis zu pH 5,5. Dies geschieht aufgrund der Kohlenstoffdioxidbildung, der Nitrifikation und der Bildung von organischen Säuren durch Mikroorganismen. Nach längerer Zeit beginnt der pH-Wert wieder auf über pH 8 anzusteigen. Der Grund dafür ist die Bildung von Ammoniak und die erhöhte Aktivität der Mikroorganismen. In diesem Zusammenhang gibt es ein weit verbreitetes Problem bei der Kompostierung von Bioabfall. Da die Bioabfälle nur in sehr großen Zeitabständen abgeholt werden, findet schon vor der Kompostierung die Bildung von organischen Säuren statt. Da in saurem Milieu die mikrobielle Aktivität stark absinkt, verlangsamt sich der gesamte Prozess. Unter einem Wert von pH 5 kommt es sogar zu einer starken Hemmung des Kompostierungsprozesses.⁴⁰

4.4 Mikroorganismen

4.4.1 Bakterien und Pilze

Bakterien im Kompost sind vorwiegend einzellig mit einer Länge von 2 bis 5 µm. Eine besondere Gattung hierbei ist die der Aktinomyzeten. Diese Bakterien sind den Pilzen sehr ähnlich, sie haben ein fadenartiges Geflecht aus Hyphen und vermehren sich durch Konidien oder Sporen. Bei der Kompostierung spielen sie eine wesentliche Rolle beim Abbau von Chitin und Cellulose. Weiters sind im Kompost Bakterien vorhanden, die intrazelluläre Sporen bilden, die gegenüber Hitze und Austrocknung im Kompost beständig sind. Ein weiterer wichtiger Bestandteil im Kompost sind Pilze. Sie sind eukaryotische, meistens aerobe Lebewesen, die jedoch keine Photosynthese, wie andere Pflanzen, betreiben können. Im Kompost sind vor allem hitzebeständige Pilze vorhanden, dabei handelt es sich meistens um Schimmelpilze.

⁴⁰ Vgl. Cord-Landwehr u. Kranert, 2010, S. 198.

4.4.2 Mikrobieller Abbau

Um Nahrung aufzunehmen und die Energieversorgung zu decken, verarbeiten Mikroorganismen organische Produkte im Kompost, wobei unter Energiefreisetzung andere Stoffe gebildet werden. Dieser Prozess wird schematisch in Abbildung 23 dargestellt. Handelt es sich bei den Ausgangsstoffen um niedermolekulare Verbindungen, wie Aminosäuren oder einfache Zucker, können diese sofort von den Zellen aufgenommen werden. Hierbei werden diese Stoffe durch enzymatische Reaktionen umgesetzt. Handelt es sich um höhermolekulare Stoffe, müssen diese zuerst in kleinere Bestandteile zerlegt werden. Dies geschieht durch extrazelluläre Enzyme, die die Mikroorganismen herstellen und die im Wasserfilm, der die Kompostkörner umgibt, arbeiten. Dabei entstehen niedermolekulare Verbindungen, die wieder von den Mikroorganismen aufgenommen werden. Bei dieser Umsetzung wird Energie frei, die zu 60 % als Wärme abgegeben wird und zu 40 % als Adenosintriphosphat (ATP) den Zellen zur Verfügung steht. In Abbildung 22 ist die Reaktionsgleichung des aeroben Glucoseabbaus mit dessen Energiebilanz dargestellt. Mikroorganismen zerlegen Glucose und Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser, wobei dies exotherm verläuft. Produkt dieses Abbaus ist weiterverwertbare Biomasse.⁴¹

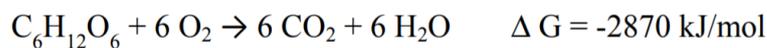


Abbildung 22: Energiebilanz des aeroben Glucoseabbaus

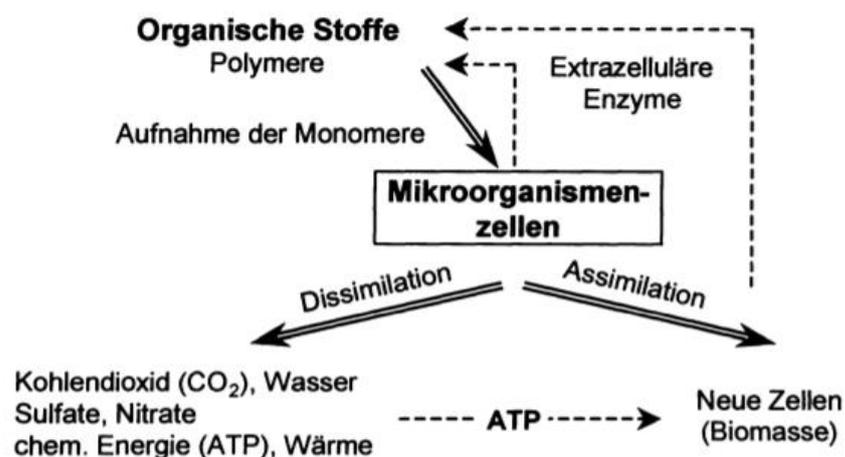


Abbildung 23: Mikrobieller Stoffabbau

⁴¹ Vgl. Kämpfer u. Weißenfels, 2001, S. 9-14.

4.5 Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit von Biopolymeren

Bei biologischen Abbauvorgängen kann man zwischen zwei Kategorien unterscheiden. Zu Beginn gibt es den Primärabbau, bei welchem Makromoleküle gespalten werden. Weiterführend spricht man von einem Endabbau, wenn nach der Spaltung nur noch Wasser, Kohlenstoffdioxid und Biomasse als Produkte übrig sind. Bei allen Abbauprozessen können Veränderungen der Eigenschaften der Kunststoffe eintreten. Zunächst kann sich das Aussehen ändern, indem ihre Oberflächenbeschaffenheit oder Farbe variieren. Weiters können auch mechanische Kenngrößen der Polymere nach einem Abbauvorgang völlig verschieden sein. Mikroorganismen, die für den Abbauprozess notwendig sind, sind dafür verantwortlich, dass sie die Ausgangsstoffe mithilfe von extrazellulären Enzymen verarbeiten. Dabei zerkleinern sie die Polymere meistens durch Hydrolyse- und Oxidationsvorgänge. Die Enzyme müssen die Materialien an der Oberfläche angreifen, weil diese zu groß sind, um in sie hineinzugelangen. Um grundsätzlich sagen zu können, wie gut die Mikroorganismen die Polymerkette spalten können, muss auf die Anzahl der Heteroatome in den Hauptketten geachtet werden. Je mehr Heteroatome vorhanden sind, desto zugänglicher sind die Ketten für die Mikroorganismen und desto besser verläuft der Primärabbau. Beim weiterführenden Endabbau zerlegen die Mikroorganismen durch intrazelluläre Verstoffwechslungsprozesse die Spaltprodukte der Polymere. Falls die benötigte Verstoffwechslbarkeit des Kunststoffes nicht gegeben ist und der Endabbau nicht vollständig zu Ende geht, verbleiben die restlichen Moleküle und sammeln sich in der Umgebung an.⁴²

⁴² Vgl. Endres u. Siebert-Raths, 2009, S. 24-27.

5 Praktischer Teil

5.1 Versuche zur Abbaubarkeit

Ziel dieser Versuche war es, die Abbaubarkeit von Folien unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen festzustellen. Dazu wurden verschiedene Biopolymere vermischt, indem sie aufgeschmolzen, verknetet und anschließend zu Folien gepresst wurden. Diese wurden Zugprüfungen und DSC-Messungen unterzogen, um die Eigenschaften der Materialien zu bestimmen. Danach wurden einerseits Kompostierungsversuche durchgeführt, andererseits wurde die Abbaubarkeit der Folien bei Bedingungen ähnlich einer Kläranlage betrachtet.

5.1.1 Herstellung der Folien

Materialien:

- Kaltwasserlösliche PVOH-Folien (gs – go soluble wasserlösliche Verpackungen GmbH, Diez, DE)
- Stärkebasiertes Granulat: Mater-Bi EF51L (Novamont S.p.A., Novara, IT)
- PLA-basiertes Granulat: NP SF 141 (NaturePlast, Ifs, FR)
- Kompostierbare Biomüllbeutel (SPAR Österreichische Warenhandels-AG, Salzburg, AT), welche bei der Kompostierung als Referenzmaterialien dienen

Geräte:

- Knetter: Brabender PlastiCorder PL2000 (Brabender GmbH & Co. KG, Duisburg, DE)
- Presse: Collin P 200 PV (COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH, Maitenbeth, DE)

Herstellungsprozess:

Aus den oben genannten Materialien wurden sechs verschiedene Folien hergestellt. Das Prinzip war jeweils dasselbe. Es wurde die gewünschte Mischung der Werkstoffe zuerst in den Knetter gefüllt. Dabei wurden die Materialien rund 15 Minuten lang auf ihre jeweilige Schmelztemperatur beziehungsweise bei Mischungen auf die höhere Schmelztemperatur erhitzt. Im Knetter wurden die Polymere durch ständige Bewegungen vermischt, sodass eine homogene Masse entnommen und danach abgekühlt werden konnte.

Dabei wurden folgende Materialien hergestellt:

- PVOH/Stärke-Folien im Volumenverhältnis 1 : 1
- PVOH/PLA-Folien im Volumenverhältnis 1 : 1
- PVOH/Biomüllbeutel-Folien im Volumenverhältnis 1 : 1
- PVOH-Folien
- Stärke-Folien
- PLA-Folien

In Abbildung 24 sind die hergestellten Materialien zu sehen.



Abbildung 24: Geknetete Materialien
(A: PVOH/PLA, B: Stärke, C: PLA, D: PVOH/Stärke)

Danach wurden diese sechs Werkstoffe in der Presse weiterverarbeitet. Dabei wurden wenige Gramm des jeweiligen Materials in die Presse gegeben. Dort wurden die Polymere wiederum aufgeschmolzen und zu Folien gepresst. In Abbildung 25 sind Bilder der gepressten Folien zu sehen.

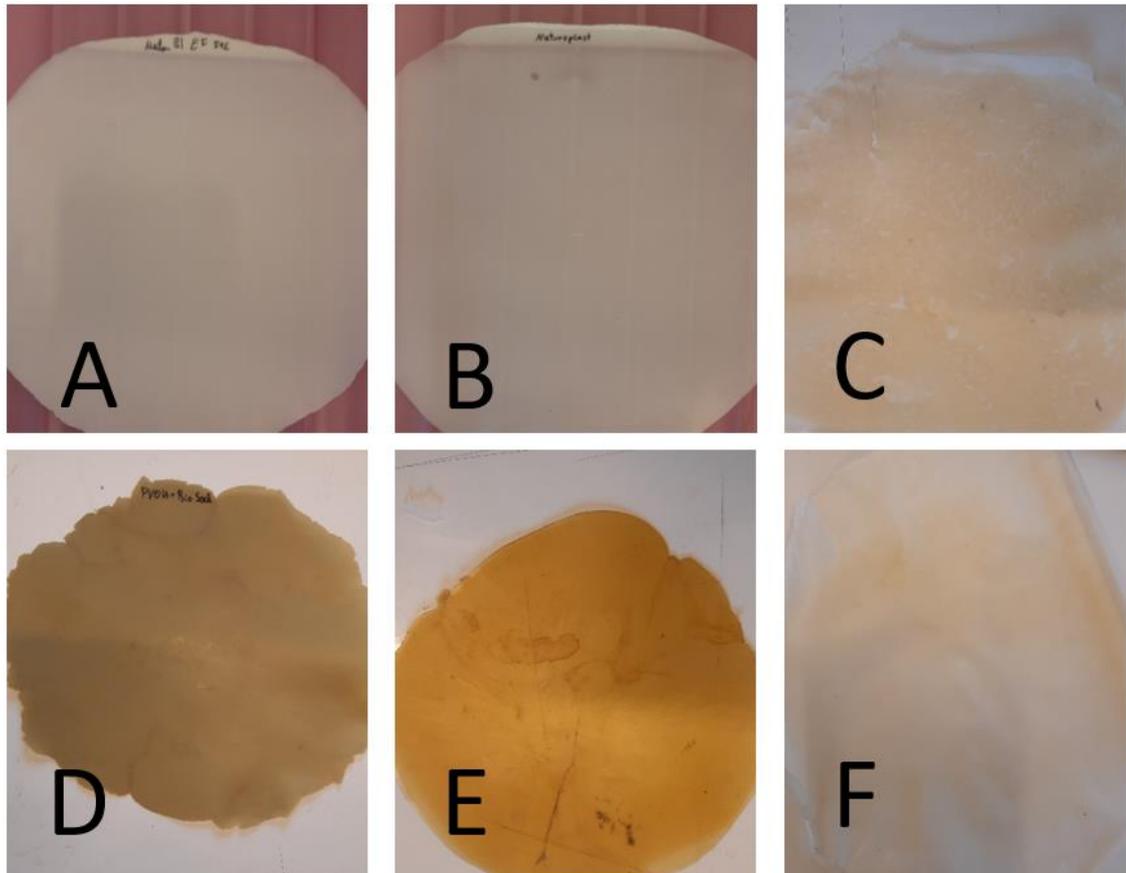


Abbildung 25: Gepresste Folien
(A: Stärke, B: PLA, C: PVOH/Stärke, D: PVOH/Biomüllbeutel, E: PVOH, F: PVOH/PLA)

5.1.2 Versuche zur Kompostierbarkeit

Mit diesen Versuchen wurde versucht festzustellen, ob und wie die Folien während eines Kompostierungsprozesses verändert und abgebaut werden.

5.1.2.1 Vorbereitung:

Für die Kompostierung wurden aus allen Folien zwei 5 cm lange und 3 cm breite Streifen geschnitten, welche abgewogen und beschriftet wurden. Zusätzlich wurden zwei Proben aus Polyethylen als Referenzmaterial herangezogen, da dieses unter den gewählten Rahmenbedingungen nicht abbaubar ist und dessen Masse daher während des Kompostierungsprozesses gleichbleiben sollte. Der Kompost (Poschacher Kompost, Kraubath an der Mur, AT) wurde in zwei Kunststoffkisten gefüllt, wobei in jeder rund 0,3 m³ Kompost vorhanden waren.

Weiters wurden Kunststoffschnüre zugeschnitten und mit Klammern verbunden, die an den Polymerstreifen befestigt im Kompost mit vergraben wurden. Diese Hilfsmittel wurden gebraucht, um die Proben wieder finden zu können. In Abbildung 26 sind der Kompostbehälter und drei der für die Kompostierung vorbereiteten Folien abgebildet.



Abbildung 26: Kompost und drei zur Kompostierung vorbereitete Folien

5.1.2.2 Durchführung:

In der ersten Woche wurde zuerst die Feuchtigkeit des Kompostes bestimmt. Dazu wurde ein Teil des Kompostes abgewogen, getrocknet und daraufhin wieder abgewogen, um die Trockenmasse zu berechnen. Daraus ergab sich in weiterer Folge ein Feuchtigkeitsgehalt von rund 15 %, woraufhin der Kompost ausreichend bewässert wurde. Danach war in beiden Kompostbehältern eine Feuchtigkeit zwischen 40 % und 50 % vorhanden, was einem optimalen Wassergehalt, wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, entspricht. Weiters wurden Proben entnommen und mikroskopiert. Dabei wurde die Aktivität der Mikroorganismen überprüft und das Vorhandensein vieler verschiedener Arten festgestellt. Um optimale Bedingungen für die Kompostierung zu sichern, wurden bestimmte Maßnahmen, die in Kapitel 4.3 beschrieben worden sind, ergriffen.

Beide Kompostbehälter wurden in einen Wärmeofen gegeben, um das Material konstant auf einer Temperatur von 37 °C zu halten. Zusätzlich wurden die Belüftungskappen geöffnet, um die Sauerstoffversorgung zu gewährleisten. Täglich wurden die Temperatur und der pH-Wert des Kompostes gemessen, um zu erkennen, in welcher Rottephase sich der Kompost befindet oder ob die nächste Phase bereits beginnt. In den anderen beiden Wochen wurde die Kompostierung der Folien durchgeführt. Jeweils eine Probe einer Folie wurde im ersten Kompost, die anderen in dem zweiten Kompost vergraben.

5.1.2.3 Ergebnis und Diskussion:

In diesem Abschnitt werden die Messwerte der Temperatur- und pH-Wert-Messungen bei der Kompostierung und der Masseverlust der Folien beschrieben. Zur Bestimmung des Masseverlustes wurde die Masse der Folien vor und nach dem Versuch herangezogen (siehe nachfolgende Formel).

$$\text{Masseverlust} = \frac{\text{Ausgangsmasse} - \text{Endmasse}}{\text{Ausgangsmasse}}$$

In Abbildung 27 sind die Mittelwerte der Masseverluste aller Folien aus beiden Komposten zu sehen.

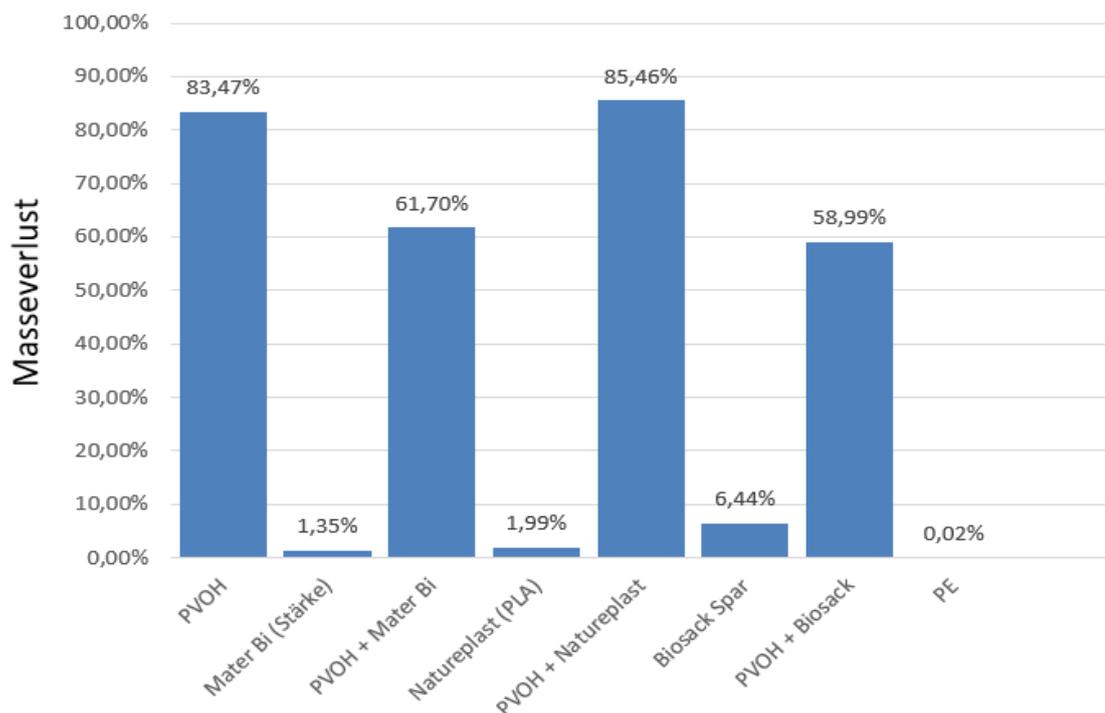


Abbildung 27: Masseverlust der Folien im Kompost

Es ist zu erkennen, dass die PVOH-Folie rund 83 % ihrer ursprünglichen Masse verloren hat. Der Grund dafür ist die in Kapitel 3.2.3.2 beschriebene Wasserlöslichkeit, die einen raschen Primärabbau bedingt.

Die Stärke- und PLA-Folien verloren nur unter 2 % ihrer Ausgangsmasse.

Auch der kompostierbare Biomüllbeutel von Spar wurde in der geringen Zeit nur zu ungefähr 6 % abgebaut.

Umso auffälliger sind die Masseverluste der PVOH/PLA-Folie und der PVOH/Stärke-Folie. Durch den PVOH-Anteil in den Folien, verloren sie einen großen Teil ihrer Masse. Bei der Mischung aus PVOH und dem Biomüllbeutel sind es rund 59 %, bei der PVOH/Stärke-Mischung rund 62 % und bei der PVOH/PLA-Mischung 85 %. Da die Folien jeweils in einem Verhältnis von 1:1 gemischt worden waren, kann man sagen, dass sich nicht nur der PVOH-Anteil aus den Folien gelöst hat, sondern dass auch Teile der anderen Materialien stärker als bei den ungemischten Folien abgebaut worden sind.

Dieser große Masseverlust kann darauf zurückzuführen sein, dass sich nach dem Lösen des PVOH aus den Folien die Oberfläche der restlichen Materialien vergrößert, wodurch die Mikroorganismen mehr Angriffsfläche haben und die Polymere besser abbauen können.

In Abbildung 28 und Abbildung 29 sind die Vergleiche der Stärke-Folie und der PVOH/Stärke-Folie vor und nach der Kompostierung abgebildet. Bei der Stärke-Folie sind keine Unterschiede erkennbar, während von der PVOH/Stärke-Folie nach der Kompostierung nur noch wenig vorhanden ist.

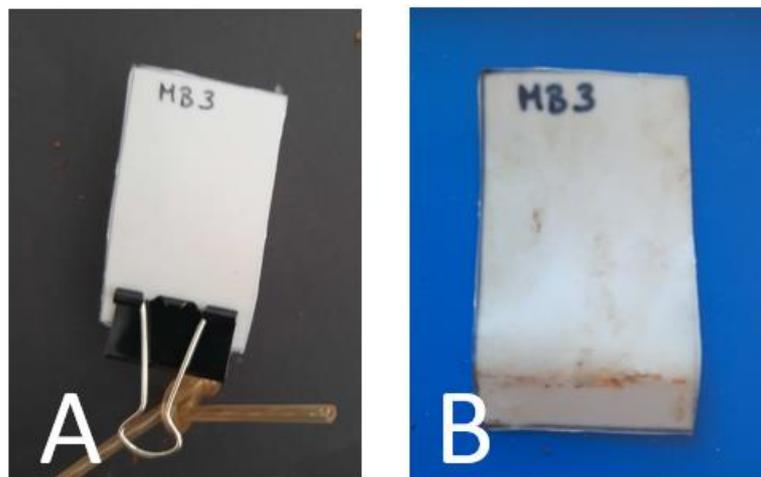


Abbildung 28: Vergleich der Folien vor und nach der Kompostierung
(A: Stärke-Folie vorher, B: Stärke-Folie nachher)



Abbildung 29: Vergleich der Folien vor und nach der Kompostierung
(C: PVOH/Stärke-Folie vorher, D: PVOH/Stärke-Folie nachher)

In Abbildung 30 sind die Mittelwerte der pH-Werte und der Temperatur der Komposte dargestellt.

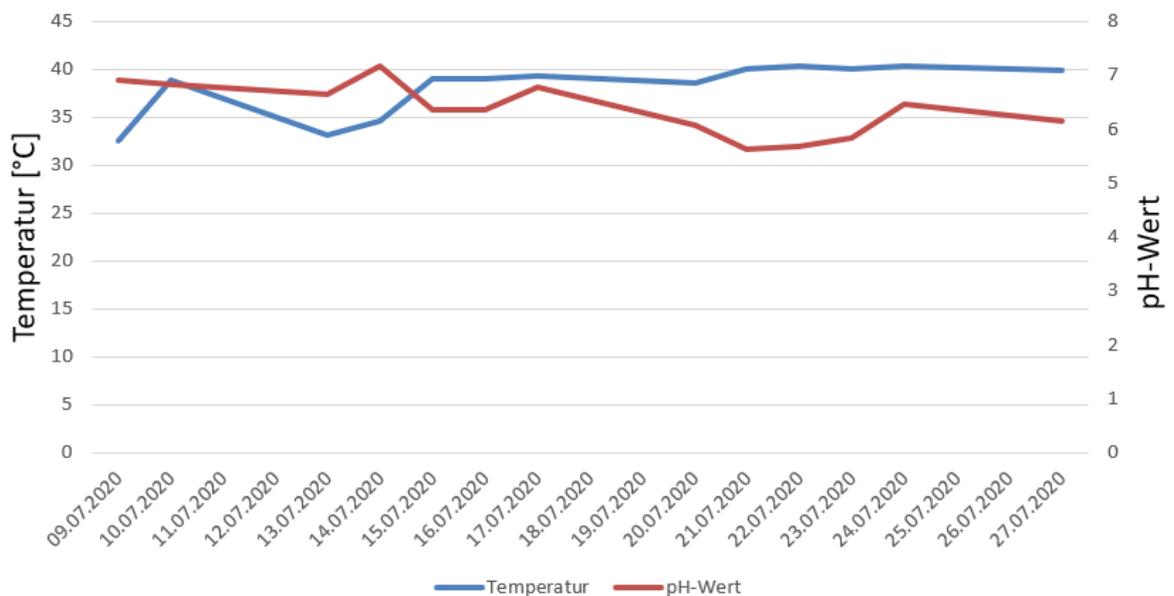


Abbildung 30: Mittelwerte der Temperatur und der pH-Werte beider Komposte

Bei der Temperaturkurve (blau) ist erkennbar, dass die Temperatur mit leichten Schwankungen zuerst ansteigt und sich bei rund 40 °C einpendelt. Bei der pH-Wert-Kurve (rot) kann gesagt werden, dass sie tendenziell von Beginn an bis zum Schluss leicht sinkt. Es sind jedoch starke Schwankungen vorhanden, die möglicherweise aufgrund von Messfehlern durch die Inhomogenität des Kompostes entstanden sind.

Am Ende des Beobachtungszeitraumes liegt der pH-Wert bei etwa 6. Somit kann gesagt werden, dass der Kompost während dieses Versuches am Beginn der ersten Rottephase war. Daraus ergibt sich in weiterer Folge, dass die Aktivität der Mikroorganismen noch nicht hoch war, was wiederum bekräftigt, dass die hohen Masseverluste auf die Wasserlöslichkeit von PVOH zurückzuführen sind.

In diesem Zusammenhang müssten zukünftig noch weitere Untersuchungen angestellt werden, um zu klären, ob das gelöste PVOH von den Mikroorganismen weiter zerlegt werden kann, da die Möglichkeit eines vollständigen Endabbaus bei längerer Kompostierung nicht komplett ausgeschlossen ist (siehe Kapitel 3.2.3.3).

5.1.3 Versuche zur Abbaubarkeit bei Bedingungen ähnlich einer Kläranlage

Die Intention dieser Versuche war, zu sehen, ob die hergestellten Folien auch bei Bedingungen ähnlich einer Kläranlage abgebaut werden können. Dazu wurden Mikroorganismen, die sowohl für Kompostierungen als auch für Kläranlagen geeignet sind, eingesetzt.

5.1.3.1 Vorbereitung:

Für die Untersuchung zur Abbaubarkeit der Folien wurden Mikroorganismen (Multikraft Produktions- und HandelsgmbH, Pichl/Wels, AT) herangezogen. Die genaue Bezeichnung dieses Pflanzenhilfsmittels ist „eMB aktiv“. Diese Substanz enthält effektive Mikroorganismen, die bei der Kompostierung sowie der Behandlung von Abwässern und Klärschlamm eingesetzt werden können. Diese Flüssigkeit wurde mit Wasser in vier verschiedenen Volumenverhältnissen gemischt.

- eMB : Wasser = 9 : 1
- eMB : Wasser = 1 : 1
- eMB : Wasser = 1 : 9
- eMB : Wasser = 0 : 1

Für diese Versuche wurden die PLA-Folien, die Stärke-Folien und deren Mischungen mit PVOH benutzt. Die Folien wurden in vier quadratische Stücke mit einer Breite von 3 cm geschnitten und abgewogen. Weiters wurden für die Versuche verschließbare Gläser benutzt, die gelocht waren, um die Sauerstoffversorgung zu gewährleisten.

5.1.3.2 Durchführung:

In 16 Gläser wurden je 100 ml einer Mischung gegeben. Jeder der vier Flüssigkeitsansätze wurden alle vier Folien einmal zugeordnet, hierbei ergaben sich die in Tabelle 1 dargestellten Kombinationen.

	Flüssigkeit	Material der Folie
Glas 1	eMB : Wasser = 9 : 1	PLA
Glas 2	eMB : Wasser = 9 : 1	Stärke
Glas 3	eMB : Wasser = 9 : 1	PLA + PVOH
Glas 4	eMB : Wasser = 9 : 1	Stärke + PVOH
Glas 5	eMB : Wasser = 1 : 1	PLA
Glas 6	eMB : Wasser = 1 : 1	Stärke
Glas 7	eMB : Wasser = 1 : 1	PLA + PVOH
Glas 8	eMB : Wasser = 1 : 1	Stärke + PVOH
Glas 9	eMB : Wasser = 1 : 9	PLA
Glas 10	eMB : Wasser = 1 : 9	Stärke
Glas 11	eMB : Wasser = 1 : 9	PLA + PVOH
Glas 12	eMB : Wasser = 1 : 9	Stärke + PVOH
Glas 13	Wasser	PLA
Glas 14	Wasser	Stärke
Glas 15	Wasser	PLA + PVOH
Glas 16	Wasser	Stärke + PVOH

Tabelle 1: Kombinationen der verschiedenen Folien mit den einzelnen Flüssigkeitsmischungen

In allen Gefäßen wurde täglich der pH-Wert gemessen, um Veränderungen erkennen zu können, da die eingesetzten Mikroorganismen ein saures Milieu bei einem pH-Wert von 3 bis 5 bevorzugen.

5.1.3.3 Ergebnis und Diskussion:

In diesem Teil werden die pH-Werte der Mikroorganismenlösungen und die Masseverluste der Folien behandelt. Zur Bestimmung des Masseverlustes wurde die Masse der Folien vor und nach dem Versuch herangezogen (siehe nachfolgende Formel).

$$\text{Masseverlust} = \frac{\text{Ausgangsmasse} - \text{Endmasse}}{\text{Ausgangsmasse}}$$

Schon während der Versuche konnte visuell eine Veränderung der Oberfläche mancher Folien erkannt werden. Nach eineinhalb Wochen wurden alle Folien aus den Gläsern genommen, getrocknet und abgewogen. In Abbildung 31 sind die Masseverluste der Folien in den Mikroorganismenlösungen zu sehen.

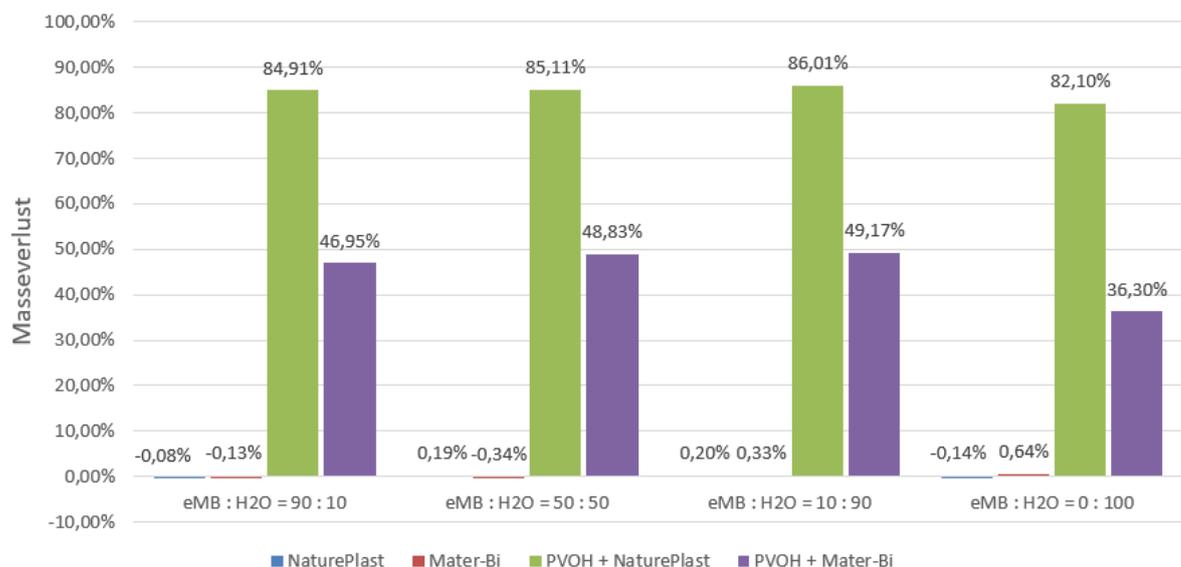


Abbildung 31: Masseverlust der Folien in den Flüssigkeitsmischungen

Wie in Abbildung 31 ersichtlich, verloren die Folien, die nicht mit PVOH gemischt worden waren, keine Masse. Die wenigen leicht negativen Prozentpunkte der ungemischten Materialien lassen sich vermutlich auf Messfehler beim Abwiegen zurückführen.

Am meisten Masse verloren die PVOH/PLA-Folien, wobei in allen vier Flüssigkeiten ein Masseverlust von über 80 % zu verzeichnen war.

Den nächsthöheren Masseverlust konnte man bei den PVOH/Stärke-Folien sehen, hierbei wurden bis zu 50 % der Masse verloren. Dabei ist zu erkennen, dass bei beiden Mischungen jeweils der Verlust in reinem Wasser stärker von den anderen Werten abweicht, was vermutlich auf die fehlenden Mikroorganismen zurückzuführen ist. Weiters

ist vor allem der klare Unterschied zwischen den ungemischten Materialien und den Mischungen zu sehen. Somit kann gesagt werden, dass der Masseverlust dieser Folien auf der Wasserlöslichkeit des PVOH beruht, welche in Kapitel 3.2.3.2 beschrieben ist.

In den Abbildungen 32-35 sind die jeweiligen pH-Werte, die während des Versuches gemessen worden sind, zu sehen.

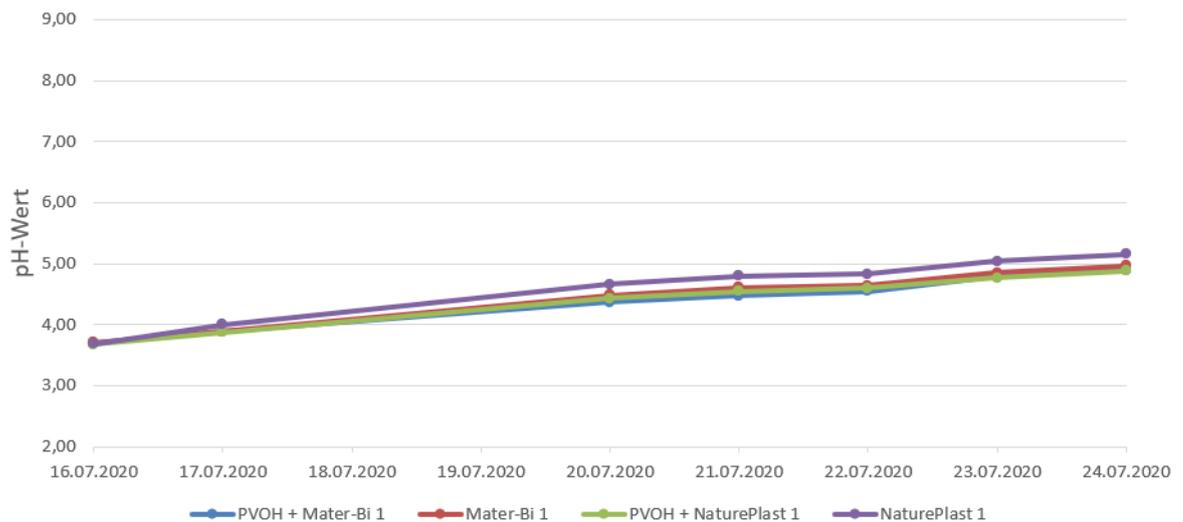


Abbildung 32: pH-Werte der Mikroorganismenlösung eMB : Wasser = 9 : 1

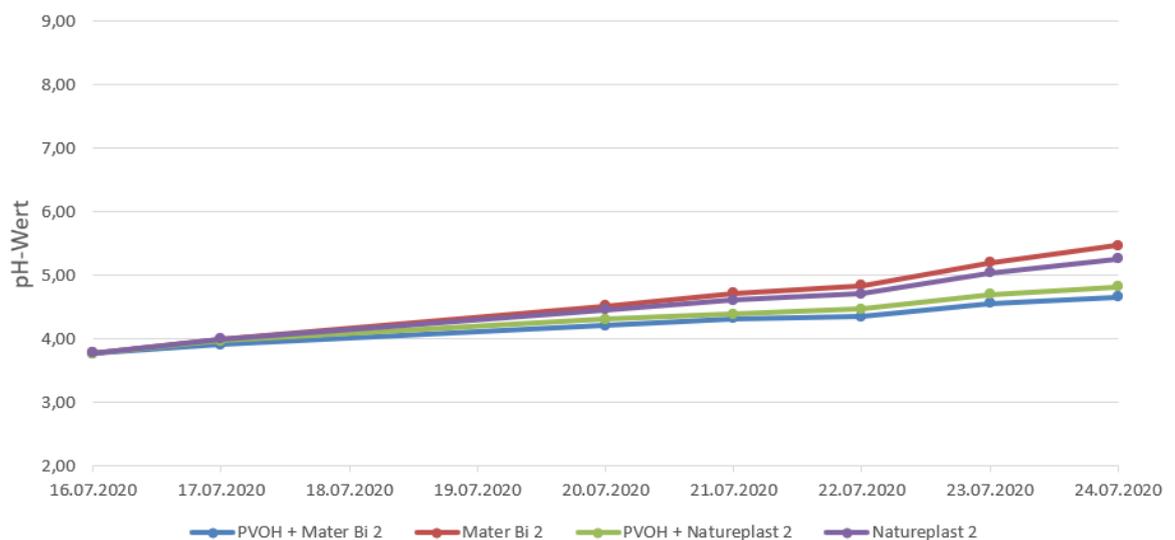


Abbildung 33: pH-Werte der Mikroorganismenlösung eMB : Wasser = 1 : 1

Green Packaging – abbaubare Polymersysteme

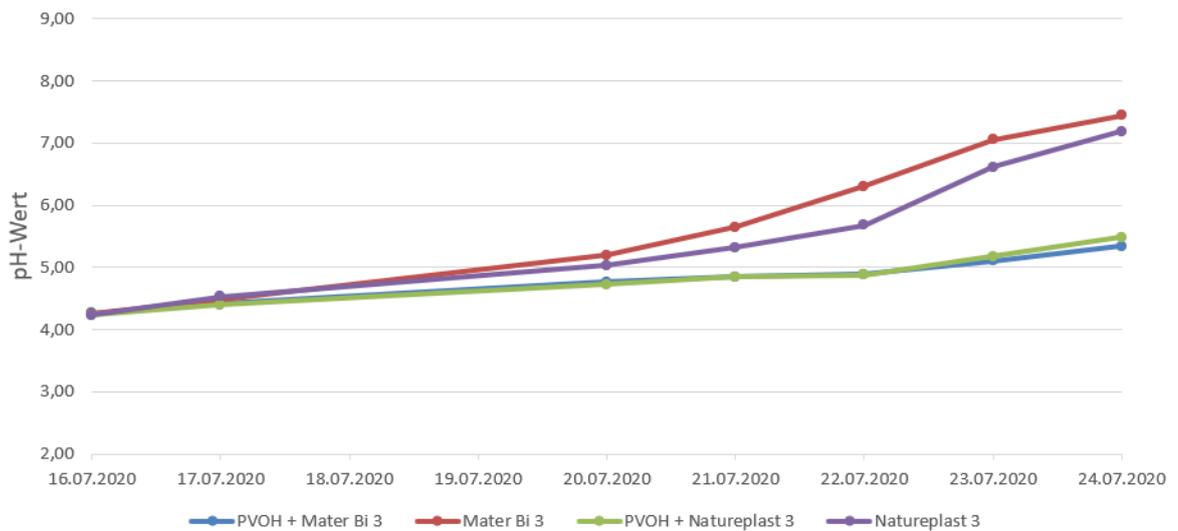


Abbildung 34: pH-Werte der Mikroorganismenlösung eMB : Wasser = 1 : 9

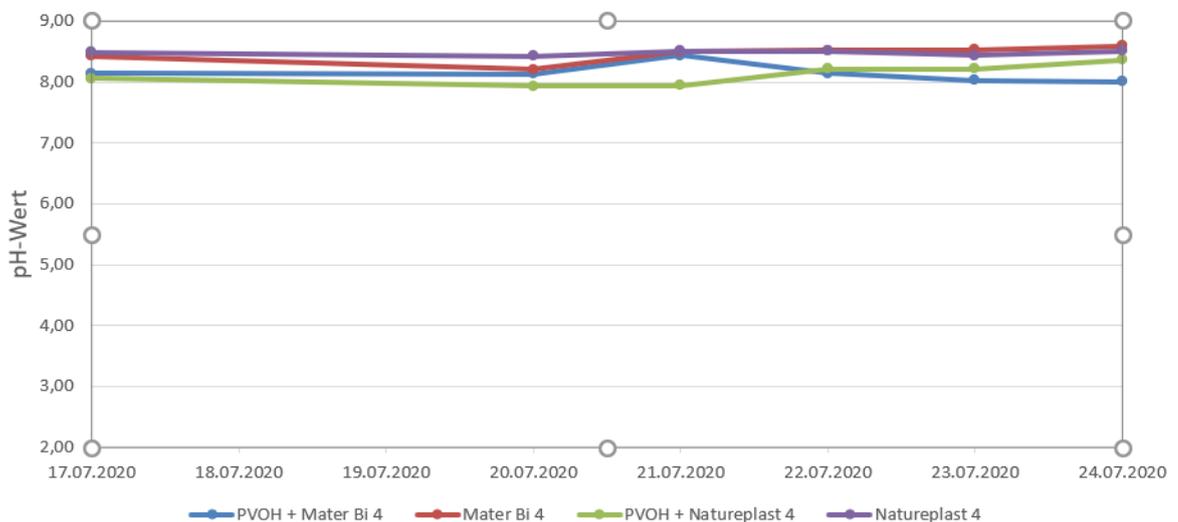


Abbildung 35: pH-Werte der Mikroorganismenlösung eMB : Wasser = 0 : 1

Die Mischungen, die Mikroorganismen enthalten, weisen zu Beginn einen optimalen pH-Wert für die Lebewesen auf. Es ist zu beobachten, dass die pH-Werte bei diesen drei Lösungen ständig ansteigen. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die Rahmenbedingungen für die Mikroorganismen nicht optimal gewesen sind und somit ihre Aktivität gesunken ist.

In der Mischung, in welcher am meisten Mikroorganismen vorhanden waren, stieg der pH-Wert am wenigsten (siehe Abbildung 32). Bei der Lösung eMB : Wasser = 1 : 9 stieg der pH-Wert am meisten, wobei Unterschiede bei den einzelnen Folien erkennbar sind (siehe Abbildung 34).

In den Behältern mit Folien, die einen PVOH-Anteil haben, stieg der pH-Wert weniger stark an. Diese Tendenz ist ebenfalls bei der zweiten Lösung in Abbildung 33 zu sehen. In Abbildung 35 sind die pH-Werte des Wasseransatzes zu sehen. Hierbei ist erkennbar, dass der pH-Wert von Beginn bis zum Ende des Versuches nahezu gleichbleibt. Anhand der Masseverluste kann nun gesagt werden, dass in diesem Fall die pH-Wert-Differenzen keine Auswirkungen hatten. Lediglich bei den Folien, die nur im Wasser waren, gibt es Abweichungen.

Hierzu wären in Zukunft weitere Versuche angebracht, die den Abbau über einen längeren Zeitraum beobachten und die pH-Wert-Änderungen sowie deren Zusammenhang mit dem PVOH-Anteil untersuchen.

5.2 Verfahren zur Eigenschaftsbestimmung

Um wesentliche Eigenschaften der Werkstoffe bestimmen und diese vergleichen zu können, wurden Zugversuche und DSC-Messungen durchgeführt.

5.2.1 Zugversuche nach ISO 527

5.2.1.1 Grundlagen zu den Zugversuchen

Der Zugversuch ist ein standardisiertes Verfahren, um bestimmte Eigenschaften, wie die Zugfestigkeit oder die Bruchdehnung eines Werkstoffes, zu bestimmen. Dabei werden Proben, die einer bestimmten Norm entsprechen müssen und einen definierten Querschnitt haben, geprüft. Die Proben werden mit gleichbleibender Geschwindigkeit gedehnt, bis sie brechen. Hierbei werden die Kraft und die Probenverlängerung gemessen.⁴³ Die Zugfestigkeit beschreibt die größte Spannung bezogen auf den Ausgangsquerschnitt, welcher eine Probe ausgesetzt ist. Die Bruchdehnung gibt die Dehnung an, die nach dem Bruch einer Probe bleibt.⁴⁴

⁴³ Vgl. Agerer, 2009.

⁴⁴ Vgl. Höfler, 2020.

5.2.1.2 Durchführung:

Es wurden aus allen Folien jeweils fünf normgerechte Prüfkörper gestanzt. Diese wurden zwischen zwei Klemmen der Zugprüfmaschine „Zwick Universalprüfmaschine 1kN“ (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, DE) befestigt, wie in Abbildung 36 zu sehen ist. Mit gleichleibender Geschwindigkeit wurden die Proben nach oben hin gedehnt, bis sie rissen. Dabei wurde mittels Computeraufzeichnung die benötigte Kraft gemessen.



Abbildung 36: Zugprüfmaschine und Prüfkörper

5.2.1.3 Ergebnis und Diskussion:

In Abbildung 37 sind die Mittelwerte der Zugfestigkeiten der fünf Folien dargestellt.

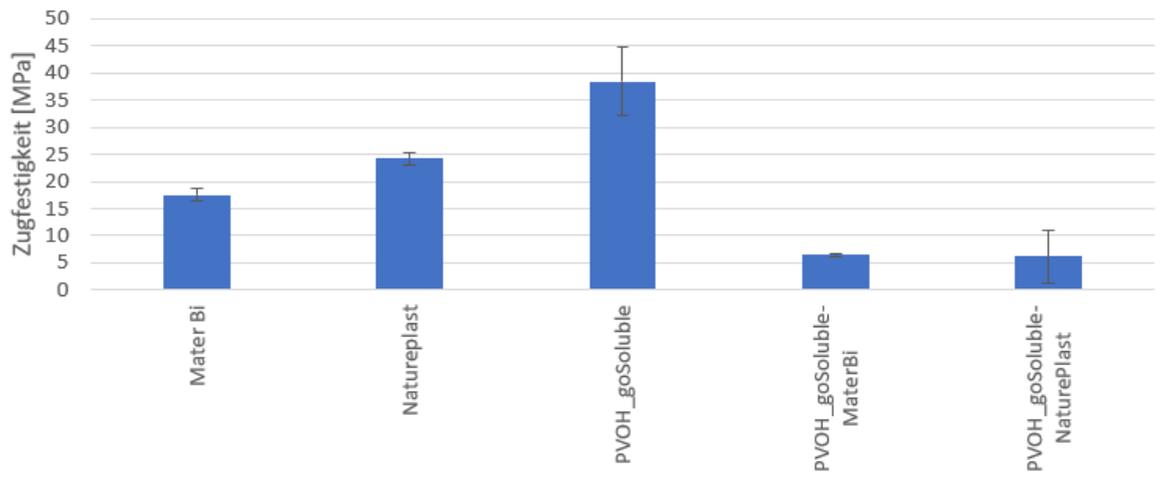


Abbildung 37: Zugfestigkeit der Folien

Die höchste Zugfestigkeit weisen die PVOH-Folien mit rund 38 MPa auf. Der Wert mit 24 MPa ist den PLA-Folien zugeordnet, gefolgt von den Stärke-Folien mit 18 MPa. Die beiden Mischungsfolien haben die geringste Zugfestigkeit mit jeweils ungefähr 6 MPa.

In Abbildung 38 sind die mittleren Bruchdehnungen der jeweiligen Folien zu sehen.

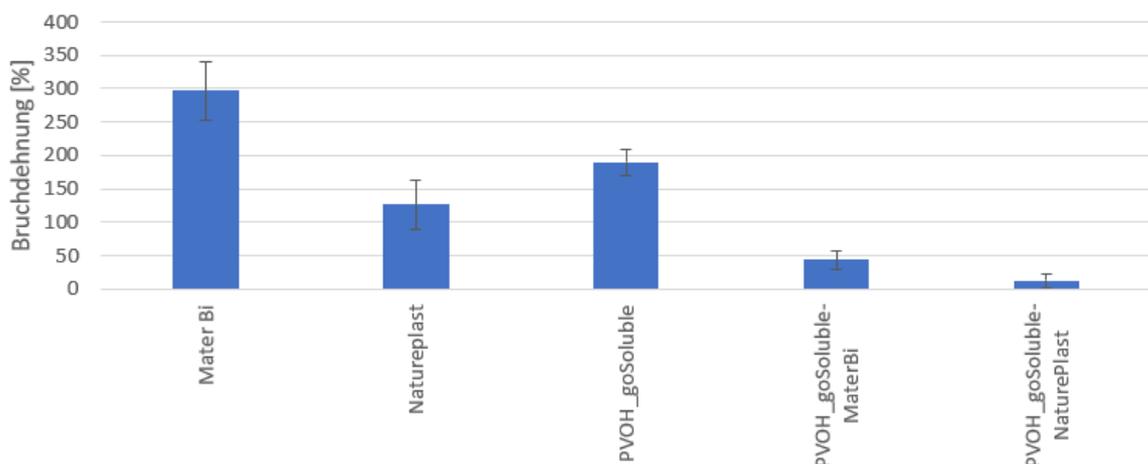


Abbildung 38: Bruchdehnung der Folien

Die Stärke-Folien haben die höchste Bruchdehnung mit rund 300 %. Danach folgen die PVOH-Folien mit 190 % und die PLA-Folien mit 130 %. Wiederum weisen die Mischungsfolien die geringsten Werte auf, hierbei liegt die Bruchdehnung bei den PVOH/Stärke-Folien bei ungefähr 40 % und bei den PVOH/PLA-Folien bei 10 %.

Aus diesen Ergebnissen ist nun abzuleiten, dass die PVOH/PLA-Folien und die PVOH/Stärke-Folien grundsätzlich eine geringere Zugfestigkeit und eine geringere Bruchdehnung haben als die ungemischten Ausgangsmaterialien. Diese Ergebnisse waren nicht zu erwarten gewesen, da reine Stärke-Folien eine geringe Zugfestigkeit und Bruchdehnung besitzen. Stärkekomponenten werden daher mit PVOH vermischt, um diese ungünstigen Eigenschaften zu verbessern.⁴⁵ Grund für diese abweichenden Erkenntnisse könnte sein, dass sich die Produktionsweise der Folien im Knetter oder in der Presse negativ auf die Folien ausgewirkt hat. In weiterer Folge lässt sich daraus schließen, dass diese ungünstigen Eigenschaften den Einsatz dieser Materialien für Verpackungen erschweren, da die dünnen Folien schneller reißen werden. So sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um den Grund für die abweichenden Ergebnisse zu finden und das Problem beheben zu können.

⁴⁵ Vgl. Aguirre-Loredo u.a., 2020.

5.2.2 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

5.2.2.1 Grundlagen zur DSC

Die Dynamische Differenzkalorimetrie ist eine Methode, um das thermische Verhalten eines Materials zu analysieren. Dabei werden eine Probe und eine Referenzprobe gemeinsam unter kontrollierten Temperaturbedingungen erhitzt und abgekühlt, wobei die Differenzen der Wärmeströme gemessen werden (siehe Abbildung 39). Daraus können Phasenänderungen, wie das Schmelzen oder spezifische Wärmekapazitäten, bestimmt werden. Weiters können kinetische Untersuchungen angestellt und Glasübergangstemperaturen und die Kristallinität ermittelt werden.⁴⁶

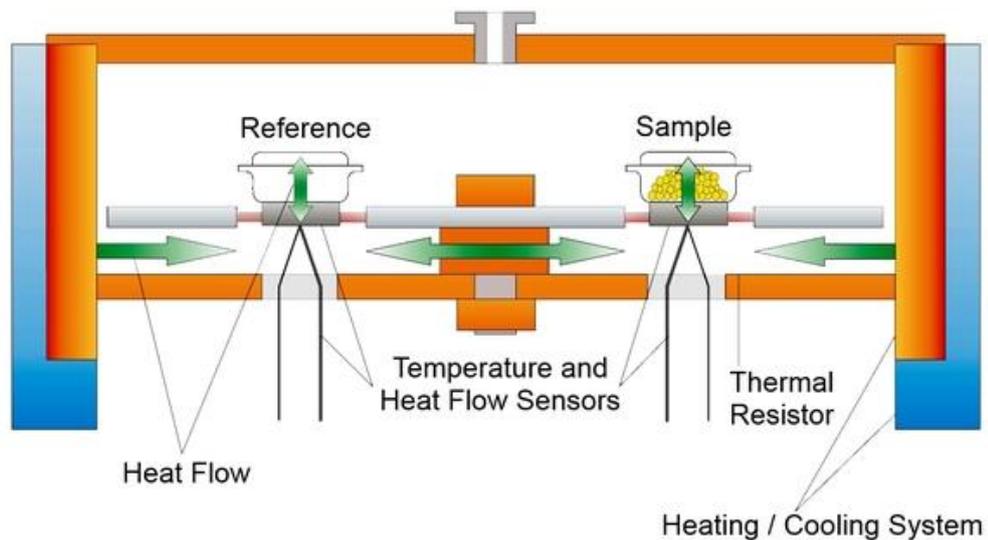


Abbildung 39: Schematische Funktionsweise der DSC

5.2.2.2 Durchführung:

Die Folien wurden vor und nach den Abbaubarkeitsversuchen untersucht. Da die Ergebnisse der vier Mikroorganismenlösungen nahezu gleich waren, wurden nicht alle Folien nach den Abbaubarkeitsversuchen einer DSC-Messung unterzogen. Es wurden kleine Proben aus den Folien geschnitten und abgewogen. Danach kamen sie in gelochte Tiegel, die daraufhin in die DSC „Mettler Toledo DSC 823e“ (Mettler-Toledo GmbH, Wien, AT) gegeben wurden. Hierbei wurden sie unter Stickstoffatmosphäre mit einer Aufheizrate von 10 K/min von 0 auf 250 °C erhitzt, wieder abgekühlt und wieder erhitzt.

⁴⁶ Vgl. Dietze, 2020.

5.2.2.3 Ergebnis und Diskussion:

In folgendem Abschnitt werden die Folien vor und nach den Abbaubarkeitsversuchen verglichen. Dazu sind charakteristische Kennwerte der Schmelzkurven in den Tabellen 2-4 ersichtlich. Die Abbildungen der DSC-Kurven und Auswertungen befinden sich im Anhang.

Folie	Beginn des Schmelzvorganges [°C]	Ende des Schmelzvorganges [°C]	Schmelzenthalpie [Jg ⁻¹]
PVOH	146	189	-13
PLA	146	158	-23
Stärke	166	174	-8
PVOH/PLA	154	185	-7
PVOH/Stärke	140	153	-9

Tabelle 2: Schmelzkurveninformationen vor den Versuchen

Folie	Beginn des Schmelzvorganges [°C]	Ende des Schmelzvorganges [°C]	Schmelzenthalpie [mJ]
Stärke	170	177	-7
PLA	148	160	-23
PVOH/Stärke	DSC-Messung konnte nicht durchgeführt werden, da zu wenig Material nach der Kompostierung noch vorhanden war.		
PVOH/PLA			

Tabelle 3: Schmelzkurveninformationen nach der Kompostierung

Folie	Beginn des Schmelzvorganges [°C]	Ende des Schmelzvorganges [°C]	Schmelzenthalpie [mJ]
Stärke	165	174	-9
PLA	146	160	-23
PVOH/Stärke	145	157	-4
PVOH/PLA	135	152	-9

Tabelle 4: Schmelzkurveninformationen nach den Abbaubarkeitsversuchen in den Mikroorganismenlösungen

Beim Vergleich der DSC-Kurven der Folien nach der Kompostierung ist erkennbar, dass die Messergebnisse sehr ähnlich denen der Folien vor der Kompostierung sind. So ist sowohl bei der Stärke-Folie als auch bei der PLA-Folie zu sehen, dass die Schmelzkurve nur leicht verschoben ist. Auch die Energie, die benötigt wird, um die Materialien aufzuschmelzen, hat sich nicht verändert.

Wie in Tabelle 3 angegeben, konnten keine DSC-Messungen bei der PVOH/Stärke-Folie und der PVOH/PLA-Folie durchgeführt werden, da zu wenig Material nach der Kompostierung übrig geblieben war.

Bei den Folien, die in den Mikroorganismenlösungen gewesen sind, sind in Tabelle 4 Unterschiede bei den DSC-Kurven sichtbar. Die Stärke-Folien und die PLA-Folien weisen nahezu keine Abweichungen bei den Kurvenverläufen verglichen mit den Ausgangskurven auf. Hierbei sind die Werte für den Beginn und das Ende des Schmelzvorganges, sowie die Schmelzenthalpie fast identisch, wie in den Tabellen 2 und 4 zu sehen ist. Jedoch sind die Kurven der Folien, in denen PVOH enthalten ist, sehr unterschiedlich zu den Ausgangskurven. Der gesamte Kurvenverlauf ist graphisch dem Anhang entnehmbar, durch die Kennwerte der Schmelzkurven sind die Unterschiede grundsätzlich erkennbar. So fängt die PVOH/PLA-Folie schon um rund 20 °C früher zu schmelzen an, als vor den Versuchen und der Schmelzvorgang endet sogar rund 30 °C früher. Weiters ist vor allem bei der PVOH/Stärke-Folie zu erkennen, dass viel weniger Energie benötigt worden ist, um diese Folie nach dem Versuch aufzuschmelzen.

Aus den DSC-Messungen ist somit erkennbar, dass die kurze Zeit der Kompostierung sich noch nicht merklich auf die thermischen Eigenschaften der Stärke-Folie und der PLA-Folie ausgewirkt hat.

Dies gilt für diese beiden Folien ebenfalls unter Bedingungen in den Mikroorganismenlösungen. Jedoch weichen die Ergebnisse der PVOH/Stärke-Folie und der PVOH/PLA-Folie stark ab. Dies kann wieder darauf zurückzuführen sein, dass sich der PVOH-Anteil aus den Folien sehr rasch gelöst hat und dies somit diese Änderung der DSC-Kurve beim Rest der Folie bedingt hat.

6 Zusammenfassung

Aufgrund der Vielzahl an Umweltproblemen, die durch konventionelle Kunststoffe hervorgerufen werden, gewinnen Biopolymere immer mehr an Wichtigkeit. So kommen sie häufig in Verpackungen zum Einsatz, um den entstehenden Kunststoffmüll zu reduzieren. Der neue Trend, vor allem im Verpackungssektor auf umweltfreundliche Alternativen zu setzen, hat nun den Begriff „Green Packaging“ geprägt.

Polyvinylalkohol wird wegen seiner günstigen Eigenschaften in verschiedenen Bereichen verwendet. Wegen seiner Wasserlöslichkeit wird er häufig auch im Verpackungssektor eingesetzt. Stärke ist ein nachwachsender Rohstoff, der kostengünstig produziert werden kann und der vor allem als Blendkomponente zum Einsatz kommt. Polylactid ist ein aus Milchsäure synthetisiertes Biopolymer, das wegen seiner Kratzfestigkeit und Transparenz als Verpackungsmaterial verwendet wird. Sowohl Stärkepolymere als auch Polylactide sind wegen ihrer Kompostierbarkeit von großer Bedeutung für umweltfreundliche und nachhaltige Verpackungen.

Nach den Abbaubarkeitsversuchen mit diesen drei Materialien kann zusammengefasst werden, dass der Abbau dieser kompostierbaren Materialien durch Hinzugabe von Polyvinylalkohol beschleunigt wird. Diese Eigenschaft ist für die Herstellung von abbaubaren Folien sehr wichtig, da der anfallende Verpackungsmüll schnell kompostiert werden kann. Anhand der Zugversuche kann gesagt werden, dass die Folien aus gemischten Materialien eine im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien geringere Zugfestigkeit und Bruchdehnung haben. Dies ist für den Einsatz von Verpackungen nicht von Vorteil, weshalb eine Änderung in der Produktion notwendig sein wird, um diese Eigenschaften zu verbessern.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass von diesen Versuchen ausgehend die verwendeten Folien aufgrund ihrer Abbaubarkeit großes Potenzial für den Einsatz im „Green Packaging-Sektor“ haben. Weiterführend gibt es jedoch noch einige Fragen zu klären. Zukünftig sollte untersucht werden, ob Polyvinylalkohol bei der Kompostierung wirklich vollständig abgebaut wird oder ob sich Bestandteile in der Umgebung anreichern.

Diesbezüglich stellt sich die Frage, ob das Vorhandensein dieser Partikel schädlich für die Umwelt sein könnte. Weiters sollte untersucht werden, ob durch eine Änderung des Verhältnisses von Stärke beziehungsweise Polylactid zu Polyvinylalkohol oder durch eine Änderung im Produktionsverlauf bessere Eigenschaften der Folien erzielt werden können.

7 Literaturverzeichnis

Abou-Kandil, Ahmed u.a.: Eco-friendly polymer composites for green packaging: Future vision and challenges. 07.05.2019.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836818335959> [Zugriff: 13.08.2020].

Agerer, Markus Sebastian: Der Zugversuch. 2009. <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/metall/24-zugversuch> [Zugriff: 11.10.2020].

Aguirre-Loredo, Rocio Yaneli u.a.: Effect of polyvinyl alcohol on the physicochemical properties of biodegradable starch films. 01.01.2020.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058419308247> [Zugriff: 29.10.2020].

Antwerpes, Franz: Mesophilie. 2018. <https://flexikon.doccheck.com/de/Mesophilie> [Zugriff: 03.01.2021].

Antwerpes, Franz: Thermophil. 2018. <https://flexikon.doccheck.com/de/Thermophil> [Zugriff: 03.01.2021].

Behr, Arno/ Seidensticker, Thomas: Einführung in die Chemie nachwachsender Rohstoffe. Vorkommen, Konversion, Verwendung. Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 2018.

Cord-Landwehr, Klaus/ Kranert, Martin: Einführung in die Abfallwirtschaft. 4. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2010.

Dalla Rosa, Marco u.a.: Biodegradable polymers for food packaging: a review. 18.07.2008. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224408002185> [Zugriff: 13.08.2020].

Dietze, Matthias: Dynamische Differenzkalorimetrie. <https://www.fh-kiel.de/index.php?id=7501&L=1> [Zugriff: 28.10.2020].

Domininghaus, Hans u.a.: Domininghaus – Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen. 7. Auflage. Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 2008.

- Endres, Hans-Josef/ Siebert-Raths Andrea: Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Carl Hanser Verlag, 2009.
- Han, Jia-Wie u.a.: Food Packaging: A Comprehensive Review and Future Trends. 15.05.2018. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1541-4337.12343> [Zugriff: 13.08.2020].
- Höfler, Andreas: Zugversuch. 2020. <https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/werkstoffpruefung/zugversuch/> [Zugriff: 11.10.2020].
- Kämpfer, Peter/ Weißenfels, Walter. Biologische Behandlung organischer Abfälle. Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 2001.
- Koltzenburg, Sebastian/ Maskos, Michael/ Nuyken, Oskar: Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Spektrum Verlag, 2014.
- Zhang, Guirong/ Zhao, Zongjian: Green Packaging Management of Logistics Enterprises. 16.03.2012. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212001782> [Zugriff: 27.10.2020].

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kunststoffabfälle in der EU.....	8
Abbildung 2: Einteilung von Biopolymeren	9
Abbildung 3: Einteilung von Kunststoffen	11
Abbildung 4: Struktur von Kunststoffen	13
Abbildung 5: Polymerisation am Beispiel von Polyethen.....	14
Abbildung 6: Polyaddition am Beispiel von Polyurethan	14
Abbildung 7: Polykondensation am Beispiel eines Carbonsäureamids.....	15
Abbildung 8: Strukturformel der Polyvinyle	17
Abbildung 9: Polyvinylalkohol dargestellt mittels Molekülbausteinen	17
Abbildung 10: Keto-Enol-Tautomerie von Acetaldehyd und Vinylalkohol.....	18
Abbildung 11: Wasserlöslichkeit von PVOH	19
Abbildung 12: Struktur der Amylose	22
Abbildung 13: Struktur des Amylopektins	23
Abbildung 14: Stärke dargestellt mittels Molekülbausteinen	23
Abbildung 15: Vergleich der Mengen an Pflanzenrohstoffen und daraus	24
Abbildung 16: Verwendungsverhältnis von nativer Stärke, modifizierter Stärke und Verzuckerungsprodukten	26
Abbildung 17: Verwendung von Stärke in der EU 2018	26
Abbildung 18: Gegenüberstellung L-Milchsäure und D-Milchsäure	28
Abbildung 19: Syntheseweg der Polymilchsäure.....	29
Abbildung 20: Polylactid dargestellt mittels Molekülbausteinen	29
Abbildung 21: Temperaturverlauf während einer Kompostierung.....	33
Abbildung 22: Energiebilanz des aeroben Glucoseabbaus.....	36
Abbildung 23: Mikrobieller Stoffabbau	36
Abbildung 24: Geknetete Materialien (A: PVOH/PLA, B: Stärke, C: PLA, D: PVOH/Stärke)	39
Abbildung 25: Gepresste Folien (A: Stärke, B: PLA, C: PVOH/Stärke, D: PVOH/Biomüllbeutel, E: PVOH, F: PVOH/PLA)	40
Abbildung 26: Kompost und drei zur Kompostierung vorbereitete Folien	41
Abbildung 27: Masseverlust der Folien im Kompost.....	42

Abbildung 28: Vergleich der Folien vor und nach der Kompostierung (A: Stärke-Folie vorher, B: Stärke-Folie nachher).....	43
Abbildung 29: Vergleich der Folien vor und nach der Kompostierung (C: PVOH/Stärke-Folie vorher, D: PVOH/Stärke-Folie nachher).....	44
Abbildung 30: Mittelwerte der Temperatur und der pH-Werte beider Komposte	44
Abbildung 31: Masseverlust der Folien in den Flüssigkeitsmischungen	47
Abbildung 32: pH-Werte der Mikroorganismenlösung eMB : Wasser = 9 : 1	48
Abbildung 33: pH-Werte der Mikroorganismenlösung eMB : Wasser = 1 : 1	48
Abbildung 34: pH-Werte der Mikroorganismenlösung eMB : Wasser = 1 : 9	49
Abbildung 35: pH-Werte der Mikroorganismenlösung eMB : Wasser = 0 : 1	49
Abbildung 36: Zugprüfmaschine und Prüfkörper	51
Abbildung 37: Zugfestigkeit der Folien	52
Abbildung 38: Bruchdehnung der Folien	52
Abbildung 39: Schematische Funktionsweise der DSC.....	54

Abbildungsverzeichnis inklusive Quellenangaben:

Abbildung 1: European Commission: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions. A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. 16.01.2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0028&from=EN> [Zugriff: 18.08.2020].

Abbildung 2: Endres, Hans-Josef/ Siebert-Raths Andrea: Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Carl Hanser Verlag, 2009, Seite 6.

Abbildung 3: Domininghaus, Hans u.a.: Domininghaus – Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen. 7. Auflage. Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 2008, Seite 4.

Abbildung 4: Universität Bayreuth: Kunststoffe – neuere Entwicklungen. 19.09.2019. http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/kunststoffe1/neuere_entwickl.htm [Zugriff: 22.08.2020].

Abbildung 5: Kratzert, Mirjam: Herstellung von Kunststoffen. Polymerisation. 2000. <https://kirste.userpage.fu-berlin.de/chemistry/kunststoffe/pmerisat.htm> [Zugriff: 22.08.2020].

Abbildung 6: Jagemann, Kay-Uwe: Synthetische Makromoleküle. <http://www.jagemann-net.de/makromolekuele/makromolekuele.php> [Zugriff: 22.08.2020].

Abbildung 7: Jagemann, Kay-Uwe: Synthetische Makromoleküle. <http://www.jagemann-net.de/makromolekuele/makromolekuele.php> [Zugriff: 22.08.2020].

Abbildung 8: Endres, Hans-, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Carl Hanser Verlag, 2009 Josef/ Siebert-Raths Andrea: Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marksituation, Seite 154.

Abbildung 9: Eigenaufnahme

Abbildung 10: Flad, Wolfgang: Keto-Enol-Tauomerie. <https://www.chf.de/eduthek/projektarbeit-iodierung-carbonylverbindungen.html> [Zugriff: 27.10.2020].

Abbildung 11: Endres, Hans-Josef/ Siebert-Raths Andrea: Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marksituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. München: Carl Hanser Verlag, 2009, Seite 179.

Abbildung 12: Helmich, Ulrich: Amylose. 2020. <http://www.u-helmich.de/bio/cytologie/02/021/Kohlenhydrate/Kohlenhydrate-0611.html> [Zugriff: 04.09.2020].

Abbildung 13: Helmich, Ulrich: Amylopektin. 2020. <http://www.u-helmich.de/bio/cytologie/02/021/Kohlenhydrate/Kohlenhydrate-0612.html> [Zugriff: 04.09.2020].

Abbildung 14: Eigenaufnahme

Abbildung 15: Starcheurope: <https://starch.eu/the-european-starch-industry/3-european-starch-market-figures-2017-2/> [Zugriff: 25.10.2020].

Abbildung 16: Starcheurope: <https://starch.eu/the-european-starch-industry/6-european-starch-market-figures-2017-2/> [Zugriff: 26.10.2020].

Abbildung 17: Starcheurope: <https://starch.eu/the-european-starch-industry/5-european-starch-market-figures-2017-2/> [Zugriff: 25.10.2020].

Abbildung 18: Zhang, Yixing: Optically pure D (-) lactic acid biosynthesis from diverse renewable biomass: microbial strain development and bioprocess analysis. 2015. [https://www.semanticscholar.org/paper/OPTICALLY-PURE-D-\(-\)-LACTIC-ACID-BIOSYNTHESIS-FROM-Zhang/c60f64b754a9db374dd1c12e5a7f7474afb57dd9](https://www.semanticscholar.org/paper/OPTICALLY-PURE-D-(-)-LACTIC-ACID-BIOSYNTHESIS-FROM-Zhang/c60f64b754a9db374dd1c12e5a7f7474afb57dd9) [Zugriff: 27.10.2020].

Abbildung 19: Behr, Arno/ Seidensticker, Thomas: Einführung in die Chemie nachwachsender Rohstoffe. Vorkommen, Konversion, Verwendung. Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 2018, Seite 330.

Abbildung 20: Eigenaufnahme

Abbildung 21: LogiDataTech: Kompostierung. 2020. <https://logidatatech.com/de/anwendungen/kompostierung> [Zugriff: 10.09.2020].

Abbildung 22: Cord-Landwehr, Klaus/ Kranert, Martin: Einführung in die Abfallwirtschaft. 4. Auflage. Vieweg+Teubner Verlag, 2010, Seite 189.

Abbildung 23: Kämpfer, Peter/ Weißenfels, Walter. Biologische Behandlung organischer Abfälle. Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 2001. Seite 12.

Abbildungen 24 – 38: Eigenaufnahmen

Abbildung 39: Eck, Christian: Differential Scanning Calorimetry (DSC). <https://www.skz.de/en/research/technicalfacilities/pruefverfahren1/thermische-eigenschaften1/4856.Differential-Scanning-Calorimetry-DSC.html> [Zugriff: 28.10.2020].

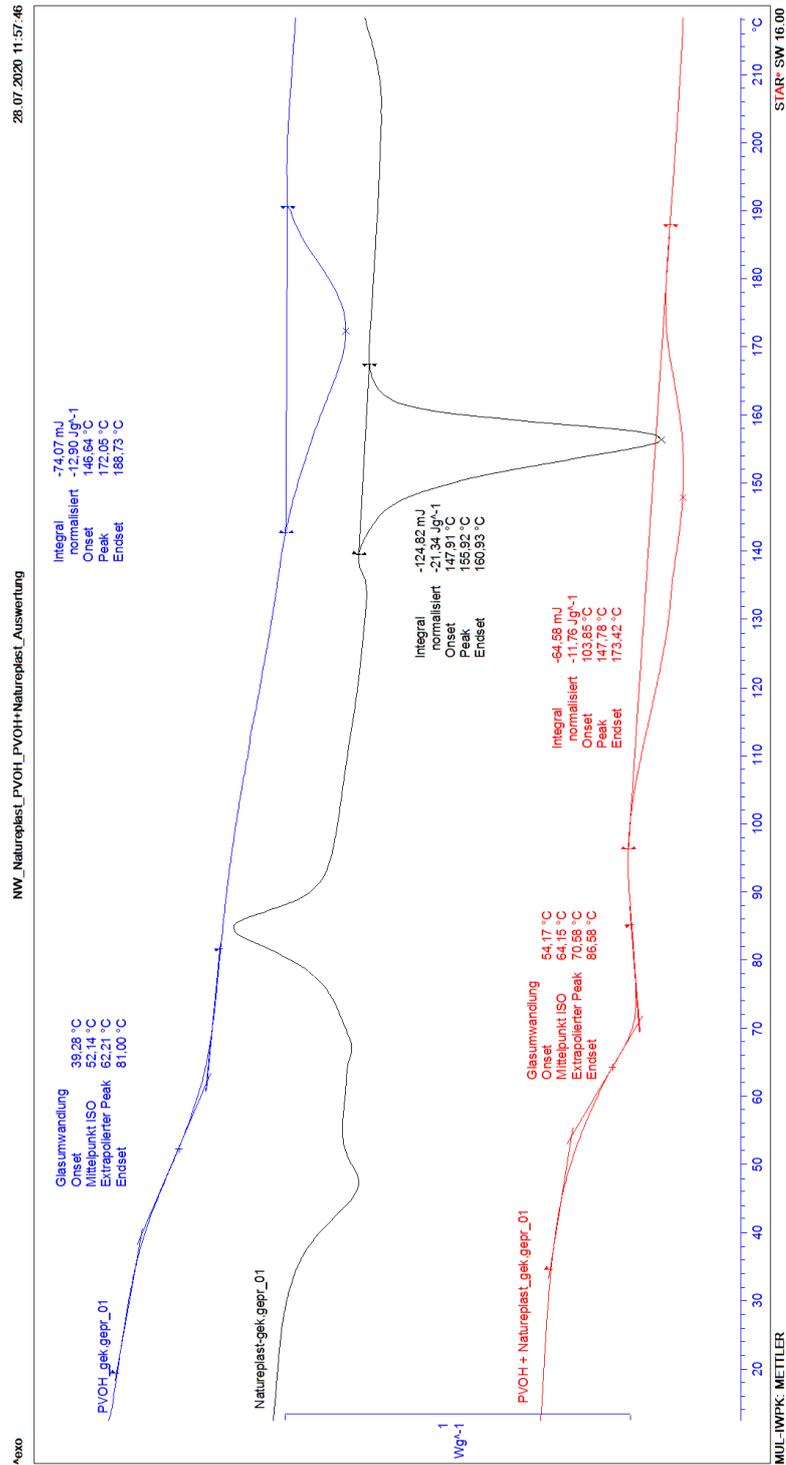
9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kombinationen der verschiedenen Folien mit den einzelnen Flüssigkeitsmischungen	46
Tabelle 2: Schmelzkurveninformationen vor den Versuchen	55
Tabelle 3: Schmelzkurveninformationen nach der Kompostierung.....	55
Tabelle 4: Schmelzkurveninformationen nach den Abbaubarkeitsversuchen in den Mikroorganismenlösungen.....	55

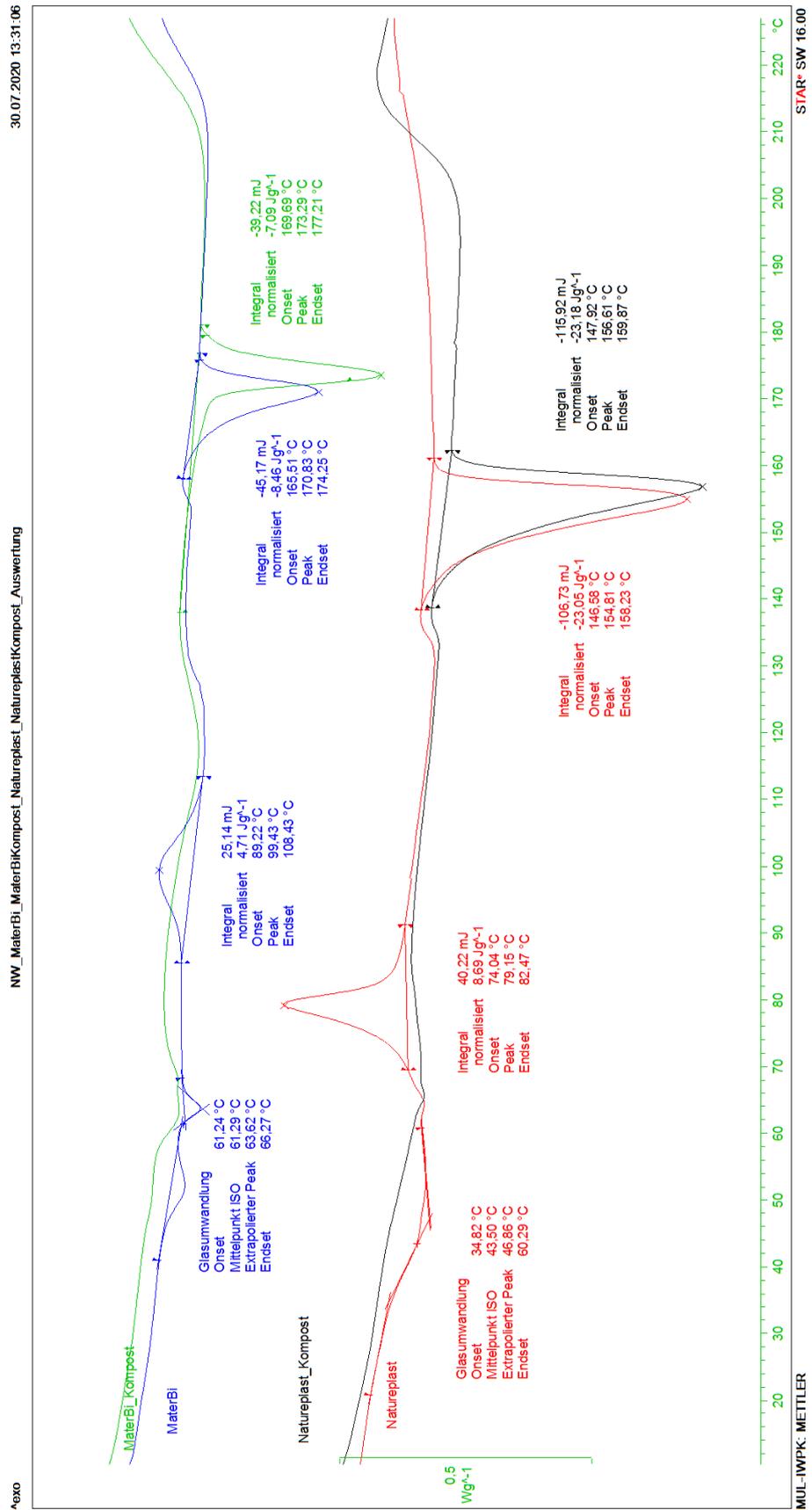
10 Anhang

Die korrekten Bezeichnungen der Folien, die hier angeführt werden, sind in Kapitel 5.1.1 zu finden.

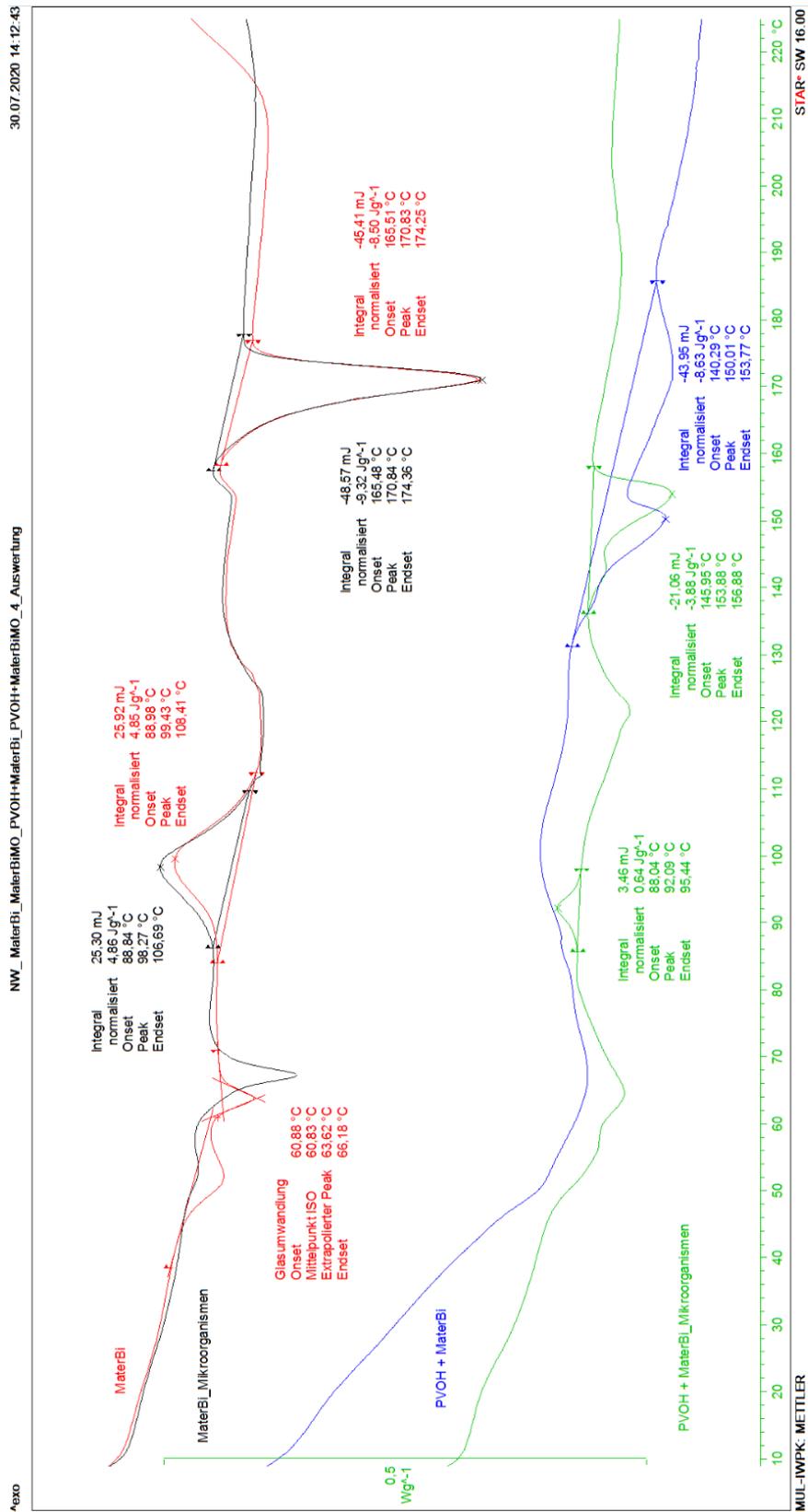
DSC-Vergleich der PVOH-Folie, der PLA-Folie und der PVOH/PLA-Folie vor den Versuchen



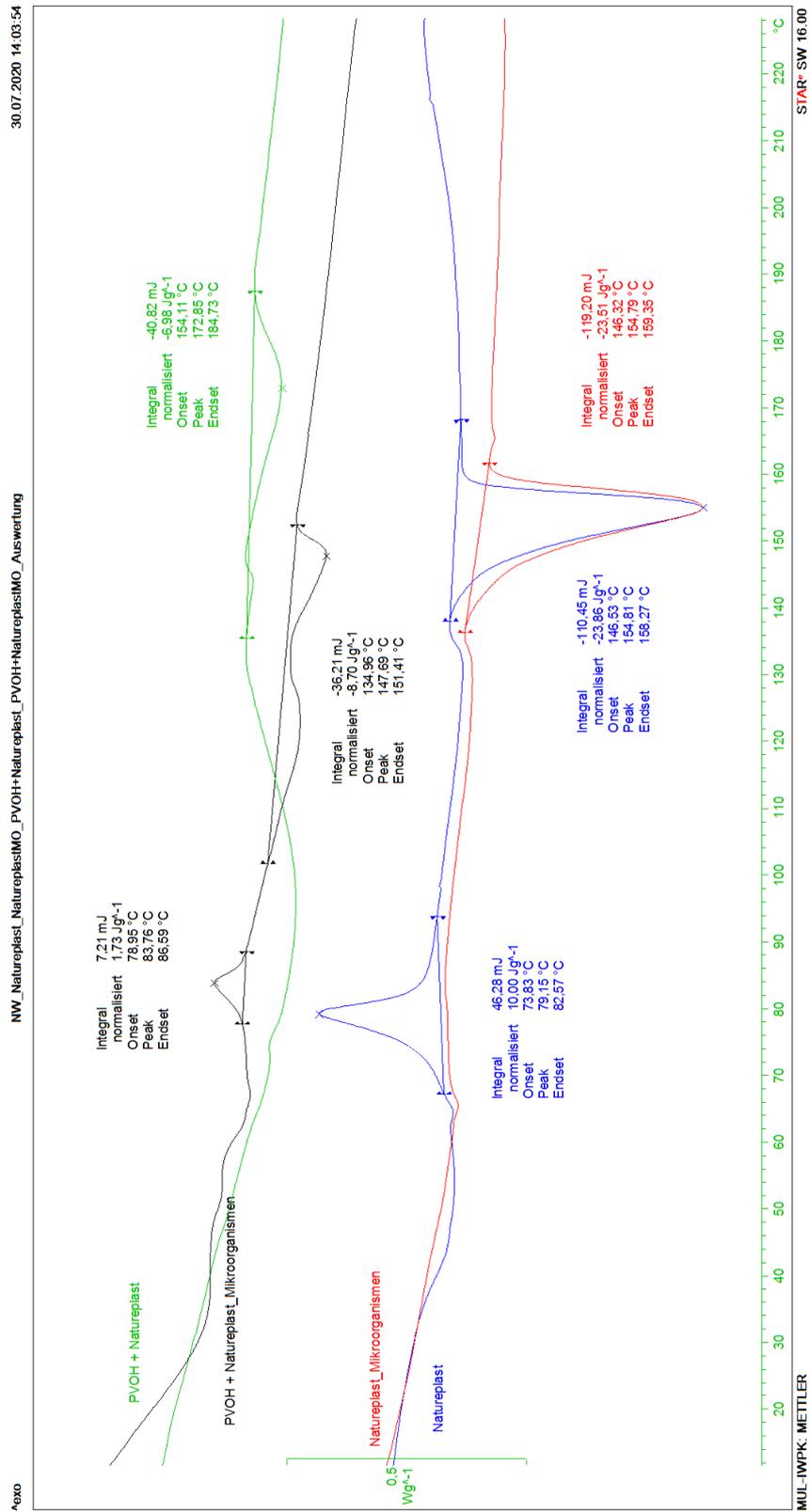
DSC-Vergleich der Stärke-Folie und der PLA-Folie vor und nach der Kompostierung



DSC-Vergleich der Stärke-Folie und der PVOH/Stärke-Folie vor und nach dem Abbaubarkeitsversuch mit den Mikroorganismenlösungen



DSC-Vergleich der PLA-Folie und der PVOH/PLA-Folie vor und nach dem Abbaubarkeitsversuch mit den Mikroorganismenlösungen



Selbstständigkeitserklärung

Name: Stefanie Mörth

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich diese vorwissenschaftliche Arbeit eigenständig angefertigt und nur die im Literatur- und Abbildungsverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Zustimmung zur Aufstellung in der Schulbibliothek

Ich gebe mein Einverständnis, dass ein Exemplar meiner vorwissenschaftlichen Arbeit in der Schulbibliothek meiner Schule aufgestellt wird.

Ort, Datum

Unterschrift