



Seminararbeit

Thema: **Biokunststoffe- Idealtypus der Petrochemie?**

Zusätzlich Kurztitel (Nur falls das Thema mehr als 3 Zeilen zu je 44 Zeichen lang ist):

Verfasser/in: David Lambrich

Leitfach: Biologie

Seminarkürzel: 2W_b

Lehrkraft: OStRin C.Jäschke

Abgabe der schriftlichen Arbeit am:

[Datumstempel Sekretariat]

Präsentation mit Prüfungsgespräch am:

____.____. 20____

Bewertung	Note	in Worten	Punkte		Punkte
schriftliche Arbeit				x 3	
Abschlusspräsentation				x 1	
Summe					
Gesamtleistung nach § 29 (7) GSO = Summe : 2 (gerundet)					

Unterschrift der Lehrkraft



Abbildung 1: Biokunststoffe Karikatur (Deutsche Umwelthilfe 2020)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	4
2	Kunststoffe Aufbau	5
2.1	<i>Primärstruktur</i>	5
2.2	<i>Sekundärstruktur</i>	5
2.3	<i>Tertiär- /Quartärstruktur</i>	6
3	Klasseneinteilung nach Struktur-Eigenschafts-Prinzip	6
3.1	<i>Thermoplaste</i>	6
3.2	<i>Duroplaste</i>	7
3.3	<i>Elastomere</i>	7
4	Allgemeines über Kunststoffe	9
4.1	<i>Geschichte der Kunststoffe</i>	9
4.2	<i>Einsatzgebiete und industriell quantitatives Ausmaß im globalen Vergleich</i>	10
5	Persistenz der Kunststoffe	11
5.1	<i>Abiotische Faktoren</i>	11
5.1.1	<i>Photo-Degradation und Ökotoxizität</i>	12
5.2	<i>Biotische Faktoren</i>	12
5.2.1	<i>Biofilm</i>	12
5.2.2	<i>Mikroorganismen</i>	13
6	Zukunftsaussichten der konventionellen Kunststoffe	13
7	Biokunststoffe als Äquivalent	14
7.1	<i>Biokunststoffe Entwicklung</i>	14
7.2	<i>Klassifizierung</i>	15
7.3	<i>Diverse Herstellungsverfahren von Biokunststoffen</i>	16
7.3.1	<i>Polylactid (Polymilchsäure)</i>	16
7.3.2	<i>Polyhydroxyalkanoate</i>	17
7.3.3	<i>Polysaccharide</i>	18
7.4	<i>Eigenschaften und Anwendungen exemplarisch</i>	18
7.4.1	<i>PLA</i>	18

7.4.2	PHA	19
7.4.3	Stärke.....	20
7.5	<i>Biologisches Abbaufahren</i>	20
7.5.1	Abbauprozess	20
7.5.2	Drei Komponenten des Bioabbaus	21
8	Experimentelle Untersuchung der Kompostierbarkeit	22
8.1	<i>Beschleunigte Verwitterung</i>	22
8.2	<i>Versuchsaufbau und allgemeine Prognose</i>	22
8.3	<i>Durchführung</i>	24
8.4	<i>Biokunststoffproben 1-5 und spezifische Prognose</i>	24
8.5	<i>Verlauf und Resultate</i>	26
8.6	<i>Fazit</i>	30
9	Marktsituation der Biokunststoffe	31
10	Greenwashing und ökologische Überschätzung	31
11	Zukunftsaussichten der Biokunststoffe.....	32
12	Schlussbemerkung	33
13	Literaturverzeichnis	34
14	Abbildungsverzeichnis	36
15	Eidesstaatliche Erklärung	38

1 Einleitung und Motivation

Zuallererst stellt sich die Frage, wie der Begriff „Müll“ überhaupt definiert ist. Im klassischen Sinne versteht man unter Abfall bzw. Müll Reststoffe, die bei der Aufbereitung von Rohstoffen, in der Güterproduktion oder im Güterverbrauch anfallen. Außerdem beinhaltet der Begriff unverwertbare, kontaminierte oder verschmutzte Stoffe, die vom Besitzer entsorgt werden (vgl. Spektrum der Wissenschaft 2023). Historisch gesehen sind die aktuelle Dimension des Müllaufkommens und die damit verbundenen Probleme kein Phänomen des letzten Jahrhunderts. Die erste Generation des Mülls in der Steinzeit bestand aus Gegenständen bspw. Werkzeugen, die bis zur absoluten Unbrauchbarkeit verwendet und dann auf eine „Deponie“ platziert wurden. Interessanterweise wurden Tote an denselben Stellen zur Ruhe gelegt. Daraus könnte man schließen, dass Abfall keineswegs als negativ empfunden wurde. Spätestens ab dem Mittelalter hatte sich die Menge an Müll drastisch erhöht, doch vor allem durch die Sesshaftigkeit der Menschen konnten die Abfallmengen nirgends mehr zurückgelassen werden. Das resultierende Gesundheitsrisiko des Mülls führte bekannterweise im Mittelalter zu Seuchen und Krankheiten. Systeme zum Abtransport des Abfalls etablierten sich erst in der frühen Neuzeit und der Industrialisierung. Doch nach einer moderneren Auffassung kommt neben dem beschriebenen stofflichen Abfall auch nichtstofflicher Abfall hinzu, dazu zählen Lärm- und Lichtverschmutzung. Im Laufe der Jahrhunderte entstanden immer wieder neue Arten von Abfall, die häufig neue Entsorgungsschwierigkeiten mit sich brachten. Heutzutage ist Umweltverschmutzung durch Kunststoffe oder im Volksmund „Plastik“ durch Bilder von riesigen Kunststoffinseln oder durch mit Kunststoff bedeckten Stränden eine, wenn nicht die prominenteste ökologische Gefahr. Der weniger bekannte kleine Bruder der Kunststoffe, der durch das zunehmende Umweltbewusstsein mediale und industrielle Aufmerksamkeit erregt, ist der Biokunststoff. Durch dessen Aufschwung sind Werbeversprechen wie „kompostierbar“ oder „aus 100% nachwachsenden Rohstoffen“ omnipräsent und es scheint, als verfüge der Biokunststoff über alle benötigten Gebrauchseigenschaften und verursache keine Entsorgungsschwierigkeiten. Zugegebenermaßen suggeriert das Präfix „Bio“ Fantastisches und hilft das Gewissen der Verbraucher zu reinigen, doch dem Problem des Greenwashings und der mangelnden Aufklärung über die chemische Definition der Biokunststoffe wird in dieser Arbeit begegnet werden. Außerdem werden die Entstehung der (Bio-) Kunststoffe unter einer historischen Perspektive und das

Verhalten der (Bio-)Kunststoffe in der Umwelt vergleichend gegenübergestellt. Die dazugehörige experimentelle Analyse der Kompostierbarkeit der Biokunststoffe stützt sich auf vorausgehende biologisch/ chemische Erklärungen und veranschaulicht den Sachverhalt. Zusätzlich werden eine ökonomische Perspektive und der Aspekt der ökologischen Überschätzung angeführt.

2 Kunststoffe Aufbau

„Kunststoffe sind makromolekulare Verbindungen, die synthetisch oder durch Umwandlung von Naturprodukten entstehen.“ (vgl. Menges et al. 2022).

2.1 Primärstruktur

Kunststoffe sind Kohlenwasserstoffverbindungen und lassen sich in die organische Chemie einordnen. Auf primärer Ebene sind Kunststoffe aus Kohlen- und Wasserstoffatomen bzw. funktionellen Gruppen, die an Kohlenstoffatome angehängt sind, aufgebaut. Diese Kohlenwasserstoffmoleküle sind sogenannte Monomere (=griech. mono „ein, einzel“ und méros „Teil“) und bilden den Grundbaustein aller Kunststoffe. Jedes Monomer verfügt über eine reaktionsfähige Doppelbindung oder eine funktionelle Gruppe. Mögliche Monomere sind zum Beispiel Ethen (s. Abb. 2) oder Vinylchlorid (s. Abb. 3). Die Konstitution eines Monomers beschreibt dessen Aufbau aus Atomen und deren Bindungsverhältnisse. Folglich stellt die Konstitution einen Parameter der Analyse der Eigenschaften dar.

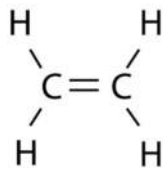


Abbildung 2: Beispiel monomeres Ethen (KRV 2023)

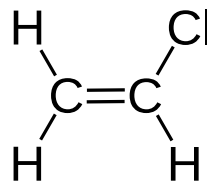


Abbildung 3: monomeres Vinylchlorid (KRV 2023)

2.2 Sekundärstruktur

Auf sekundärer Ebene werden die Monomere durch Synthese zu Polymeren (=griech. poly „viel“ und méros „Teil“) verknüpft, Polymere sind Makromoleküle. Charakteristisch für Makromoleküle ist eine molare Masse über 10.000 u. Außerdem setzen sich Makromoleküle aus bis zu mehreren Hunderttausend Monomeren zusammen. Diese Molekülketten (Polymerstränge) setzen sich aus identischen, sich wiederholenden Bausteinen (Monomeren) zusammen. Die Polymere Polyethen (s. Abb. 4) und Polyvinylchlorid (s. Abb. 5) sind das Produkt der Verknüpfung der Monomere aus Kapitel 2.1.

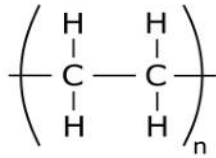


Abbildung 4: Polyethen (Maschinenbau- Wissen 2023)

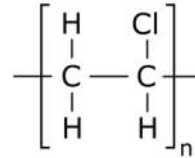


Abbildung 5: Polyvinylchlorid (Maschinenbau-Wissen 2023)

2.3 Tertiär- /Quartärstruktur

Auf tertiärer Ebene sind die Aufbaumöglichkeiten variabel.

Die Tertiärstruktur beschreibt die Topologie, also die Lagebeziehungen der dreidimensionalen Polymerstränge, welche durch die Konstitution und die Art der Synthese (= Verknüpfung der Monomere) bedingt ist. Hierbei muss zwischen vier Bauformen unterschieden werden (s. Abb. 6). Polymerstränge können linear, also ohne Verzweigungen vorliegen. Ebenfalls können die Polymerstränge strauchartig verzweigt, kammartig verzweigt oder verschlauft sein. In diesen drei Fällen wirken zwischen den Makromolekülen schwache physikalische Bindungskräfte. Eine weitere Bauform ist eine intermolekulare, kovalente Verknüpfung der Makromoleküle über Querbrücken (vgl. Menges et al. 2022). Diese Querbrücken befinden sich an ungesättigten Bindungen oder reaktiven Gruppen. Die räumliche Anordnung und der Vernetzungsgrad der Polymerketten sind ursächlich für den Härtegrad, das thermische Verhalten und die Viskosität des Kunststoffprodukts.

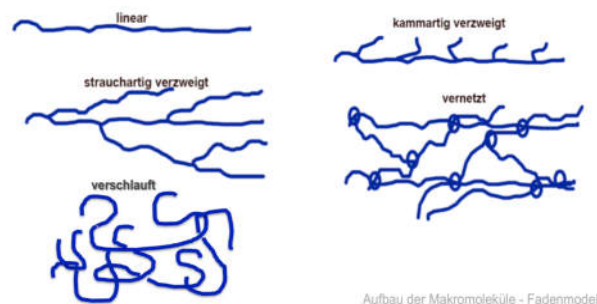


Abbildung 6: Aufbau der Makromoleküle- Fadenmodell (TU Dresden 2016)

3 Klasseneinteilung nach Struktur-Eigenschafts-Prinzip

3.1 Thermoplaste

Thermoplaste (=griech. thermós „warm“, „heiß“ und plássein „bilden, formen“) stellen eine der drei Kunststoffgruppen dar. Hierbei liegen lineare Polymerstränge nahezu unverknüpft nebeneinander (s. Abb. 8). Lediglich schwache physikalische Bindungen halten die Makromoleküle zusammen. Thermoplaste werden in amorph (erweichend)

und teilkristallin (schmelzend) unterteilt. Amorphe Kunststoffe verfügen über eine regellose Struktur und Nahordnung, wohingegen kristalline Thermoplaste über eine streng regelmäßige Struktur und Fernordnung verfügen (s. Abb. 7). Aufgrund der schwachen Vernetzung und des amorphen bis teilkristallinen Aufbau sind Thermoplaste nach Erhitzung reversibel verformbar und löslich. Erhitzung versetzt die Polymerstränge in Schwingung und löst die physikalischen Bindungsverhältnisse temporär. Diese Eigenschaften sind unabdinglich für das Recycling der Kunststoffe und der Grund für den häufigen Gebrauch in Industrie und Alltag. Bekannte Vertreter dieser Gruppe sind PE (Polyethylen), PVC (Polyvinylchlorid), PET (Polyethylenterephthalat), PP (Polypropylen).

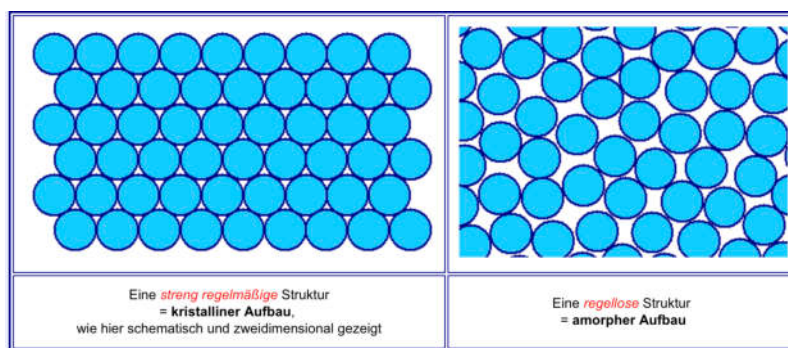


Abbildung 7: Möglichkeiten einer raumfüllenden Anordnung (Technische Fakultät Universität Kiel 2018)

3.2 Duroplaste

Die zweite Kunststoffgruppe beinhaltet die Duroplaste (lat. duro „härten“). Duroplaste sind durch eine Vielzahl an kovalenten Quervernetzungen dreidimensional und engmaschig vernetzt (s. Abb. 8). Es liegen ausschließlich amorphe Strukturen vor. Infolgedessen sind Duroplaste hart, spröde und brechen bei mechanischer Einwirkung. Duroplaste sind nicht reversibel löslich und schmelzbar. Erhitzung sorgt für die Zerstörung der kovalenten Bindungen und damit des Kunststoffes. Die daraus resultierende Hitzeresistenz ist die Ursache für die Verwendung der Duroplaste in Steckdosen, Feuerwehrhelmen und Kabelbahnen. Bekannte Vertreter sind PUR (Polyurethan), Silikone und diverse Harze.

3.3 Elastomere

Die dritte Kunststoffgruppe bilden die Elastomere (griech. elastos „dehnbar“). Elastomere sind durch einige kovalente Quervernetzungen dreidimensional und weitmaschig vernetzt (s. Abb. 8).

Aus thermodynamischer Sicht kehren Elastomere laut dem Entropiesatz¹ (dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik) nach mechanischer Einwirkung (Verringerung der

Entropie) in ihren entropisch bevorzugten Zustand zurück (Polymerknäuel). Hierbei ordnen sich die Atome gemäß einer statistisch begründeten Gauß-Verteilung um das Zentrum des Moleküls an (vgl. Menges et al. 2022). Diese Eigenschaft wird Entropie-Gummielastizität genannt. Bei der Verformung wird keine Energie gespeichert, sondern die am Gummiband verrichtete Arbeit als Wärme abgegeben. Erhitzung der Elastomere sorgt ebenfalls für die Zerstörung der kovalenten Bindungen und somit des Kunststoffes. Elastomere sind weder reversibel schmelzbar noch löslich. Bekannte Vertreter sind Vulkanisate² von Naturkautschuk und synthetischem Kautschuk.

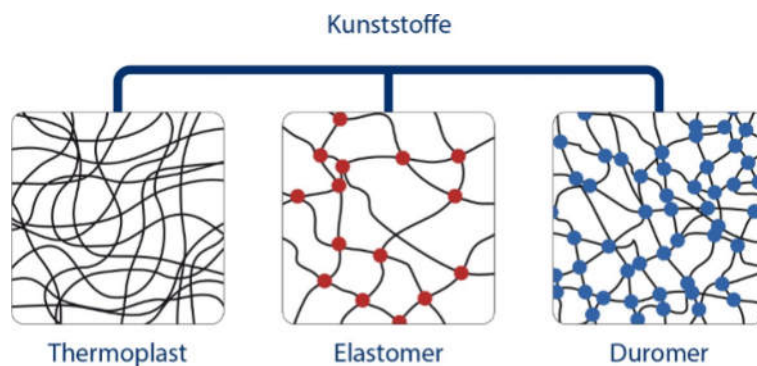


Abbildung 8: Drei Gruppen von Polymeren (Deutsches Kunststoffmuseum 2023)

¹ „Entropiesatz, einer der zentralen Sätze der Thermodynamik und Statistischen Mechanik, dem zufolge die Entropie S eines abgeschlossenen thermodynamischen Systems stets danach strebt, einen Maximalwert einzunehmen, der im vollständigen thermodynamischen Gleichgewicht erreicht wird.“ (Spektrum der Wissenschaft 2023).

² Vulkanisate sind das Brückenprodukt zwischen Thermoplastischen und elastischen Kunststoffen. Klassischerweise werden durch einpolymerisieren von Schwefel kovalente Quervernetzungen geschaffen.

4 Allgemeines über Kunststoffe

Kunststoffe sind durch ihre Vielfältigkeit einer der bedeutendsten, wenn nicht der bedeutendste Werkstoff des letzten Jahrhunderts. Neben ihrer industriellen Bedeutung als profitable und beschäftigungsschaffende Größe fällt Kunststoffen durch die eminente Umweltverschmutzung und dem fossilen Ursprung auch eine ökologische Relevanz zu.

4.1 Geschichte der Kunststoffe

Die Entstehung von Kunststoffen ist eng an das Streben des Menschen nach Naturbeherrschung gekoppelt. Seit jeher wurden Naturstoffe beliebig kombiniert, um Naturmaterialien in ihren Eigenschaften zu übertreffen (vgl. Menges et al. 2022).

Der Chemiker und Physiker Victor Regnault stellte 1838 das erste Polyvinylchlorid her. Währenddessen fokussierte sich Charles Goodyear im Jahre 1839 auf den Prozess der Vulkanisation von Naturkautschuk, um Gummi zu synthetisieren.

Durch diese und gleichwertige Entwicklungen stand die industrielle Produktion der Kunststoffe im 19. Jahrhundert in den Startlöchern, fand aber erst ein Jahrhundert später Relevanz.

Auch neue Erfindungen wie die von den Gebrütern Hyatt im Jahr 1860 gebaute „Stopfmaschine“, die zur Verformung von Kunststoffen gebraucht wurde, trugen zur erweiterten Benutzungsmöglichkeiten von Kunststoff bei. Auch der zeitgleich zunehmende Verbrauch von fossilen Energieträgern, wegen der steigenden Treibstoffnachfrage nach dem Zweiten Weltkrieg, sorgte für Interesse, den in Raffinerien entstehenden Abfall einem Zweck zuzuführen. Als geeigneter Abnehmer für die Reste der Raffinerien erwies sich die Petrochemie, die unter anderem die Kunststoffproduktion, aber auch die Produktion von Lösemitteln und Vorprodukten für die chemische Verarbeitung ausführt. Durch die günstigen Rahmenbedingungen stieg die Kunststoffproduktion und das steigende Angebot an Syntheseprodukten stimulierte einen wirtschaftlichen Aufschwung ab 1950. Dieser wirtschaftliche Aufschwung war branchenübergreifend, denn die Benutzung von Kunststoffen half vielen Unternehmen ihre Kosten zu reduzieren. Kunststoff wurde zum Alltags- und Massengut.

Ölkrise in den Jahren 1973 und 1979 hemmten das Wachstum der Kunststoffindustrie und vermittelten ein erstes, wenn doch eher politisch/ wirtschaftlich motiviertes Bewusstsein für die Schonung fossiler Ressourcen. Gleichermaßen wurde ab den 1980er Jahren Umweltschutz in vielen Bereichen, somit auch der Schutz vor

persistenten (schwer abbaubaren) Stoffen, Teil der politischen Agenda. Im Zentrum der neu aufgestellten Maßnahmen gegen Umweltverschmutzung, stand der „Umweltfeind Nummer Eins“. Damit ist die Schadstoffemission durch Fahrzeuge, die durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe funktionieren (Autos, Flugzeuge, Schiffe u.v.m), gemeint (vgl. Christopher Neumaier 2018). Durch diese Regulatorien musste auch die Petrochemie finanzielle Einbußen verbuchen.

Bis heute ist der Werkstoff Kunststoff für alle Lebensbereiche signifikant und wurde über die letzten Jahrzehnte kontinuierlich chemisch modifiziert, um seine Anwendungen zu verbessern.

4.2 Einsatzgebiete und industriell quantitatives Ausmaß im globalen Vergleich

2023 wird der produzierte Kunststoff gemäß Abbildung 9 verwendet. Dabei ist augenfällig, dass die absolute Mehrheit den Sektoren Bau (26,3%) und Verpackung (31,2%) zufällt, aber auch die Automobilbranche (8,8%) ist spürbar an der Kunststoffnutzung beteiligt. In allen gelisteten Bereichen ist Kunststoff durch seine hoch flexiblen Eigenschaften für verschiedene Anwendungen optimal geeignet, aber auch Objekt der Abhängigkeit, welche aufgrund der endlichen Natur fossiler Rohstoffe und dem Abfallaufkommen durch Kunststoffprodukte kritisch zu betrachten ist.

Beispielsweise hat der Verpackungssektor mit dem Erhalt von Lebensmitteln, während Transport und Lagerung eine schwierige Aufgabe, die sich ökonomisch und praktikabel durch Kunststoffe lösen lässt (vgl. bmbf- Plastik).

In allen Bereichen kombiniert ist PE und PP der häufigste Vertreter der Werkstoffklasse.

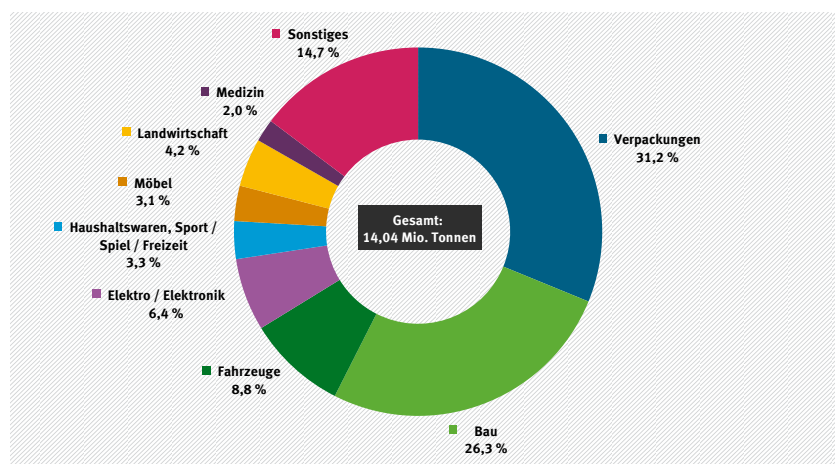


Abbildung 9: Anteil relevanter Branchen an der Verarbeitungsmenge Kunststoffe 2021 (Neuware und Rezyklat) (Umweltbundesamt 2023)

Der Unterschied zwischen der Produktionssteigerung auf globaler und nationaler Ebene ist deutlich. Während europäische Staaten, darunter Deutschland, eine geringe Zunahme verzeichnen, steigt die chinesische und osteuropäische Produktion jährlich um ein Vielfaches (s. Abb. 10).

Die weltweite Kunststoffmenge im Jahr 2021 lag bei 391 Mio. Tonnen und übertrifft seit 1989 die Stahlproduktion quantitativ (vgl. Menges et al. 2022). Außerdem ist die Kunststoffindustrie ein bedeutender Bestandteil des Bruttoinlandsprodukts (97 Milliarden Euro) und des Bruttonationaleinkommen (336.000 Erwerbstätige in 3.510 Unternehmen).

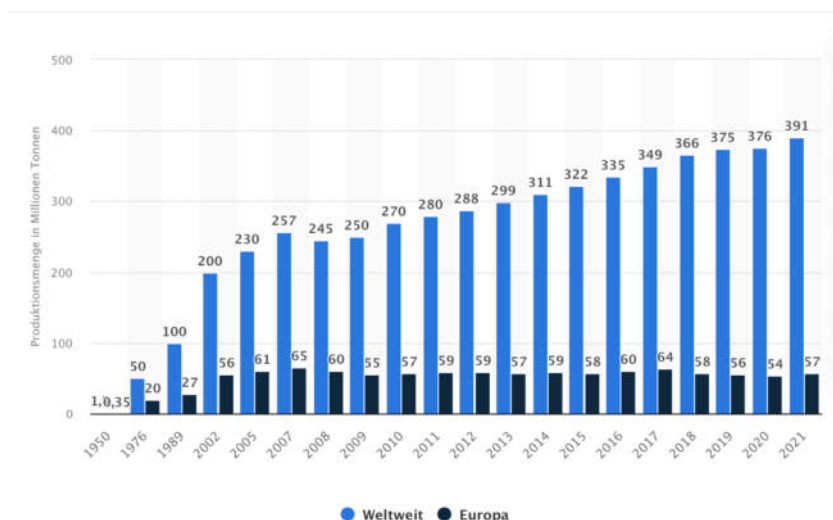


Abbildung 10: Weltweit produzierte Kunststoffmenge (Statista 2021)

5 Persistenz der Kunststoffe

Viele Kunststoffe sind persistente Stoffe, das bedeutet sie haben eine hohe Stabilität in der natürlichen Umwelt (vgl. Spektrum der Wissenschaft 2023) und eignen sich deshalb auch gut für Anwendungen in der Natur.

Jedoch stellt die natürliche Umwelt mit ihren verschiedenen, simultan wirkenden abiotischen und biotischen Einflussfaktoren für Kunststoffe eine Umgebung der intensivsten Belastung dar. Um dieser intensiven Belastung standhalten zu können wurden Kunststoffe durch das Einpolymerisieren von Additiven (einzelnes Element) und Comonomeren (Monomere, die sich in ihrem Aufbau von den eigentlichen Monomeren unterscheiden) modifiziert.

5.1 Abiotische Faktoren

Unter abiotischen Umweltfaktoren versteht man physikalisch-chemische Faktoren, die aus der unbelebten Umwelt hervorgehen. Zu ihnen gehören Klima, Wasser,

Temperatur, Licht, Strömung, Salinität und die Konzentration anderer chemischer Stoffe (vgl. Spektrum der Wissenschaft 2023).

5.1.1 Photo-Degradation und Ökotoxizität

Für die Verwitterung von konventionellen Polymeren ist die Photo-Degradation der wichtigste Prozess (vgl. Rummel 2021). Polymere wie PE, PP, PS oder PVC werden üblicherweise durch photo-initiierte Oxidationen in drei Schritten zersetzt. Bei der Initiation bilden sich durch zugeführtes UV-Licht Radikale. Bei der Propagation binden diese Radikale an das bestehende Teilchen und geben den radikalischen Charakter weiter. Dieser Schritt wiederholt sich mehrmals, sodass der Kunststoff in immer kleinere Teile „zerpflückt“ wird. Der letzte Teilschritt ist die Termination, also die Rekombination zweier Radikale. Nun sind keine Radikale mehr in der Reaktion enthalten, was zum Erlöschen der Zerkleinerung führt. Dieser Mechanismus durchdringt die Oberfläche des Stoffes bis zu einer Tiefe von 50-100 Micrometern, denn nur dort kann bspw. UV-Strahlung als Initiator dienen.

Durch Mikro- bzw. Nanoplastik mit oxidierten Endgruppen, also Endgruppen die Elektronen abgegeben haben, werden die positiven Ladungen der Oxoniumionen ausgeglichen und die Konzentration der Oxoniumionen wird verringert. Eine Verringerung der H_3O^+ bedeutet eine Erhöhung des pH-Werts, weswegen dieser Mechanismus ursächlich für die Auslaugung der Böden ist (vgl. Gewert et al. 2018).

5.2 Biotische Faktoren

Unter biotischen Umweltfaktoren für Lebewesen versteht man solche, die von der lebenden Umwelt ausgehen, wie zum Beispiel Nahrung, Konkurrenten, Feinde, Parasiten (vgl. Spektrum der Wissenschaft 2023). Im Fall der (Bio-)Kunststoffe sind Feinde also Bodenlebewesen und Mikroorganismen, die zur Zersetzung beitragen relevant.

5.2.1 Biofilm

Mikroorganismen (Bsp. Pilze, Bakterien, Algen), aus verschiedenen strukturierten Ökosystemen (auch Ökosystem Boden) sind in der Lage über einen komplexen biologisch/ chemischen Prozess eine Schicht zur Konditionierung auf der Oberfläche eines Stoffes (sozusagen der Anpassung der notwendigen äußeren Umstände) herzustellen (vgl. Rummel 2021). Sobald diese Schicht vorhanden ist, formt die Gesamtheit der vorliegenden Mikroorganismen einen Biofilm. Die Zusammensetzung des Biofilms variiert je nach Art der Mikroorganismen. Diese Bildung des Biofilms läuft

nach einem vierteiligen Schema ab. Zuerst heften sich freie planktonische Zellen an die Oberfläche (u.a. durch Van-der-Waals Kräfte). Daraufhin entstehen Monolayer und Mikrokolonien, die durch produzierte Adhäsine, die ersten Bindungen mit der Materialoberfläche eingehen (vgl. Kriem 2023). Dieser Prozess ist nur teilweise reversibel und deswegen störend für viele Alltagsanwendungen (Bsp. Waschmaschine). Neben dem Ansammeln von Nährstoffen und dem Schutz vor physikalischen bzw. chemischen Einflussfaktoren, sorgt der Biofilm für eine extrazelluläre Schädigung des Materials (hier: Kunststoff) und de facto ebenfalls für eine stückweise Zerkleinerung. Es handelt sich also um den Primärabbau (vgl. 7.5.1).

5.2.2 Mikroorganismen

Konventionelle Kunststoffe sind inert, das bedeutet sie reagieren mit potenziellen Reaktionspartnern nicht oder nur in geringem Maße (vgl. Chemie.de 2021). Deshalb spielen viele Arten der Mikroorganismen zwar eine große Rolle bei der stückweisen Zerkleinerung von Kunststoffen (Primärabbau) (vgl. 5.2.1), sind jedoch nicht in der Lage diese intrazellulär zu verstoffwechseln (=Endabbau vgl. 7.5.1) (vgl. Rummel 2021).

6 Zukunftsaussichten der konventionellen Kunststoffe

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass (konventionelle) Kunststoffe ihr Debut als günstiger und praktischer Stoff im 20. Jahrhundert feierten. Seitdem intensiviert sich die Bedeutung und folglich auch die produzierte Menge der verschiedenen Kunststoffe auf jeglichen Anwendungsfeldern. Stand 2023 sind konventionelle Kunststoffe nicht aus Industrie und Alltag wegzudenken. Nichtsdestotrotz stellt die Kunststoffmenge, die ihren Weg als Abfall in die Natur findet und das Finden potenzieller Maßnahmen zur Beseitigung dieser Umweltkatastrophe (auch vor dem Hintergrund der Persistenz) eine große Herausforderung dar. Ein möglicher Lösungsansatz ist die Substitution konventioneller Kunststoffe durch Biokunststoffe, auf deren Darstellung diese Arbeit abzielt.

7 Biokunststoffe als Äquivalent

Fossile Rohstoffe wie Erdgas und Erdöl haben sich als elementar für die Kunststoffindustrie erwiesen. Doch gerade in Zeiten mangelnder Rohstoffe und zunehmenden Umweltbewusstseins ist der Wunsch nach einer Alternative omnipräsent und dringend notwendig. Eine mögliche Alternative bieten Biopolymere, also Polymere die natürlich vorkommen und zu Biokunststoffen verarbeitet werden können. Oftmals werden Biokunststoffe allerdings durch eine Erweiterung ihrer Zusammensetzung, durch ein Einpolymerisieren von Additiven, vor mechanischen und oder thermischen Einflüssen geschützt, weswegen ihre Umweltverträglichkeit gesamtbilanziell zu betrachten ist (vgl. Menges et al. 2022).

7.1 Biokunststoffe Entwicklung

Erste Biokunststoffe, die aus Cellulosederivaten und Kautschuk hergestellt wurden, betraten zum Zeitpunkt der Industrialisierung das erste Mal die Bildfläche. Die ersten hergestellten Kunststoffe waren also biologischen Ursprungs. Ihre Herstellung beruhte mehr auf Empirie als einem chemischen Verständnis, beispielsweise die durch Charles Goodyear (vmtl. zufällig) entdeckte Vulkanisation von Kautschuk (1839) und die Synthese von Celluloid (1850) durch Christian Friedrich Schönbein brachten zwei halbsynthetische Kunststoffe auf den Weltmarkt (vgl. Wurmitsch 2020). Seit dem Jahre 1909 lag der Fokus wegen ihrer Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften primär auf vollsynthetischen Kunststoffen, die wiederum auf petrochemischen Rohstoffen basierten. Erst ab 1980 wurden aufgrund der Entsorgungsschwierigkeiten der vollsynthetischen Kunststoffe, der geringen Verfügbarkeit und hohen Preise der fossilen Rohstoffe Bemühungen angestellt, Kunststoffe auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen herzustellen (vgl. Wurmitsch 2020). Die Biopolymere lassen sich seitdem in drei „Generationen“ unterteilen. Die erste Generation (ab den 80er Jahren) fand auf dem Markt keinen Anklang, da ihre Materialeigenschaften unzureichend waren. Die zweite Generation näherte sich mit ihren Eigenschaften ihren konventionellen Pendanten an und konnte in großer Stückzahl produziert werden. Ihr Hauptaugenmerk war die Kompostierbarkeit. Die dritte Generation der Biopolymere ist eine Werkstoffklasse, die mehr auf Beständigkeit und weniger auf biologische Abbaubarkeit zielt. Das bedeutet Biokunststoffe der dritten Generation übernehmen Eigenschaften wie die Wärmeformbeständigkeit, den konstanten Geruch und die UV-

Stabilisierung von den konventionellen Kunststoffen. Die Kompostierbarkeit ist dadurch limitiert (vgl. Wurmitsch 2020).

7.2 Klassifizierung

Wie ist der Begriff der Biokunststoffe definiert? Wie unterscheiden sie sich von konventionellen Kunststoffen? Diese Unterscheidung unterliegt den Kriterien des Grundstoffes und der Kompostierbarkeit (vgl. Stephan Schröter 2019). Unter konventionellen Kunststoffen versteht man jene, die auf fossilen Rohstoffen basieren und nicht biologisch abbaubar sind. So lassen sich Biokunststoffe in drei Klassen unterteilen. Diese Klassen sind in Abbildung 11 dargestellt.

- Biokunststoffe können aus fossilen (petrochemischen) Rohstoffen zusammengesetzt, aber aufgrund ihrer Molekularstruktur kompostierbar sein.
- Sie können ebenfalls auf regenerativen Rohstoffen basieren, jedoch sind sie nicht biologisch abbaubar (BIO-PE; BIO-PET). Diese Kunststoffe können mit ihrem konventionellen Äquivalent in der Produktion gemischt werden.
- Die letzte Gruppe der Biopolymere basiert auf regenerativen Rohstoffen und ist biologisch abbaubar (vgl. Abbildung 11).

Diese Vielschichtigkeit des Kunststoffbegriffs sorgt für Verwirrung der Verbraucher. So kann es zu falscher Entsorgung oder ökologischer Überschätzung kommen (vgl. Kap. 11).

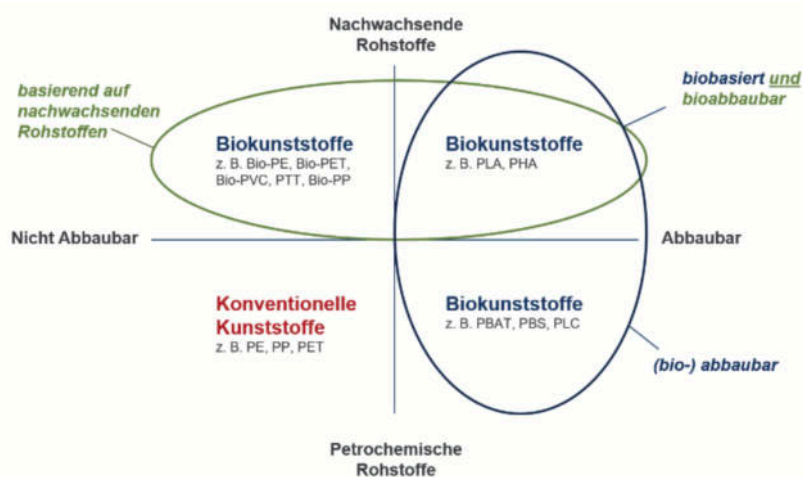


Abbildung 11: Einteilung der Kunststoffe nach Herkunft (fossil oder Biobasiert) sowie nach biologischer Abbaubarkeit (BUND 2022)

7.3 Diverse Herstellungsverfahren von Biokunststoffen

Biokunststoffe werden in „chemisch neuartig“ und „Drop-in“ differenziert. Erstere sind neu zusammengesetzte Kunststoffe, die aus pflanzlichen (Cellulose, Stärke), tierischen (Proteine, Chitin) Polymeren und auch fossilen Rohstoffen wie Erdöl (z.B. Polyesteramid-PEA) hervorgehen (vgl. Menges et al. 2022). Biobasierte Drop-in-Kunststoffe hingegen unterscheiden sich in ihrer chemischen Struktur nicht von ihrem fossilen Äquivalent. Lediglich die Monomere werden aus anderen Ursprungstoffen hergestellt. Im Falle von Bio-PE und Bio-PET wird Zuckerrohr statt Erdöl verwendet.

7.3.1 Polylactid (Polymilchsäure)

Polylactid (PLA) ist ein steifer, transparenter Thermoplast und gehört zur Polymerklasse der aliphatischen Polyester. Eines ihrer Herstellungsverfahren entwickelte Carothers im Jahr 1932. Heute ist PLA ein technisch ausgereifter Werkstoff, der mit konventionellen Kunststoffen Schritt halten kann (vgl. Menges et al. 2022). PLA basiert auf regenerativen Rohstoffen wie Zuckerrohr und Mais und ist biologisch abbaubar, wodurch es sich optimal für die Produktion von Lebensmittelverpackungen und Getränkeflaschen anbietet.

Die Herstellung des Biopolymers erfolgt in vier Teilschritten: Zuerst wird das Substrat (Bsp. Maisstärke) konditioniert, dies erfolgt u.a. durch eine Hydrolyse des Stärkemoleküls. Simultan erfolgt eine Vorfermentation (Inokulation), in der sich die milchsäureerzeugenden Mikroorganismen vermehren können (vgl. Kunststoffe.de-Team 2023). Der zweite Schritt ist die eigentliche Milchsäurefermentation: unter anaeroben Konditionen und kontinuierlicher Zugabe des Substrats erfolgt die Umwandlung der Kohlenhydrate in Milchsäure. Anschließend wird die Milchsäure isoliert bzw. dehydriert, sodass Lactide (zyklische Diester der Milchsäure) entstehen. Dabei ist die räumliche Orientierung bzw. der Bindungswinkel der angehängten Methylgruppen der Lactide durch den der Methylgruppe der Milchsäuren bedingt (s. Abb. 12). Die stereoisomeren Varianten der Milchsäure bilden also L-Lactide und D-Lactide, die durch Polykondensation zu zwei Polylactid-Varianten: Poly-D-Lactid (PDLA); Poly-L-Lactid (PLLA) verknüpft werden (vgl. Kunststoffe.de-Team 2023).

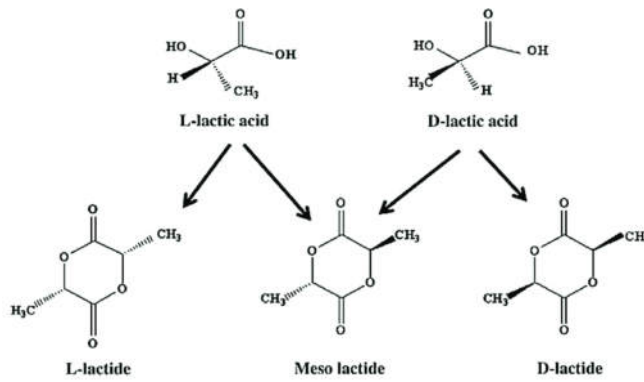


Abbildung 12: Strukturformeln D-/L- Milchsäure sowie L,L-Lactid, meso-Lactid, D,D-Lactid (Elsevier 2010)

7.3.2 Polyhydroxyalkanoate

Polyhydroxyalkanoate (PHA) werden ebenfalls über Fermentation hergestellt. Der signifikante Unterschied zwischen PLA und PHA ist, dass es bei PHA während des Fermentationsprozesses zu einer natürlichen Polymerisation kommt. Nachfolgende Reaktionsschritte werden überflüssig. „PHA sind also biogene Polyester“ (vgl. Wurmitsch 2020).

Drei verschiedene Herstellungsverfahren:

1) Fermentative Herstellung in Bakterien, 2) Synthese in transgenen Pflanzen und 3) Enzymatische Katalyse.

Die Herstellung in Bakterien ist die einzig industriell relevante Methode, zu der mehr als 300 Mikroorganismen in der Lage sind. Hierbei nutzt man die Eigenschaft, dass diese Bakterien, sobald sie Indizien für Nährstoffmangel oder einen Kohlenstoffüberschuss wahrnehmen, beginnen, PHA als Reservestoff in ihren Zellen anzulegen. Die chemische Zusammensetzung von PHA ist in Abbildung 12 dargestellt. Nachdem sich ausreichend PHA gebildet hat muss es aus den Zellen isoliert und abgetrennt werden. Durch Zentrifugation oder Filtration werden die Zellen aus dem Kulturmedium abgetrennt und die PHA isoliert. Dafür gibt es einige komplexe Möglichkeiten wie beispielsweise eine Behandlung mit Natriumhypochlorid, das die Zellwand der Bakterien zerstört, aber auch die PHA-Oberfläche angreift und dessen Molmasse reduziert (vgl. Wurmitsch 2020). Zuletzt wird das Produkt noch gereinigt und getrocknet und ggf. Additive oder Comonomere hinzugefügt. Additive sind Zusätze in elementarer Form bspw. Schwefel, wohingegen Comonomere zusätzliche Moleküle sind, die in den Kunststoff eingebaut werden.

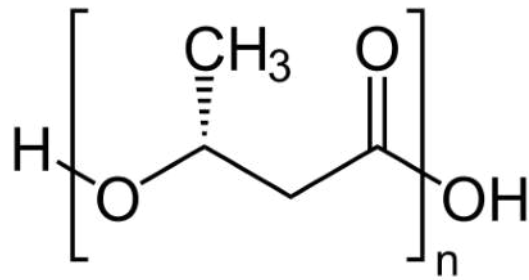


Abbildung 13: Strukturformel PHA (Researchgate.net 2023)

7.3.3 Polysaccharide

Das Polysaccharid Stärke, das zu 20-30% aus Amylose und zu 70-80% aus Amylopektin besteht (s. Abbildung 14), kann indirekt zur Fermentation (Polylactid, Polyhydroxyalkanoate) oder direkt (für Stärkekunststoffe) verwendet werden. Direkte Verwendung bedeutet, das Makromolekül Polysaccharid liegt dem Kunststoff als Polymer zugrunde. Die Rohstoffe (Mais und Weizen) werden durch einen vierteiligen Prozess zu Biokunststoffen weiterverarbeitet. Zu Beginn muss der Rohstoff gereinigt werden, um ihn dann zu zermahlen. Anschließend wird durch eine Verdünnung mit Wasser eine Stärkesuspension hergestellt, welche durch verschiedene Trennverfahren von Fasern und Ölen befreit wird. Der zurückbleibende hohe Proteingehalt kann durch Zentrifugation abgebaut werden (vgl. Wurmitsch 2020). Die entstandene Stärkesuspension wird aufkonzentriert und getrocknet, um dann in einem fertigen Biokunststoff zu resultieren. Die spröde Beschaffenheit und andere suboptimale Eigenschaften des Stärkekunststoffes können durch Additive kompensiert werden.

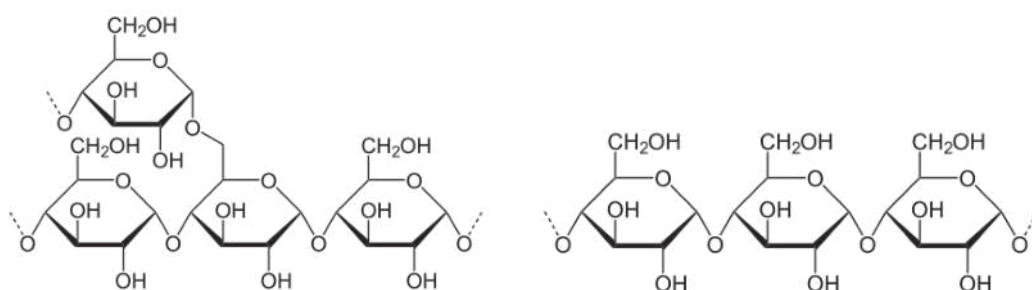


Abbildung 14: Ausschnitt eines Amylopektinpolymers (links) und eines Amylosepolymers (rechts) (Lexikon der Biologie 2023)

7.4 Eigenschaften und Anwendungen exemplarisch

7.4.1 PLA

Polylactid ist ein biologisch abbaubarer Kunststoff, dessen genaue Eigenschaften je nach Milchsäure-Isomer-Verhältnis (vgl. Meso Lactide Abb. 12) variieren. Mit zusätzlicher Modifizierung durch Additive, um die Beständigkeit zu erhöhen, geht die

Gefahr einher, die Abbaubarkeit einzuschränken. PLA hat eine niedrige Glasübergangstemperatur (max.= 95°C), d.h. Temperaturen über dieser Grenze bewirken eine Veränderung der amorphen Bereiche und der Kunststoff geht von einem glasartigen in einen gummiartigen Zustand über (vgl. TU Dresden 2016). Deshalb ist PLA für den Kontakt mit heißen Substanzen (bspw. Heißgetränken) ungeeignet. Da die T_g für kühle Anwendungen irrelevant ist, wird PLA u.a. für Joghurtbecher verwendet. Polylactid hat außerdem durch die hohe Permeabilität geringe Gas-Barriereeigenschaften. Lebensmittelverpackungen, Behälter für Flüssigkeiten ohne Kohlensäure oder Getränkebecher für Kaltgetränke können aus PLA hergestellt werden. Gleichermassen wird das Biopolymer im Elektroniksektor (Tastaturen und Gehäuse), im Automobilsektor (Innenraumbauteile) und der Biomedizin (Implantate, Nähte und Schrauben usw.) genutzt.

7.4.2 PHA

In der Anwendung gibt es circa zehn verschiedene PHAs, sowohl Copolymere, die aus mehreren verschiedenen Monomeren bestehen, als auch Homopolymere, die sich aus einem Monomer zusammensetzen, deren Eigenschaften sich für industriellen Gebrauch eignen. Da PHAs als Energiespeicher von Mikroorganismen gebildet werden, können dieselben den Kunststoff auch abbauen. Polyhydroxyalcanoate können ebenfalls anaerob durch Deponierung oder unter Wasser abgebaut werden. Polyhydroxybutyrat (PHB) ist ein typischer Vertreter. Dieser Thermoplast ist schwierig in der Handhabung, denn neben Sprödhheit ist auch die geringe Differenz zwischen der Schmelz- ($T_M= 180^\circ\text{C}$) und der Zersetzungstemperatur ($T_Z= 200^\circ\text{C}$), also der Temperatur, bei der die Bindungen bzw. Bindungsverhältnisse der Moleküle irreversibel zerstört werden, ursächlich für die Notwendigkeit, in der Verarbeitung optimale Bedingungen zu schaffen. Die ungünstigen Eigenschaften lassen sich durch Einpolymerisieren von Comonomeren und der Herstellung von Blends (Vermischung) mit anderen biogenen oder petrochemischen Kunststoffen drastisch verbessern (vgl. Wurmitsch 2020). PHAs werden bspw. für Shampoo-Flaschen, Motorölkannister oder als Griffe von Einwegrasierern verwendet. Potenzielle Anwendungsfelder könnten in Zukunft auch im Agrarsektor für PHBV-Pellets, die bei ihrem Zerfall Insektizide freisetzen und der Biomedizin für Mikrokapseln, chirurgisches Nahtmaterial und Beschichtungen von Gefäßimplantaten liegen (vgl. Wurmitsch 2020).

7.4.3 Stärke

Auch Polysaccharide fungieren als Energiespeicherstoff und sind folglich biologisch abbaubar. Wie in (7.3.3) erwähnt, besteht Stärke aus den Bestandteilen Amylose und Amylopektin. Die Verarbeitung von Amylopektin ist vorteilhaft, denn in heißem Wasser bildet Amylopektin eine hochviskose, zähe Masse (vgl. Wurmitsch 2020), wohingegen Amylose geliert. Für eine industrielle Verwertung sind Pflanzen mit hohem Stärkegehalt prädestiniert, darum werden geeignete Pflanzen, die fast ausschließlich Amylopektin produzieren, durch Genmanipulation (Bsp. Amfora-Kartoffel) gezüchtet. Die hygroskopischen Eigenschaften und die Hydrophilie macht Stärkepolymere für lange technische Anwendungen und Verpackungen unbrauchbar. Ihre Hauptanwendung sind Agrarfolien, Einwegbesteck und Biomüllbeutel. Letztere sind aufgrund der längeren Kompostierdauer hochproblematisch selbst für technische Kompostieranlagen. Nichtsdestotrotz macht vor allem die Verfügbarkeit der nachwachsenden Rohstoffe und die niedrigen Kosten stärkebasierte Biopolymere oder Stärkeblends zu einer beliebten Möglichkeit.

7.5 Biologisches Abbaufahren

Biokunststoffe gelten als biologisch abbaubar, sofern sie von Mikroorganismen wie Bakterien, Pilzen und anderen Bodenlebewesen vollständig zu den Stoffwechselprodukten Wasser, Kohlenstoffdioxid und Biomasse umgesetzt werden können (vgl. Menges et al. 2022). Der Begriff „Kompostierung“ beschreibt denselben biologischen Zersetzungsprozess, legt ihn jedoch auf ein Zeitintervall (meist ein paar Monate) fest. Für die häusliche Kompostierung gilt daher eine Prüfdauer von ca. zwölf Monaten, während die industrielle mit einer Dauer von sechs Monaten rechnet. In beiden Umfeldern läuft der in diesem Kapitel beschriebene Abbauprozess ab.

7.5.1 Abbauprozess

Extrazelluläre Enzyme von Mikroorganismen und Kleinlebewesen sind verantwortlich für den Abbau der Polymere. Die Reaktion zwischen Enzym und Polymer kann zu einer zufälligen Spaltung der Hauptkette oder einer Abspaltung der Randmomomere führen (vgl. Wurmitsch 2020). Das ist der sogenannte Primärabbau. Die Spaltprodukte werden in die Zelle transportiert und intrazellulär mineralisiert, das heißt sie werden bis zu CO₂, Wasser, Salzen, Mineralen und Biomasse zersetzt, hierbei spricht man von dem Endabbau. Dieser Mechanismus kann sowohl aerob als auch anaerob ablaufen. Da lediglich eine geringe Anzahl der Kunststoffe biologisch abbaubar ist, kommt es nicht immer zum Primärabbau und konsekutiv zum Endabbau. Manche

Kunststoffe können nur teilweise zerkleinert werden (vgl. 5.2.1), während andere Kunststoffe für die behandelten Organismen überhaupt nicht zugänglich sind. Zu Beginn des Abbauprozesses sind optische Veränderungen wahrnehmbar, darunter Verfärbungen, ungleichmäßige Oberflächenbeschaffenheit usw..

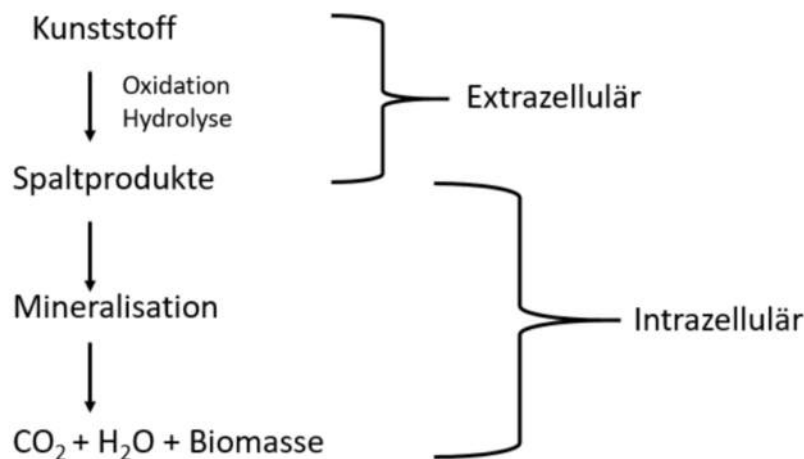


Abbildung 15: Prozess des Bioabbaus Kunststoff (Wurmitsch 2020)

7.5.2 Drei Komponenten des Bioabbaus

Für den Bioabbau sind die Mikroorganismen, das Substrat und die Umgebung maßgeblich.

Den Mikroorganismen (Bakterien, Algen, Pilze) fällt die wichtige Aufgabe, Enzyme in ausreichender Konzentration zu synthetisieren, zu. Außerdem müssen die Mikroorganismen metabolisieren, d.h. Spaltprodukte aufnehmen und weiter verstoffwechseln können.

Die chemischen Bindungen des Substrats (Kunststoffs) müssen für die Mikroorganismen zugänglich sein, sodass diese durch Hydrolyse und Oxidation gespalten werden können. Der Zugang zu den Bindungen wird durch die Existenz von Heteroatomen (also nicht C-/H-Atomen) in der Hauptkette begünstigt (vgl. Wurmitsch 2020). Verzweigungen hingegen erschweren den Abbau. Außerdem gilt, dass hydrophile, amorphe, weiche und leichte (Molmasse) Polymere schneller abgebaut werden als hydrophobe, kristalline, harte und schwere.

Die letzte Komponente des Bioabbaus, die Umgebung beinhaltet Temperatur, Sonnenlicht, Feuchtigkeit, Salze, Sauerstoffgehalt, pH-Wert, Nährstoffe usw.. Es ist stets eine gewisse Menge Wasser für den Abbau notwendig. Je schlechter die Umweltbedingungen erfüllt sind, desto langsamer geht der Abbau vonstatten.

Auch Biokunststoffe lassen sich durch Photo-Degradation zersetzen.

8 Experimentelle Untersuchung der Kompostierbarkeit

Wie in 7.5 beschrieben, lassen sich bestimmte Biokunststoffe unter gewissen Bedingungen biologisch abbauen. Ob eine willkürlich ausgesuchte Zusammenstellung von Biokunststoffen dem Bioabbau unterliegt und die Hersteller ihren Werbeversprechen der biologischen Abbaubarkeit gerecht werden, wird in diesem Kapitel experimentell analysiert.

8.1 Beschleunigte Verwitterung

Der Zersetzungsprozess von (Bio-)Kunststoffen ist in der Natur teils sehr langwierig, weshalb Wissenschaftler sich Möglichkeiten überlegt haben, diesen Vorgang zu beschleunigen. Durch die Optimierung der abiotischen oder biotischen Faktoren kann ein solches Resultat erzielt werden (vgl. Rummel 2021).

8.2 Versuchsaufbau und allgemeine Prognose

Zur experimentellen Analyse der Kompostierbarkeit von Biokunststoffen in der Umwelt müssen möglichst realitätsnahe Bedingungen, die das zu untersuchende Szenario, den biologischen Abbau im Ökosystem Wald simulieren, geschaffen werden. Zugleich muss durch beschleunigte Verwitterung (vgl. 8.1), in meinem Fall die Anhebung der Umgebungstemperatur, der Abbauprozess verkürzt werden. Der allgemeine Versuchsaufbau besteht aus drei Kunststoffboxen, die mit Komposterde gefüllt sind. In diesen drei Boxen wurden jeweils fünf Biokunststoffproben (8.4) platziert (s. Abb. 17), deren Veränderung und gegebenenfalls auch Zerfall über den Zeitraum von drei Monaten untersucht wird. Exogene Einflussfaktoren auf den Zersetzungsprozess der Biokunststoffe lassen sich auch hier in biotisch und abiotisch aufspalten. Berücksichtigte abiotische Faktoren bzw. Startbedingungen meines Versuchs sind die Wasserzugabe (ca. 1,5-2l), die Umgebungstemperatur (ca. 30°C), der pH-Wert des Bodens (7.34), die Sauerstoffzufuhr (durch stetiges Umgraben des Systems) und die Boden-Feuchtigkeit (Clay= 6%). Die biotischen Faktoren setzen sich lediglich aus Mikroorganismen und Kleinlebewesen, die zum Abbau beitragen, zusammen. Die benutzte Komposterde beinhaltet neben Mikroorganismen auch eine Diversität an Kleintieren wie zum Beispiel Schnecken (vgl. Abb. 16).



Abbildung 16: Dokumentation Lebewesen in Komposterde

Das Experiment wird synchron in drei verschiedenen Boxen durchgeführt. Das Ziel der dreifachen, wenn doch zeitgleichen Ausführung des Versuchs ist neben der Dokumentation des biologischen Zerfalls, das Feststellen eines Zusammenhangs zwischen abiotischen Faktoren und dem Verlauf des Experiments. Alle drei Teilversuche starteten zu Beginn des Versuchs mit den oben genannten Bedingungen. Im Laufe des Versuchs erfolgt die Wasserzugabe und das Umgraben in folgendem Rhythmus.

- Box 1: Wasserzugabe alle drei Tage, Umgraben alle drei Tage
- Box 2: Wasserzufuhr alle sieben Tage, Umgraben alle sieben Tage
- Box 3: Wasserzufuhr alle vierzehn Tage, Umgraben alle vierzehn Tage

Allgemeine Prognose: Nicht alle ausgewählten Produkte halten aus chemisch/biologischer Sicht die Verkaufsversprechen, d.h. nicht alle Produkte sind biologisch abbaubar. Folglich werden manche Produkte vollständig, andere teilweise und wieder andere überhaupt nicht zersetzt. Außerdem werden die Proben in Box 1 am schnellsten und in Box 3 am langsamsten abgebaut.



Abbildung 17: Grundlegender Aufbau der praktischen Untersuchung

8.3 Durchführung

Wie in 8.2 beschrieben erstreckte sich die Versuchsdurchführung über einen Zeitraum von drei Monaten. Im Laufe dieser drei Monate wurde die optische Veränderung der Biokunststoffproben mehrmals, zwischen den Teilversuchen vergleichend, dokumentiert. Die Analyse der optischen Veränderung und somit auch die Dokumentation wurde mit einem Binokular unternommen. Nach Abschluss des ersten Durchführungsvorganges wurde das Experiment ein zweites Mal aufgesetzt, um den Verlauf des pH-Wertes, der Temperatur und der Feuchtigkeit innerhalb einer Woche im Boden zu ermitteln.

Die graphische Darstellung dieser Entwicklungen wird in 8.5 abgebildet.

8.4 Biokunststoffproben 1-5 und spezifische Prognose

1. Milchtrübe Folie:

Die Bio-Folie des Unternehmens Mopack besteht zu 100% aus nachwachsenden Rohstoffen. Im Falle der Folie B-Greeneins (unsere Folie) aus Ethylen, das aus Zuckerrohr synthetisiert wurde. Der Verkäufer gibt an, dass dieser Kunststoff nicht zwangsläufig kompostierbar und von Ethylen kaum zu unterscheiden ist. Gemäß dem Hersteller liegt der ökologische Vorteil dieses Kunststoffs in der Herstellung, denn dort binden die verwendeten Rohstoffe CO_2 aus der Atmosphäre. Dadurch ist ihre CO_2 Bilanz bis um 60% besser als bei konventionellem Polyethylen (vgl. mopack.de 2023). Diese Folie wird also nicht untersucht, um biologische Abbaubarkeit zu beobachten, sondern darzustellen wie sich Bio-PE in der natürlichen Umwelt verhält.

2. Teekueverts:

Die Teekueverts der Marke Gepa bestehen aus einer Kombination aus Kraftpapier und Armoaschutz-Folie, die zu 90% aus Holzzellstoff (Cellulose) besteht. Daraus resultiert eine industrielle Kompostierbarkeit, bei der innerhalb von 6 Monaten 90% der Folie zersetzt werden soll.

3. Granulat:

Der Hersteller (Wunschstoff Ehrlich) des Granulats gibt an, dieses aus 70% biobasierten Rohstoffen (genauer PLA) zu fertigen. Zudem wird eine 100%ige biologische Abbaubarkeit, die kein Mikroplastik in der Natur zurüclässt, versprochen. Dieser Biokunststoff besitzt eine Schmelztemperatur von 175-180°C.

4. Salatfolie:

Die Salatfolien der Firma Repaq bestehen aus Cellulose und ist vom TÜV als „heim- und gartenkompostierbar“ zertifiziert. Das inkludiert auch die in Kapitel 10 erwähnte DIN- Prüfung. Repaq wirbt damit, dass ihre Verpackungen innerhalb von 42 Tagen vollständig zu CO₂ und H₂O kompostieren.

5. Becher:

Der Biokunststoffbecher der Firma Bioeinweggeschirr besteht ebenfalls aus PLA, weswegen der Hersteller diesen als recyclebar und 100% ökologisch abbaubar kennzeichnet. Das Produkt ist durch keine Siegel zertifiziert.

Spezifische Prognose:

Ich stelle die Hypothese auf, dass die 1. Probe minimale optische Veränderungen erfährt, wohingegen Probe 2 und 4 (Cellulose-Folien) zumindest größtenteils biologisch abgebaut werden.

Probe 3 wird auch zersetzt, jedoch nicht vollständig, da der Kunststoff nur zu 70% biobasiert ist. Die 5. Probe ist voraussichtlich nicht biologisch abbaubar, da jegliche Zertifizierung fehlt.



Abbildung 18:5 Biokunststoffproben (1=links; 5=rechts)

8.5 Verlauf und Resultate

Box 1:

1								
2							Abgeschlossen	Abgeschlossen
3								
4							Abgeschlossen	Abgeschlossen
5								
Messdatum	13.01.2023	23.01.2023	27.01.2023	03.02.2023	13.02.2023	07.03.2023	15.03.2023	31.03.2023

Abbildung 19: Verlauf Box 1

In der Versuchsdurchführung mit den optimalen Bedingungen lässt sich feststellen, dass Probe Nr. 1 (milchtrübe Folie) die ersten vier/ fünf Wochen nur minimale Oberflächenveränderungen erfährt, doch vor allem ab Woche sieben/acht nimmt die Oberflächenbeschaffenheit und die Stabilität der Folie ab. Die Folie wird durch den Prozess merklich verändert, jedoch nicht zersetzt.

Die zweite Probe hingegen ist schon nach einer Woche verfärbt, brüchig und durch die Zersetzung unförmig. Diese Entwicklung intensiviert sich, wobei festzustellen ist, dass mit zunehmender Zeit die Biokunststofffragmente immer kleiner und mit mehr Erde in Verbindung auftreten, sodass nach zwei Monaten keine Überreste einer nennenswerten Größe auffindbar sind. Die Probe wurde zersetzt.

Ganz im Gegenteil zur dritten Probe, der absolut keine Veränderung über drei Monate anzusehen ist. Keine Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit, der Farbe, der Größe.

Die Entwicklung der vierten Probe ist in den meisten Zügen identisch mit der zweiten Probe. Der Zersetzungsprozess setzt in Woche eins ein und ist nach zwei Monaten abgeschlossen. Es lässt sich eine weitere Gemeinsamkeit feststellen. Beide Proben sind im Verlauf des Versuchs deutlich feuchter als die restlichen Biokunststoffe.

Auch die Beschreibung der Veränderung der fünften Probe ist ein kurzes Unterfangen, denn abgesehen von Kratzern an der Oberfläche, die Erdpartikel einfangen, ist nichts zu beobachten.

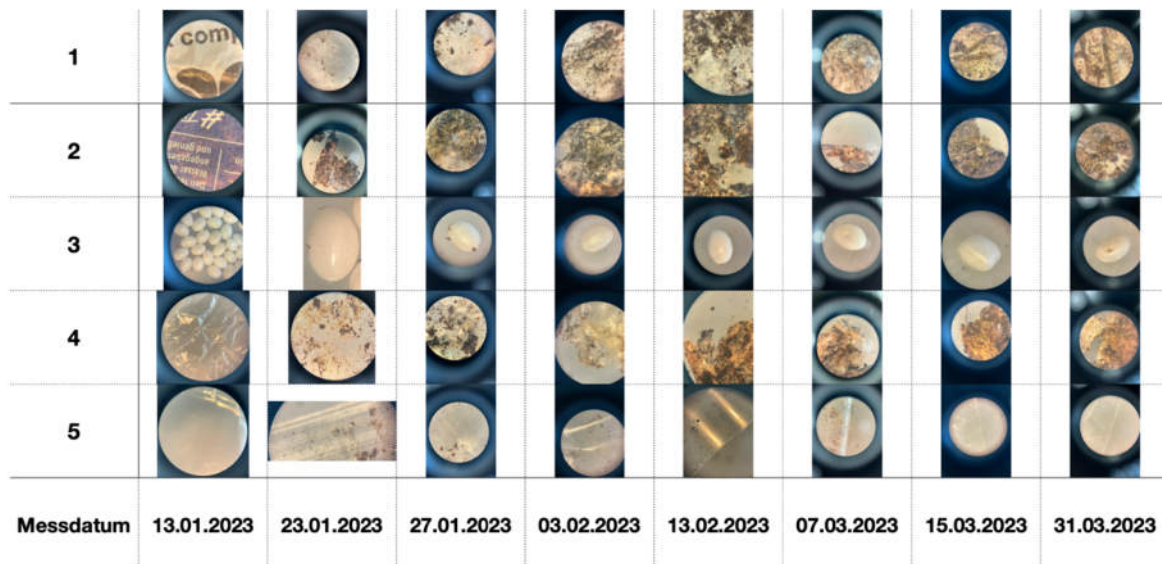
Box 2:

1								
2							Abgeschlossen	Abgeschlossen
3								
4							Abgeschlossen	Abgeschlossen
5								
Messdatum	13.01.2023	23.01.2023	27.01.2023	03.02.2023	13.02.2023	07.03.2023	15.03.2023	31.03.2023

Abbildung 20: Verlauf Box 2

Die Entwicklung der Biokunststoffe ist probenübergreifend nahezu identisch. Auch der Abschlusszeitpunkt und die Entwicklung der Proben zwei und vier stimmen über ein.

Box 3:



Der Unterschied zum dritten Teilversuch ist hingegen deutlicher. Die wesentlichen Unterschiede sind, dass die Fragmentierung und Zerstörung der einheitlichen Oberfläche der ersten Probe früher einsetzen. Vorrangig ist jedoch, dass Proben zwei und vier im gegebenen Zeitintervall nicht vollständig zersetzt werden konnten und im Laufe des Experiments deutlich trockener waren als in Box 1 und 2.

Doch wie wirkt sich der Zersetzungsprozesse auf die Umgebung aus? Neben der Temperatur innerhalb des Versuches, wurden auch der pH-Wert und die Feuchtigkeit im Laufe einer Woche mit Pasco- Messgeräten aufgezeichnet.

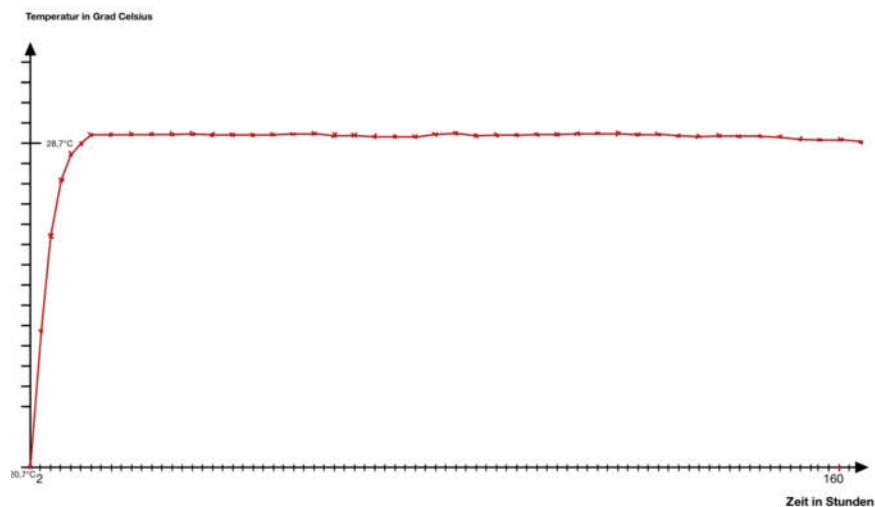


Abbildung 21: Temperaturverlauf (1 Woche)

Die Temperatur innerhalb des Versuchs stieg in den ersten zwölf Stunden auf 28.7°C an. Für die restlichen 150 Stunden blieb diese Temperatur bestehen, beziehungsweise sie pendelte gleichmäßig um diesen Wert.

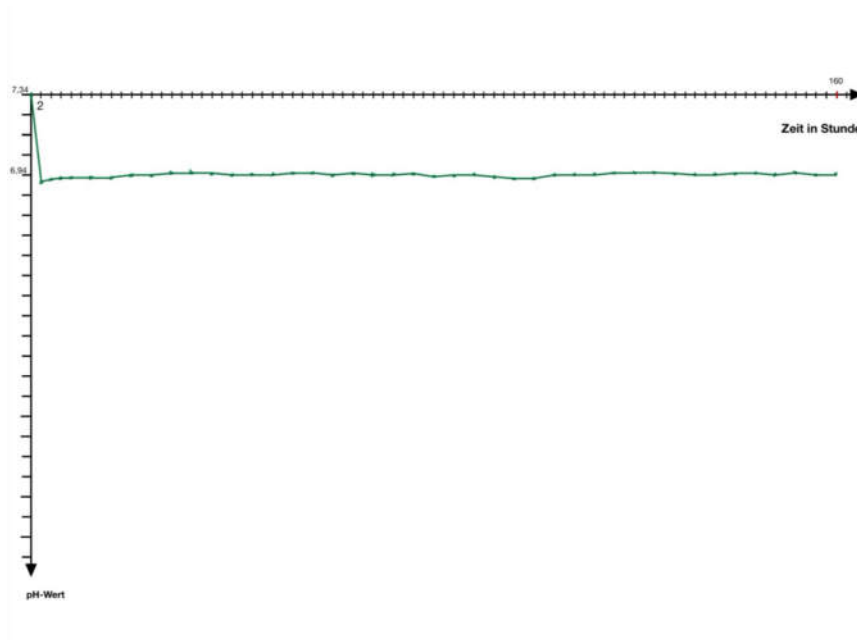


Abbildung 22: Verlauf pH-Wert (1 Woche)

Der pH-Wert startete bei 7,34 und sank in den ersten zwei Stunden auf 6,89. Dieser Wert hielt sich ebenfalls konstant bis zum Ende des Messintervalls.

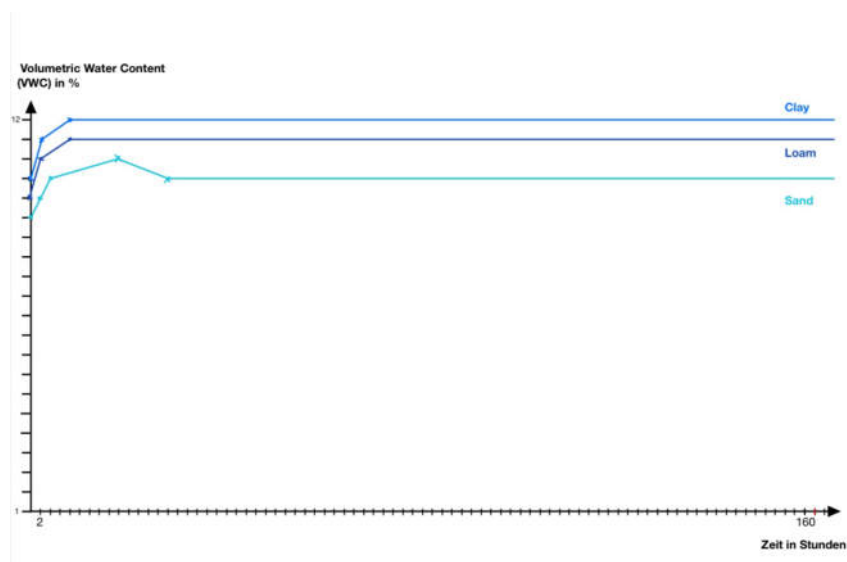


Abbildung 23: Verlauf Feuchtigkeit (1 Woche)

Diese drei Graphen zeigen den Verlauf der Feuchtigkeit des Bodens, jedoch für drei unterschiedlichen Untergrundklassen. Da Humus (hier: Komposterde) neben abgestorbener Bodensubstanz hauptsächlich aus Lehmerde (Loam) und fragmental

aus Sand und Ton/Lehm (Clay) besteht, ist es wichtig alle drei Verläufe zu analysieren. Die Einheit VWC (Volumetric Water Content) beschreibt das Verhältnis zwischen Untergrund und Wasser. Zum Beispiel bedeutet VWC=12%, dass der Untergrund zu 12 % aus Wasser besteht. Alle drei Graphen verlaufen ähnlich, zuerst steigt der VWC 8 Stunden (Clay u. Loam) und 18 Stunden (Sand), auf ihren Höchstwert. Dieser Wert bleibt bis zum Abschluss des Messintervalls konstant bestehen.

8.6 Fazit

Inwiefern lassen sich also die aufgestellten Prognosen verifizieren oder falsifizieren? Aus allgemeiner Sicht lässt sich bestätigen, dass manche Biokunststoffe vollständig, teilweise oder gar nicht abgebaut wurden. Die These, dass der Bioabbau in Box 1 unter optimalen Bedingungen am schnellsten verläuft, ist auch bestätigt. Aus spezifischer Sicht ist zu erfassen, dass Proben zwei und vier gemäß der Prognose vollständig abgebaut wurden. Ebenfalls in Einklang mit den vorangestellten Erwartungen, wurde Probe fünf überhaupt nicht zersetzt und Probe eins erfuhr optische Veränderungen. Wider Erwarten unterlag Probe drei keineswegs dem Bioabbau und zeigte keinerlei Veränderung. Dadurch erfüllt die experimentelle Untersuchung der Kompostierbarkeit von Biokunststoffen bereits ihr Ziel, die undurchsichtigen Angaben der Hersteller abzubilden. Die Verlässlichkeit von Herstellerangaben ist gering und sollte nur im Zusammenhang mit zertifizierten Siegeln (s. Kapitel 10) beachtet werden. Dennoch ist das Potenzial der Biokunststoffe, in der Umwelt zersetzt zu werden an zwei Proben ersichtlich. Doch auch wenn die Kunststoffe zersetzt werden, welche ökologischen Auswirkungen lassen sich daraus ableiten? Da der Temperaturverlauf hauptsächlich durch außen (Umgebungstemperatur) bedingt ist, konzentrieren wir uns auf den pH-Wert und die Feuchtigkeit. Der pH-Wert sinkt innerhalb einer Woche (demzufolge auch über den gesamten Versuchsablauf). Das bedeutet die Konzentration an H_3O^+ -Ionen steigt, bzw. die Konzentration an OH^- -Ionen fällt. Diese Veränderung des pH-Werts resultiert in unserem Versuch hauptsächlich auf dem Verdunsten des zu Anfang hinzugegebenen Wassers. Doch auch der biologische Abbauprozess kann zu einer Veränderung des Boden pH-Wertes führen, welche sich als kritisch für viele Ökosysteme erweist (vgl. Wurmitsch 2020). Dieser Einflussfaktor auf den pH-Wert ist in der experimentellen Untersuchung nicht in relevantem Maße nachweisbar. Die Feuchtigkeit hingegen wird spürbar erhöht, da beim Bioabbau die Kunststoffe unter anderem in Wasser umgewandelt werden. Diese Entwicklung ist unproblematisch.

Trotz alldem stellt die experimentelle Untersuchung dieser Seminararbeit keinen Anspruch der absoluten Gültigkeit (gegenüber den untersuchten Proben), sondern dient als neutrale Bestandsaufnahme der ausgewählten Proben, die als Spiegel der aktuellen Situation interpretiert werden kann

9 Marktsituation der Biokunststoffe

Stand 2019 machten Biokunststoffe 1% des globalen Kunststoffmarktes aus (vgl. Thielen 2020). Während in der jungen Vergangenheit chemisch neuartige Biopolymere den Markt dominierten, erfahren Drop-in Biokunststoffe aktuell höchste Beliebtheit. Mitverantwortlich für diese Entwicklung ist die Tatsache, dass Drop-in Biokunststoffe in großer Menge produziert werden können, sodass sie mit ihren konventionellen Pendanten preistechnisch konkurrieren. Dennoch ist die Wachstumsprognose für die nächsten Jahre ernüchternd und prognostiziert maximal einen 2%- Anteil an der globalen Kunststoffindustrie (vgl. Thielen 2020) (s. Abbildung 24). Technisch wäre eine Erhöhung des Marktanteils der Biokunststoffe auf 90% möglich. Diese Umstellung ist jedoch ausschließlich langfristig zu erreichen, denn kurz- bzw. mittelfristig sind Neubauten von Produktionsstätten wirtschaftlich unrealisierbar, da finanzielle Einbußen diese Transformation unattraktiv machen. Im Übrigen ist auch die kurzfristige Verfügbarkeit der Biomasse beschränkt.



Abbildung 24: Weltweite Produktionskapazitäten Biokunststoffe (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2020)

10 Greenwashing und ökologische Überschätzung

Egal ob bei Lebensmitteln, Kleidung, Kosmetikartikeln oder Kunststoffen, das Präfix „Bio“ suggeriert Käufern, eine umweltschonende Produktion, hohe Qualität und ein schafft ein reines Gewissen. Nur bei Lebensmitteln ist das Werben mit „Bio“ oder „Öko“ rechtlich geschützt (vgl. Umweltbundesamt 2023). In allen anderen Fällen können die Begriffe von jedem Hersteller, für jegliche Art von Produkt verwendet werden.

Durch das zunehmende Umweltbewusstsein der Gesellschaft fließen solche Werbeversprechen spürbar in Kaufentscheidungen ein. Die rechtlich „schwammige“ Lage birgt auch im Fall der Kunststoffe die Gefahr in sich auf Verbrauchertäuschung reinzufallen. Außerdem resultiert die falsche Einschätzung der Verbraucher aufgrund des Mangels an Aufklärung über die ökologische Bilanz der Biopolymere in einer deutlichen ökologischen Überschätzung der Umweltfreundlichkeit der Produkte. So mag es dem Verbraucher scheinen, als wäre bspw. seine neue Biokunststoffflasche nach höchsten ökologischen Standards hergestellt worden und könne in der Natur problemfrei zersetzt werden. Doch wie in Kapitel 7.2 erwähnt, ist der Begriff des Biokunststoffs sehr vielschichtig. Die potenziell falsche Entsorgung ist ein für die Natur und Abfallindustrie ernstzunehmendes Problem. Das legt nahe, dass sich in vielen Fällen eine thermische Verwertung der Biokunststoffe als sinnvoller erweist. Ein Lichtblick am Ende des Tunnels sind Zertifizierungslogos, die gemäß der Definition in Kapitel 7.5 eine Kompostierbarkeit garantieren.

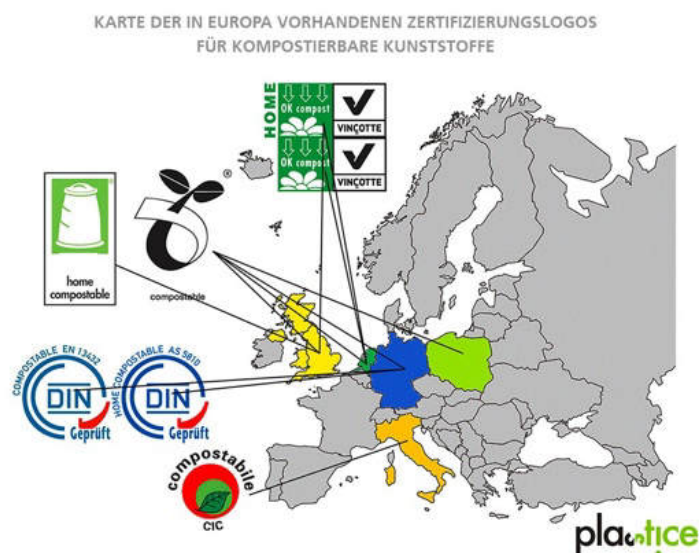


Abbildung 25: Karte der in Europa vorhandenen Zertifizierungslogos für kompostierbare Kunststoffe (Kabasci 2022)

11 Zukunftsaussichten der Biokunststoffe

Obwohl Biokunststoffe am Anfang der Geschichte der Kunststoffe stehen, rutschen sie bis in die 1980er Jahre in die Bedeutungslosigkeit ab. Doch gerade der Grund für ihr plötzliches Wiederaufleben ist die Ursache der langfristigen Perspektive der Biokunststoffe. Sie bestehen aus regenerativen Rohstoffen und machen das Loslösen der Industrie von fossilen Rohstoffen theoretisch möglich. Indessen muss über die Klassifizierung der Biokunststoffe und die damit einhergehenden Typen informiert werden, sodass ökologische Überschätzung vermieden wird. Neben der

Verbraucherseite ist es auch unumgänglich an der Produzentenseite mittels Regularien und klarem Schützen von Begriffen wie „Biokunststoffe“ und „biologisch abbaubar“ anzusetzen, um Greenwashing und gezielte Fehlinformation der Konsumenten zu verhindern. Die angestellte experimentelle Untersuchung dient gleichermaßen als aktueller Spiegel der Situation, in der nicht alle Biokunststoffe das Kriterium der biologischen Abbaubarkeit erfüllen, obwohl sie damit beworben wurden.

12 Schlussbemerkung

Für uns als Verbraucher lässt sich aus den dargestellten Fakten ein vernünftiger Umgang mit Biokunststoffprodukten ableiten. Zuerst müssen wir das zu betrachtende Produkt in eine der vier Biokunststoffklassen einteilen. Diese Einteilung impliziert klar, wie und wo der Stoff entsorgt werden muss und wie er sich zusammensetzt. Obwohl diese Seminararbeit vor allem das Potenzial (ressourcenschonend, kompostierbar, geringerer CO₂-Ausstoß usw.) der Biokunststoffe herausarbeitete, ist es unumgänglich zu wiederholen, dass sowohl gesetzlich als auch industriell noch viele Schritte gegangen werden müssen, um Biokunststoffe gesamtbilanziell wahrhaftig umweltfreundlicher zu machen. Mit einem Blick auf die zukünftige Entwicklung lässt sich spekulieren, dass die Transformation aufgrund der Wasserintensität des Rohstoffanbaus und der benötigten Agrarflächen schwer umsetzbar ist und sogar neue Probleme schafft. Die Produktion ist außerdem sehr energieintensiv und steht durch die Verwendung von Agrarflächen in direkter Konkurrenz mit der Lebensmittelproduktion. Zusätzlich ist das angesprochene Problem der falschen Entsorgung zunehmend dramatisch. Summa summarum sind Biokunststoffe kein Freibrief so viel Kunststoff zu verwenden wie es einem beliebt, sondern es gilt ganz klar die Devise „Vermeidung statt verschobenem Konsum“.

13 Literaturverzeichnis

- Menges, G., Dahlmann, R. & Haberstroh, R. 2022: Menges Werkstoffkunde Kunststoffe, Carl Hanser Verlag, München
- Wurmitsch, J. 2020: Biopolymere: vom Naturstoff zum Kunststoff, Karl-Franzens-Universität, Graz
- Schröter, S. 2019: Depolymerisation polyolefinischer Kunststoffe, Hochschule, Merseburg
- Kunststoffe.de-Team 2023: Polylactid (PLA), <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polylactid-pla-264462/> abgerufen am 04.08.2023
- Neumaier, C., Trischler, H. & Kopper, C. 2018: Visionen-Räume-Konflikte: Mobilität und Umwelt im 20. und 21. Jahrhundert, Zeithistorische Forschungen, 2018/14 (3): 403- 419
- Rummel, C. 2021: Ecotoxicological and Microbial Studies on Weathering Plastic, Eberhard Karl Universität, Tübingen
- Sprenger, A. 2020: Freisetzung von Schadstoffen in die Umwelt durch desintegration von biologisch abbaubaren Kunststoffen, Hochschule für Angewandte Wissenschaft, Hamburg
- Knippers, J. 2015: Anwendungsmöglichkeiten biobasierter Kunststoffe im Innen- und Außenraum von Gebäuden, Universität Stuttgart, Stuttgart
- Thielen, M. 2020: Biokunststoffe: Pflanzen, Rohstoffe, Produkte, fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), Gülzow-Prüzen
- KRV 2023: Monomere, <https://www.krv.de/> abgerufen am 02.11.2023
- Agerer, M. 2020: Polymere, <https://www.maschinenbau-wissen.de/div/impressum.php/> abgerufen am 02.11.2023
- TU-Dresden 2018: Chemische Definition der Kunststoffe, https://tu-dresden.de/mn/chemie/mc/mc1/ressourcen/dateien/studium/archiv/mc_ii_2?lang=en/ abgerufen am 02.11.2023
- Uni Kiel 2018: Perfekte Kristalle, https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_3/backbone/r3_1_1.pdf/ abgerufen am 02.11.2023
- Deutsches Kunststoffmuseum 2023: Drei Gruppen von Polymeren, <https://www.deutsches-kunststoff-museum.de/kunststoff/einfuehrung/polymere-additive/> abgerufen am 02.11.2023

Umweltbundesamt 2021: Verarbeitungsmenge Kunststoffe,
<https://www.umweltbundesamt.de/bild/anteil-relevanter-branchen-an-der/> abgerufen
am 02.11.2023

Statista 2021: weltweite und europäische Kunststoffproduktion,
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/> abgerufen am 02.11.2023

BUND 2022: Bio-Kunststoffe,
https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/chemie_biokunststoffe_hintergrund.pdf/ abgerufen am 02.11.2023

Fraunhofer 2022: Zertifizierung kompostierbare Kunststoffe,
<https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/ueber-fraunhofer-umsicht/nachhaltigkeit/nationale-informationsstelle-nachhaltige-kunststoffe/zertifizierung/> abgerufen am 02.11.2023

Chemie.de 2023: Inerte Substanz,
https://www.chemie.de/lexikon/Inerte_Substanz.html/ abgerufen am 02.11.2023

Umweltbundesamt 2023: Präfix Bio, <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/essen-trinken/biolebensmittel#gewusst-wie/> abgerufen am 02.11.2023

Spektrum der Wissenschaft 2023: zweiter Hauptsatz der Thermodynamik,
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/zweiter-hauptsatz-der-thermodynamik/>
abgerufen am 02.11.2023

Spektrum der Wissenschaft 2023: abiotische Faktoren,
<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/abiotische-faktoren/156/> abgerufen am
02.11.2023

Spektrum der Wissenschaft 2023: biotische Faktoren,
<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/biotische-faktoren/8827/> abgerufen am
02.11.2023

Spektrum der Wissenschaft 2023: Persistenz,
<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/persistenz/50452/> abgerufen am
02.11.2023

Mopack 2023: milchtrübe Folie, <https://www.mopack.de/flexible-folienverpackungen/biofolien/> abgerufen am 02.11.2023

Repaq 2023: Salatfolie, <https://www.repaq.eu/> abgerufen am 02.11.2023

Gepa 2023: Teekuvert, <https://www.gepa.de/service/faq/2-achtet-die-gepa-auch-bei-ihren-verpackungen-auf-umweltvertraeglichkeit.html/> abgerufen am 02.11.2023

Bioeinweggeschirr 2023: Biokunststoff Becher, <https://www.bioeinweggeschirr.de/>
abgerufen am 02.11.2023

14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Biokunststoffe Karikatur (Deutsche Umwelthilfe 2020)	1
Abbildung 2: Beispiel monomeres Ethen (KRV 2023)	
Abbildung 3: monomeres Vinylchlorid (KRV 2023)	5
Abbildung 4: Polyethen (Maschinenbau- Wissen 2023)	
Abbildung 5: Polyvinylchlorid (Maschinenbau-Wissen 2023)	6
Abbildung 6: Aufbau der Makromoleküle- Fadenmodell (TU Dresden 2016)	6
Abbildung 7: Möglichkeiten einer raumfüllenden Anordnung (Technische Fakultät Universität Kiel 2018)	7
Abbildung 8: Drei Gruppen von Polymeren (Deutsches Kunststoffmuseum 2023)	8
Abbildung 9: Anteil relevanter Branchen an der Verarbeitungsmenge Kunststoffe 2021 (Neuware und Rezyklat) (Umweltbundesamt 2023)	10
Abbildung 10: Weltweit produzierte Kunststoffmenge (Statista 2021)	11
Abbildung 11: Einteilung der Kunststoffe nach Herkunft (fossil oder Biobasiert) sowie nach biologischer Abbaubarkeit (BUND 2022)	15
Abbildung 12: Strukturformeln D-/L- Milchsäure sowie L,L-Lactid, meso- Lactid, D,D-Lactid (Elsevier 2010)	17
Abbildung 13: Strukturformel PHA (Researchgate.net 2023)	18
Abbildung 14: Ausschnitt eines Amylopektinpolymers (links) und eines Amylasepolymers (rechts) (Lexikon der Biologie 2023)	18
Abbildung 15: Prozess des Bioabbaus Kunststoff (Wurmitsch 2020)	21
Abbildung 16: Dokumentation Lebewesen in Komposterde	23
Abbildung 17: Grundlegender Aufbau der praktischen Untersuchung	24
Abbildung 18: 5 Biokunststoffproben (1=links; 5=rechts)	26
Abbildung 19: Verlauf Box 1	26
Abbildung 20: Verlauf Box 2	27
Abbildung 21: Temperaturverlauf (1 Woche)	28
Abbildung 22: Verlauf pH-Wert (1 Woche)	29

Abbildung 23. Verlauf Feuchtigkeit (1 Woche).....	29
Abbildung 24: Weltweite Produktionskapazitäten Biokunststoffe (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2020)	31
Abbildung 25: Karte der in Europa vorhandenen Zertifizierungslogos für kompostierbare Kunststoffe (Kabasci 2022)	32

15 Eidesstaatliche Erklärung

Ignaz-Günther-Gymnasium



Seminararbeit

Erklärung der eigenständigen Erstellung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Bad Aibling, 02.11.2023
Ort, Datum

D. Ganderich
Unterschrift des Verfassers/der Verfasserin

