



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Kosten-Effektivitäts-Analyse von Bioplastik“

verfasst von

Emina Dugonjic

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 066 915

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Masterstudium Betriebswirtschaft

Betreuer:

O.Univ.-Prof. Dr. Kurt Heidenberger

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Wien, am

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xiii
1. Einleitung.....	1
2. Biokunststoffe	5
2.1. Begriffserläuterung „Biokunststoffe“	5
2.2. Arten von Bioplastik und Anwendungsgebiete	6
2.2.1. Stärkebasierte Kunststoffe	8
2.2.2. Cellulose Kunststoffe	11
2.2.3. Polymilchsäure (PLA)	12
2.2.4. Polyhydroxyalkanoate (PHA)	13
2.2.5. Anwendungsgebiete	14
2.3. Vorteile und Nachteile von Bioplastik	16
2.3.1. Nutzung nachwachsender Rohstoffe und die Erdölförderung.....	17
2.3.2. Emission von Treibhausgasen.....	19
2.3.3. Gesundheitliche Risiken	20
2.3.4. Kompostierbarkeit	21
2.4. Normen, Zertifizierung und Kennzeichnung von Biokunststoffen	23
3. Der Kunststoffmarkt.....	25
3.1. Aktuelles Marktpotenzial und Prognosen	25
3.2. Einflussfaktoren	28
3.2.1. Marktantreibende Faktoren	28
3.2.2. Markthemmende Faktoren	32

3.2.3.	Greenwashing	34
3.3.	Unternehmen/Akteure.....	35
3.3.1.	Zentrale Akteure (Unternehmen, Zulieferer, Hersteller).....	35
3.3.2.	Orientierungsgebende Länder	36
3.3.3.	Zusammenarbeit in der Biokunststoffbranche	37
3.4.	Bioplastikmarkt Österreich.....	38
4.	Umweltökonomie	41
4.1.	Bewertung der Umwelt: Konzepte	41
4.1.1.	Das wirtschaftliche Konzept der ökologischen Bewertung	43
4.1.2.	Zahlungsbereitschaft und Kompensationsbereitschaft	44
4.2.	Bewertung der Umwelt: Methoden	45
4.2.1.	Ansätze anhand von Entscheidungen am Markt	45
4.2.2.	Ansätze anhand von politischen Entscheidungen	49
4.2.3.	Finanzwirtschaftliche Bewertungen	50
4.3.	Ökobilanz von Biokunststoffen	52
4.4.	Abfallwirtschaft von Biokunststoffen.....	53
4.4.1.	Recycling	54
4.4.2.	Verbrennung mit Energierückgewinnung.....	55
4.4.3.	Deponie	56
4.4.4.	Biologische Abfallbehandlung.....	56
5.	Kosten-Effektivitäts-Analyse von Biokunststoffen	59
5.1.	Modellbeschreibung.....	59
5.2.	Analyse	61
5.2.1.	Zielanalyse.....	61
5.2.2.	Nebenbedingungen.....	62
5.2.3.	Bestimmung der Alternativen.....	62

5.2.4.	Kostenanalyse.....	63
5.2.5.	Wirksamkeitsanalyse	74
5.2.6.	Zeitliche Homogenisierung.....	78
5.2.7.	Berücksichtigung von Ungewissheiten.....	79
5.2.8.	Ergebnisse der Analyse.....	79
5.3.	Interpretation der Ergebnisse.....	94
6.	Conclusio	97
	Quellenverzeichnis	99
	Appendix A: Abstract	109
	Appendix B: Abstract	111
	Appendix C: Lebenslauf	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht biologisch abbaubarer Kunststoffe am Markt	8
Tabelle 2: Die wichtigsten Biokunststoffhersteller	36
Tabelle 3: Übersicht der Kunststoffpreise	74
Tabelle 4: Zusammenfassung der Auswirkungsparameter für die KEA	75
Tabelle 5: Kosten-Wirksamkeits-Matrix	81
Tabelle 6: ICER der Kategorie Energiebedarf	84
Tabelle 7: ICER der Kategorie Erderwärmung	85
Tabelle 8: ICER der Kategorie Versäuerung	86
Tabelle 9: ICER der Kategorie Eutrophierung	88
Tabelle 10: ICER der Kategorie photochemische Ozonbildung	90
Tabelle 11: ICER der Kategorie abiotischer Abbau	91
Tabelle 12: ICER der Kategorie Humantoxizität	93

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arten von Biokunststoffen	7
Abbildung 2: Weltweite Produktionskapazitäten von Biokunststoffen nach Anwendungsgebieten.....	15
Abbildung 3: Historischer Verlauf der statischen Reichweite von 1945-2010 im Vergleich mit der Entwicklung der weltweiten Reserven und Förderung von Erdöl	18
Abbildung 4: Idealer Lebenszyklus von Bioplastik.....	22
Abbildung 5: Kennzeichnungen für biobasierte Kunststoffe.....	23
Abbildung 6: Produktionskapazitäten von herkömmlichen Kunststoffen in Europa	26
Abbildung 7: Produktionskapazitäten von Biokunststoffen in Europa	27
Abbildung 8: Globale Produktionskapazitäten von Biokunststoffen (2009-2016).....	28
Abbildung 9: Weltweite Produktionskapazitäten von Biokunststoffen nach Region	37
Abbildung 10: Beziehung zwischen Mensch, Wirtschaft und Natur	42
Abbildung 11: Integration von Biokunststoffen mit den Entsorgungsinfrastrukturen	54
Abbildung 12: Herstellungsverfahren von Thermoplastischer Stärke	64
Abbildung 13: Herstellungsverfahren von Polymilchsäure (PLA).....	66
Abbildung 14: Herstellungsverfahren von Polyhydroxyfettsäure (PHB)	67
Abbildung 15: Herstellungsverfahren von HDPE	69
Abbildung 16: Herstellungsverfahren von Polypropylen	71
Abbildung 17: Herstellungsverfahren von Polyäthylenterephthalat (PET)	72
Abbildung 18: Vergleich der Auswirkungsparameter der berücksichtigten Kunststoffe anhand normalisierter Werte	78
Abbildung 19: Kosten-Wirksamkeits-Ebene	83
Abbildung 20: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für Energiebedarf	84
Abbildung 21: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für Erderwärmung	86
Abbildung 22: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für Versäuerung.....	87
Abbildung 23: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für Eutrophierung.....	89
Abbildung 24: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für photochemische Ozonbildung	90
Abbildung 25: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für abiotischer Abbau	92
Abbildung 26: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für Humantoxizität	93

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
€/kg	Euro pro Kilogramm
BHET	Bishydroxyethylterephthalat
CA	Acetylcellulose
CAB	Celluloseacetobutyrat
CAP	Celluloseacetopropionat
CCUR	Center for Crops Utilization Research
CD	Compact Disc
CO ₂	Kohlendioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMT	Dimethylterephthalat
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
f.	folgende Seite
ff.	fortfolgende Seite
HDPE	Polyethylen hoher Dichte
ICER	Inkrementeller Kosten-Effektivitäts-Ratio
ISU	Iowa State University
kg/m	Kilogramm pro Meter
km ²	Quadratkilometer
KEA	Kosten-Effektivitäts-Analyse
LDPE	Polyethylen niedriger Dichte
Mio.	Millionen
MPa	Megapascal
N ₂ O	Distickstoffmonoxid
PA	Polyamid
PET	Polyethylenterephthalat
PETE	Terephthalat
PLA	Polymilchsäure

PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PTA	Terephthalsäure
TPS	Thermoplastische Stärke
USDA	United States Department of Agriculture

1. Einleitung

Kunststoffe sind wichtige Materialien und Werkstoffe, welche aus der heutigen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken sind. Ursprünglich galten sie als mittelmäßige Alternativen zu Seide, Kautschuk, Elfenbein und anderen natürlichen Materialien, wurden aber schnell als fortschrittliches Material entdeckt, welches die Entwicklung neuer Technologien ermöglichte. Durch ihre einzigartigen Eigenschaften, wie zum Beispiel einfache Verarbeitung, geringes Gewicht, Bruchfestigkeit und gutes Preis/Leistungsverhältnis sind Kunststoffe in sehr vielen Anwendungsbereichen zu finden. Diese sind unter anderem Verpackungen, Baumaterialien, Fasern, Rohre, sowie Bauteile für die Automobilindustrie (Mülhaupt 2013, S.160f.).

Im Vergleich zu Metallen und Keramik, benötigt die Herstellung von Kunststoffen viel weniger Energie und Dank der Substitution dieser Materialien in bestimmten Anwendungsgebieten durch Plastik kann eine Energieeffizienz erreicht werden. Kunststoffabfälle können recycelt und wiederverwendet werden, dienen aber ebenso als Ersatz für Kraftstoffe in Verbrennungsanlagen und als Rohstoff für die Herstellung von Chemikalien oder Monomeren (Grundbausteinen). Zusammengefasst haben Kunststoffe wie kein anderes Material zur Verbesserung der Lebensqualität, des Gesundheitszustandes und des technologischen Fortschritts in der modernen Gesellschaft beigetragen (Mülhaupt 2013, S.161).

Trotz der genannten Vorteile, haben sich im Laufe der Zeit auch viele Probleme in Zusammenhang mit der Verwendung beziehungsweise Herstellung von Kunststoffen herauskristallisiert. Das Fördermaximum von Erdöl rückt immer näher, infolgedessen werden die Ölpreise immer höher, was sich negativ auf die Kosteneffektivität und Wettbewerbsfähigkeit von Kunststoffen auswirken kann (Mülhaupt 2013, S.161). Aufgrund der jährlich ansteigenden Verbrauchs- und Produktionszahlen von Kunststoffen, werden die Folgen auf die Umwelt mit Sorge betrachtet. Heutzutage basiert die überwiegende Mehrheit aller hergestellten Kunststoffe auf Erdöl, welches ein nicht erneuerbarer Rohstoff ist. Obwohl nur fünf Prozent (%) aller Erdölreserven in der Kunststoffverarbeitung eingesetzt werden, stellt die Erneuerbarkeit der Rohstoffe oft ein Problem dar, da fossile Brennstoffe mehrere Millionen Jahre brauchen um sich zu regenerieren. Auch aufgrund der hohen Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen

bei der Plastikerzeugung und des damit verbundenen Klimawandels, gerät die Plastikindustrie immer häufiger in Kritik (Momani 2009, S.12f.).

Die Abfallbeseitigung von Kunststoffen stellt ein weiteres Problem dar. Eine große Menge an Abfällen landet in den Weltmeeren (Greenpeace 2009). Laut Greenpeace (2009) werden jährlich zehn Prozent der gesamten Plastikproduktion in den Ozeanen deponiert, was zum Sterben vieler Meerestiere führt. Im Nordpazifik schwimmt eine Plastik- und Schmutzsammlung, bekannt auch als „Great Pacific Garbage Patch“ in der Größe von über 600.000 Quadratkilometer (km²). Des Weiteren wird nur ein sehr kleiner Prozentsatz der Kunststoffe recycelt, da die Trennung der verschiedenen Arten von petroleumbasierten recycelbaren Kunststoffen aus anderen festen Abfällen einen schwierigen und arbeitsintensiven Prozess darstellt (Kuruppilil 2011, S.59).

Doch nicht nur die Abfallbeseitigung, sondern auch die Verwendung von Plastik im alltäglichen Gebrauch birgt einige gesundheitsschädliche Risiken. Kunststoffe werden oft als Verpackung von Lebensmitteln und Getränken genutzt. Bei dieser Verwendung kann es vorkommen, dass sich einzelne Chemikalien, die Kunststoffe beinhalten, lösen und sich auf die Lebensmittel übertragen. Die österreichische Umweltschutzorganisation, Global 2000, hat unter anderen, 2012 eine Studie durchgeführt, in welcher krebserregende Chemikalien in Babyflaschen nachgewiesen wurden (Global 2000 2012). Diese Chemikalien können sich auf die Milch übertragen, vor allem dann, wenn bestimmte Weichmacher bei der Plastikproduktion benutzt werden. Als Folge können Krebs, Vergiftungen und Störungen des Hormonsystems bei den Menschen entstehen (Momani 2009, S.13).

Aufgrund der obengenannten Kritikpunkte wächst immer mehr das Bewusstsein nach umweltfreundlicheren Alternativen. Biokunststoffe werden oft als mögliche Lösung der Bedenken bezüglich der Verwendung von traditionellen, erdölbasierten Kunststoffen dargestellt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine kritische Übersicht der Biokunststoffe und mögliche Empfehlungen für oder gegen den Einsatz von Biokunststoffen zu liefern. Es werden die verschiedenen Arten, die Anwendungsgebiete, Vor- und Nachteile, sowie der Kunststoffmarkt erörtert. Danach folgt ein Einblick in die Umweltökonomie und die Methoden zur Bewertung

der Umwelt. Anschließend kommt eine Beschreibung der Kosten-Effektivitäts-Analyse¹, als Instrument zur Unterstützung des Entscheidungsträgers². Zuletzt werden die Biokunststoffe Polyhydroxyalkanoate, thermoplastische Stärke sowie Polymilchsäure mit konventionellen Kunststoffen, mit Hilfe einer Kosten-Effektivitäts-Analyse (KEA), verglichen.

Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Das erste Kapitel liefert eine kurze Einleitung in das Thema und erklärt die Problemstellung sowie die Zielsetzung dieser Ausarbeitung.

Das zweite Kapitel erörtert den Begriff der Biokunststoffe und liefert die Hintergrundinformationen zu den unterschiedlichen Arten, Herstellungsverfahren, Anwendungsgebieten sowie den Vor- und Nachteilen von Biokunststoffen.

Das darauf folgende Kapitel befasst sich mit dem Kunststoffmarkt. Hier werden die Einflussfaktoren, sowie Trends und der aktuelle Stand des Biokunststoffmarktes im Vergleich zum traditionellen Kunststoffmarkt vorgestellt. Außerdem wird ein Einblick auf den österreichischen Standpunkt in Bezug auf Bioplastik geliefert.

Die Umweltökonomie wird im vierten Kapitel vorgestellt. In diesem Abschnitt werden die Konzepte und Methoden zur Beurteilung der Umwelt behandelt. In diesem Zusammenhang wird ein Vergleich zwischen fossilen Kunststoffen und Biokunststoffen, im Hinblick auf die Abfallwirtschaft geliefert, mit Augenmerk auf die verschiedenen Methoden der Abfallentsorgung, sowie deren Bewertung.

Im vorletzten Kapitel werden einzelne Biokunststoffe mit traditionellen Kunststoffen im Zuge einer Kosten-Effektivitäts-Analyse verglichen. Die Analyse wird in folgenden Schritten durchgeführt: Zielanalyse, Erfassung der Nebenbedingungen, Alternativen-Bestimmung, Kostenanalyse, Wirksamkeitsanalyse, zeitliche Homogenisierung, Ungewissheitsanalyse und Zusammenfassung der Ergebnisse mit einer Kosten-Wirksamkeitsmatrix, sowie Kosten-Wirksamkeits-Verhältnissen. Anschließend folgt eine Interpretation der Ergebnisse. Im letzten Kapitel werden alle Punkte der Arbeit nochmals zusammengefasst.

¹ Für die Kosten-Effektivitäts-Analyse wird in der Literatur auch der Begriff Kosten-Wirksamkeits-Analyse als Synonym verwendet. Auch in dieser Ausarbeitung werden beide Begriffe gleichwertig eingesetzt.

² In dieser Ausarbeitung erfolgt keine Geschlechterunterscheidung um eine leichte Lesbarkeit zu ermöglichen.

2. Biokunststoffe

Dieses Kapitel bietet eine allgemeine Einführung in das Gebiet der Biokunststoffe. Unter anderem werden einzelne Arten und verschiedene Eigenschaften genauer erklärt, die wichtigsten Anwendungsgebiete, deren aktueller Status, Vor- und Nachteile und andere damit zusammenhängende Fragen beantwortet.

2.1. Begriffserläuterung „Biokunststoffe“

Während herkömmliche Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden, basieren Biokunststoffe auf Biopolymeren beziehungsweise auf biologisch abbaubaren Polymeren. Biopolymere sind Polymere, welche aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden. Diese Rohstoffe sind unter anderem Stärke, Cellulose, natürliche Öle und Mikroorganismen. Manche Biokunststoffe unterscheiden sich von traditionellen Kunststoffen nur in der Herkunft des verwendeten Monomers, während andere einzigartig sind und keine Äquivalenten in der Gruppe der erdölbasierten Kunststoffe haben. Polymilchsäure (PLA) gilt beispielsweise als möglicher Ersatz von Polyethylene Terephthalat (PETE), Polystyren (PS) und Polypropylen (PP) (Momani 2009, S.16).

Der Verband European Bioplastics (2012h) unterscheidet zwischen biobasierten und biologisch abbaubaren Kunststoffen. Biobasierte Kunststoffe werden vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, während biologisch abbaubare Kunststoffe auch aus fossilen Rohstoffen bestehen können, jedoch nach einer bestimmten Zeit und unter bestimmten Umständen zu CO₂, Wasser und Biomasse zerfallen. Die biologische Abbaubarkeit bezeichnet chemische und biologische Prozesse, bei denen Materialien in ihre Bestandteile zersetzt werden, dies hängt von der chemischen Struktur des Materials ab. Nach der europäischen Norm (EN) 13432 muss ein Material innerhalb von sechs Monaten zu 90% zu CO₂ zersetzt sein, um als biologisch abbaubar zu gelten (BPIWorld o.J.). Auch Materialien, welche aus erdölbasierten Rohstoffen bestehen, zählen zur Gruppe der Biokunststoffe, wenn sie diese Voraussetzungen erfüllen. Außerdem ist zu beachten, dass nicht alle biobasierten Kunststoffe biologisch abbaubar sind und umgekehrt auch nicht alle biologisch abbaubaren Kunststoffe biobasiert sind (European Bioplastics 2012h).

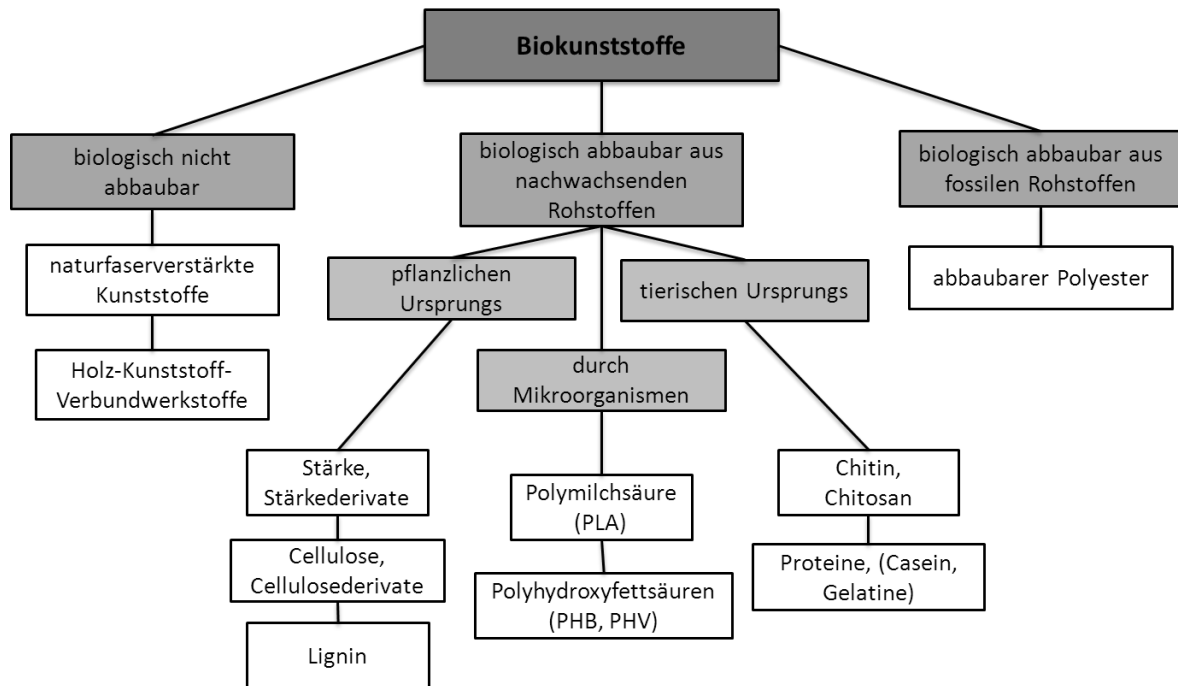
Der erste Biokunststoff wurde bereits 1868 von John W. Hyatt, durch die Bearbeitung von Celluloid aus Holzzellstoff, Pflanzenfasern beziehungsweise Baumwollfasern mit Stickstoff und Campher entwickelt. Durch die Behandlung von Cellulose mit verschiedenen Säuren und Lösungsmitteln wurden auch kurz darauf Zellophan und Viskose hergestellt. Nichtsdestotrotz nahm die Geschichte der biobasierten Kunststoffe eine Wendung, als 1907 die ersten erdöl-basierten Kunststoffe auf den Markt kamen. Damals wurden Biokunststoffe zugunsten des konventionellen Plastiks fast vollständig verdrängt und bis auf Cellophan fanden sie keine weitere Anwendung (Kuruppilil 2011, S.59f.).

Heute, etwa 100 Jahre nach der Einführung von fossilen Kunststoffen, kehrt unsere Gesellschaft immer mehr zu den Ursprüngen zurück, in der Hoffnung die vielen Probleme, die der übermäßige Konsum von Kunststoffen mit sich gebracht hat, zu mildern.

2.2. Arten von Bioplastik und Anwendungsgebiete

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Biokunststoffe, welche derzeit auf dem Markt sind, detailliert vorgestellt. Folgende Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Typen von Biokunststoffen (Beier 2009, S.4):

Abbildung 1: Arten von Biokunststoffen



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Beier 2009, S.4.

Wie man anhand Abbildung 1 sehen kann, können biologisch abbaubare Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen in drei Gruppen unterteilt werden (Beier 2009, S.4):

- Biokunststoffe pflanzlichen Ursprungs
- Biokunststoffe mikroorganischen Ursprungs
- Biokunststoffe tierischen Ursprungs

Es gibt eine große Vielzahl von existierenden Biokunststoffen, jedoch werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit hauptsächlich biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe pflanzlichen und mikroorganischen Ursprunges erläutert, da diese das größte Marktsegment der Biokunststoffe darstellen. Die wichtigsten Grundstoffe pflanzlichen Ursprungs, aus denen Biokunststoffe hergestellt werden können, sind Stärke und Cellulose. Abhängig vom Rohstoff können verschiedene Endprodukte hergestellt werden, welche spezielle Eigenschaften besitzen und somit auch Alternativen zu unterschiedlichen herkömmlichen Plastikerzeugnissen darstellen (Beier 2009, S.4).

In der Gruppe der Biokunststoffe mikroorganischen Ursprungs müssen Polymilchsäure und Polyhydroxyfettsäuren erwähnt werden. Das besondere an diesen Kunststoffen ist, dass sie von Bakterien hergestellt werden, als chemische Energiespeicherung in Zellen. Diese sind außerdem vollständig biologisch abbaubar und in Gegenwart von Wasser kompostieren sie zu Wasser, CO₂ und Humus (Mülhaupt 2013, S.167).

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht, der in den folgenden Kapiteln näher beschriebenen Kunststoffe, der Hersteller und der Preise auf dem Markt.

Tabelle 1: Übersicht biologisch abbaubarer Kunststoffe am Markt

Produkt	Rohstoff	Grundstoff
Thermoplastische Stärke (TPS)/ Stärkeblends	Kartoffel, Weizen, Mais	Stärke
Zellglas	Holz	Cellulose
Polylactid (PLA)	Maisstärke	Milchsäure
Polyhydroxyfettsäure (PHB/PHA)	Stärke, Zucker	Glucose

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Beier 2009, S.5.

2.2.1. Stärkebasierte Kunststoffe

Stärke ist der größte Kohlenhydratspeicher bei Pflanzen und ist somit ein wichtiger nachwachsender Grundstoff. Die Rohstoffe aus denen Stärke gewonnen wird sind zum Beispiel Kartoffeln, Reis, Mais, Maniok, Tapioka und Weizen. Die meisten Stärkekunststoffe werden für Verpackungen verwendet, einschließlich löslichen Folien für industrielle Verpackungen, Folien für Beutel und Säcke, Komponenten für Fahrzeuge, elektrische Geräte, Haushaltsgeräte und andere langlebige Anwendungen. Neben der Kunststoffindustrie findet Stärke auch Anwendung in Verpackungen für Lebensmittel, Papier und Wellpappe, sowie in Chemikalien und Pharmazeutika. Im Vergleich zu diesen Anwendungsgebieten, stellen Stärkekunststoffe

einen kleinen Sektor dar, welcher aber, dank der soliden Eigenschaften, stetig wächst und sich schnell entwickelt (Shen, Haufe und Patel 2009, S.27).

Reine Stärke wird durch das Nassmahlverfahren der Ernte gewonnen und chemisch, thermisch und mechanisch weiterverarbeitet. Auch durch das Mischen mit anderen Copolymeren erhält man eine breite Palette von Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Hauptsächlich unterscheidet man fünf Hauptgruppen von Stärkekunststoffen (Shen, Haufe und Patel 2009, S.27f.):

- Destrukturierte beziehungsweise thermoplastische Stärke (TPS),
- Teilweise fermentierte Stärke,
- Chemisch modifizierte Stärke,
- Stärkeblends und
- Stärkemischungen

Der wichtigste Stärke-basierte Kunststoff ist *thermoplastische Stärke*, welcher den heutigen Bioplastikmarkt zu 80% abdeckt (Biokunststoffe.de o.J.b). Dieser ist biologisch abbaubar, entflammbar und kann in Fertigprodukten angewendet werden. Wegen der relativ geringen Kosten stellen diese Kunststoffe eine gute Alternative zu erdölbasierten Kunststoffen dar. TPS wird durch das Weiterverarbeiten von nativer Stärke in einem Extruder hergestellt. Um den Verarbeitungsprozess zu beschleunigen und die Eigenschaften der TPS zu stabilisieren können auch Additive und Weichmacher biologischen Ursprunges hinzugefügt werden. Dazu zählen Glycerin, Polyether und Harnstoff, welche die Funktion haben, die intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen zu reduzieren und durch die Verringerung der Wasseraktivität das mikrobielle Wachstum einzuschränken. Aufgrund von Hydrophilie und begrenzten mechanischen Eigenschaften, findet thermoplastische Stärke nur beschränkte Anwendung. Meistens wird es mit anderen Polymeren vermischt um weitere Stärkeblends herzustellen (Shen, Haufe und Patel 2009, S.29ff.). Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Arten von stärkebasierten Kunststoffen vorgestellt.

Teilweise fermentierte Stärke: Hier dienen Kartoffelabfälle aus der Lebensmittelindustrie als Rohstoff. Diese Stärkeart findet ihre Anwendung in weniger anspruchsvollen Bereichen wie Verpackungen und Freizeitartikeln (Shen, Haufe und Patel 2009, S.28ff.).

Chemisch modifizierte Stärke: Stärkekunststoffe mit einem hohen Anteil an reiner Stärke sind in hohem Maße wasserbindend und lösen sich leicht auf wenn sie in Berührung mit Wasser kommen. Um dieses Problem zu umgehen wird reine Stärke mit Chemikalien behandelt um damit Hydroxylgruppen durch Ester- beziehungsweise Ethergruppen zu ersetzen. Angesichts der aufwendigen Verarbeitung ist chemisch modifizierte Stärke sehr teuer und nicht weit verbreitet (Shen, Haufe und Patel 2009, S.30ff.).

Stärkeblends: entstehen durch die Verarbeitung von thermoplastischer Stärke, chemisch modifizierter Stärke und manchmal auch reiner Stärke mit erdölbasierten, biobasierten oder anorganischen Verbindungen. Dabei kann der Stärkeanteil in diesen Materialien zwischen 30%-80% betragen. Die meisten Stärkeblends sind teilweise biobasiert und vollständig biologisch abbaubar. Diese werden hauptsächlich für Verpackungen und biologisch abbaubare Biomüllbeutel für Grünabfälle eingesetzt. Durch den Einsatz von petrochemischen Copolymeren wie Polypropylen und Polyurethan kann man teilweise biobasierte aber biologisch nicht abbaubare Stärkeblends herstellen (Shen, Haufe und Patel 2009, S.31ff.).

Stärkemischungen: werden durch das Mischen von reiner Stärke mit einer oder mehreren Komponenten mit deutlich unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften hergestellt. Im Vergleich zu Stärkeblends ist der Markt der Stärkemischungen relativ klein mit wachsender Tendenz. Angewendet werden sie als Ersatz von haltbaren Kunststoffen wie Compact Disc (CD)-Hüllen und höherwertiger Unterhaltungselektronik (Shen, Haufe und Patel 2009, S.32).

Die wichtigsten Hersteller von stärkebasierten Kunststoffen sind Novamont S.p.A. (Italien), Biotec (Deutschland), BIOP Biopolymer Technologies (Deutschland), LIVAN (China), Plantic (Australien) und Cereplast (Vereinigte Staaten). Etwa 75% der weltweiten Produktion von stärkebasierten Kunststoffen werden in Europa hergestellt, während der Rest in Nordamerika und Asien produziert wird. Die Kosten in Europa bewegen sich zwischen zwei und fünf Euro pro Kilogramm (€/kg) während sie in den Vereinigten Staaten (USA) etwas niedriger ausfallen, umgerechnet etwa €2,30³ pro Kilogramm betragen. Der größte Kostentreiber ist die Modifikation der Stärke, welche laut Zukunftsprognosen jedoch sinken sollte (Shen, Haufe und Patel 2009, S.38ff.). Das Herstellungsverfahren, sowie -kosten von stärkebasierten

³ Wechselkurs der Europäischen Zentralbank am 23.04.2013 1\$=1,299€

Kunststoffen, im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffen, werden im Rahmen der Kosten-Effektivitäts-Analyse im Kapitel 5.2.4. näher erläutert.

2.2.2. Cellulose Kunststoffe

Ein weiterer nachwachsender Rohstoff, der für die Herstellung von Biokunststoffen eingesetzt wird, ist Cellulose. Als Hauptbestandteil von pflanzlichen Zellwänden ist Cellulose im Überfluss vorhanden. Neben dem Einsatz für Bioplastik, wird dieser Rohstoff ebenso bei der Herstellung von Papier, Reinigungsmitteln, Medikamenten, Kosmetik, Textilien und Lebensmitteln verwendet (Shen, Haufe und Patel 2009, S.43ff.).

Cellulose Polymere werden durch Extraktion oder chemische Modifikation der natürlichen Cellulose hergestellt, welche aus Holz oder kurzen Baumwollfasern gewonnen wird. Es wird zwischen drei Gruppen von Cellulose Polymeren unterschieden: Celluloseester, welches wiederum organisch und anorganisch sein kann, Celluloseether und regenerierte Cellulose. Für die Plastikherstellung werden hauptsächlich organische Celluloseester und regenerierte Cellulose verwendet (Shen, Haufe und Patel 2009, S.43ff.).

Organische Celluloseester: Die wichtigsten Produkte der organischen Celluloseester sind Acetylcellulose (CA), Celluloseacetopropionat (CAP) und Celluloseacetobutyrat (CAB). Diese werden durch das Bearbeiten von Cellulose mit Essigsäureanhydrid beziehungsweise Buttersäure und Propansäure und weiteren Chemikalien hergestellt. Celluloseester sind kristallklar, hart, kratzfest, leicht färbbar und haben antistatische Eigenschaften (Shen, Haufe und Patel 2009, S.45ff.).

Regenerierte Cellulose: Der wichtigste Cellulosederivat und ebenso der größte biobasierte Polymer weltweit ist regenerierte Cellulose. Ein klassisches Verfahren der Celluloseregenerierung nennt sich Viskoseverfahren und wird angewendet, um Zellglasfolien und Zellulosefasern herzustellen. Weitere Verfahren, welche angewendet werden, sind das Modal- und Lyocellverfahren. Viskosefasern haben eine hohe Feuchtigkeitsaufnahme, trocknen schnell, gehen nicht ein unter Temperaturbehandlung und sind biologisch abbaubar (Shen, Haufe und Patel 2009, S.45f.).

Zu den wichtigsten Herstellern zählen: Lenzing (Österreich), Birla (Indien), Kelheim Fibers (Deutschland), Formosa Chemicals & Fibre (Taiwan), Enka (Deutschland) und Glanzstoff (Österreich). Durch den komplexen Herstellungsprozess sind die Preise für Cellulose Plastik relativ hoch und bewegen sich zwischen 3,00 - 7,00€/kg (Shen, Haufe und Patel 2009, S.55f.).

2.2.3. Polymilchsäure (PLA)

Polymilchsäure wird hauptsächlich aus stärke- und zuckerhaltigen Ausgangsmaterialien hergestellt. Als Rohstoffe eignen sich dabei Mais, Gerste, Roggen, Weizen, Cassava, Sago und Kartoffeln. PLA ist in der Regel biologisch abbaubar, kann aber durch die Verwendung von fossilen Rohstoffen bei der Herstellung haltbar gemacht werden (Meyer-Aurich, et al. 2008, S. 142).

PLA kann amorph oder kristallin sein und hat eine Schmelztemperatur von 185°C (Mülhaupt 2013, S.168). Die Abbaubarkeit hängt von seinen chemischen Eigenschaften ab. So dauert der Abbau bei kristallinen PLA Monate bis Jahre, während amorphe PLA bereits nach ein paar Wochen vollständig zerfällt (Biokunststoffe.de o.J.c).

Um Polymilchsäure herzustellen, muss die Stärke extrahiert und in Glucose abgebaut werden. Diese wird dann durch den Einsatz von Bakterien zu Milchsäure umgewandelt, welche in weiteren Schritten polymerisiert wird. Das fertige Produkt, in der Form von erbsengroßen Körnern, wird dann für die finale Anwendung weiterverarbeitet. PLA findet seinen Einsatz, neben dem Medizinbereich, in Verpackungen, Getränkeflaschen, CDs und Tragetaschen. Dank seiner Eigenschaften eignet sich PLA als mögliche Alternative zu herkömmlichen Kunststoffen wie Polyethylen niedriger Dichte (LDPE), Polyethylen hoher Dichte (HDPE), Polypropylen (PP), Polyamid (PA) und Polyethylenterephthalat (PET) (Momani 2009, S.63).

Nennenswerte Hersteller von PLA sind einerseits NatureWorks LLC (USA), der erste Großhersteller seit 2002 und PURAC (Niederlande), der weltweit größte Hersteller von natürlicher Polymilchsäure. Weitere wären Teijin (Japan), Galactec (Belgien) und Tate & Lyle (England). Natureworks führt einen Preis von ca. 1,90€/kg, welcher hauptsächlich von der Effektivität

des Fermentationsprozesses abhängt (Shen, Haufe und Patel 2009, S.71ff.). Im Kapitel 5.2.4. wird das Herstellungsverfahren und -kosten detailliert beschrieben.

2.2.4. Polyhydroxyalkanoate (PHA)

„Polyhydroxyalkanoate (PHA) sind von Bakterien synthetisierte, intrazellulär angehäuften Polyester aus gesättigten und ungesättigten Hydroxyalkansäuren (Biokunststoffe.de o.J.d).“

Durch die hohe Anzahl an Hydroxyalkansäuren, welche als Bestandteil der PHAs dienen, besteht die Möglichkeit eine große Menge an verschiedenen biologisch abbaubaren Polymeren mit unterschiedlichen Eigenschaften herzustellen, jedoch erweisen sich nur fünf bis zehn Polymere als industriell interessant (Biokunststoffe.de o.J.d).

Die Herstellung von PHA durch Fermentation besteht aus folgenden Schritten: Fermentation, Isolierung und Reinigung, sowie Mischung und Palettierung. Dieser ganze Prozess dauert in der Regel zwischen 38 und 48 Stunden. Durch die aufwendige Prozedur der Herstellung von PHA sind die Kosten im Vergleich zu traditionellen Kunststoffen relativ hoch. Aus diesem Grund wird stetig daran gearbeitet, neue Technologien zu finden, um kostengünstigere Methoden zu entwickeln. Eine solche Technologie ist die Erzeugung von PHA mit Hilfe von Gentechnik, bei welcher PHA in Pflanzengewebe durch Photosynthese mit CO₂ und Wasser erzeugt wird (Horn und Sumoski 2012, S.4).

PHA sind thermoplastisch und biologisch abbaubar und unterscheiden sich bei der Verarbeitung kaum von erdölbasierten Kunststoffen, sodass sie oftmals in selben Anlagen hergestellt werden können (Biokunststoffe.de o.J.d). Obwohl sie vollständig abbaubar sind, können sie unter entsprechenden Bedingungen jahrelang intakt bleiben. PHA haben dadurch nicht nur das Potential, bestehende herkömmliche Kunststoffe zu ersetzen, sondern liefern auch neue Anwendungsmöglichkeiten (Shen, Haufe und Patel 2009, S.103ff.).

Ein wichtiger PHA Polymer ist Polyhydroxybutyrat (PHB), welcher auch mit Hilfe von Mikroorganismen hergestellt wird. Durch seine Wasserbeständigkeit, hat er einen Vorteil vielen anderen Biokunststoffen gegenüber und kann in Anwendungsgebieten eingesetzt werden, bei welchen Wasserempfindlichkeit eine Rolle spielt wie zum Beispiel im Medizinbereich

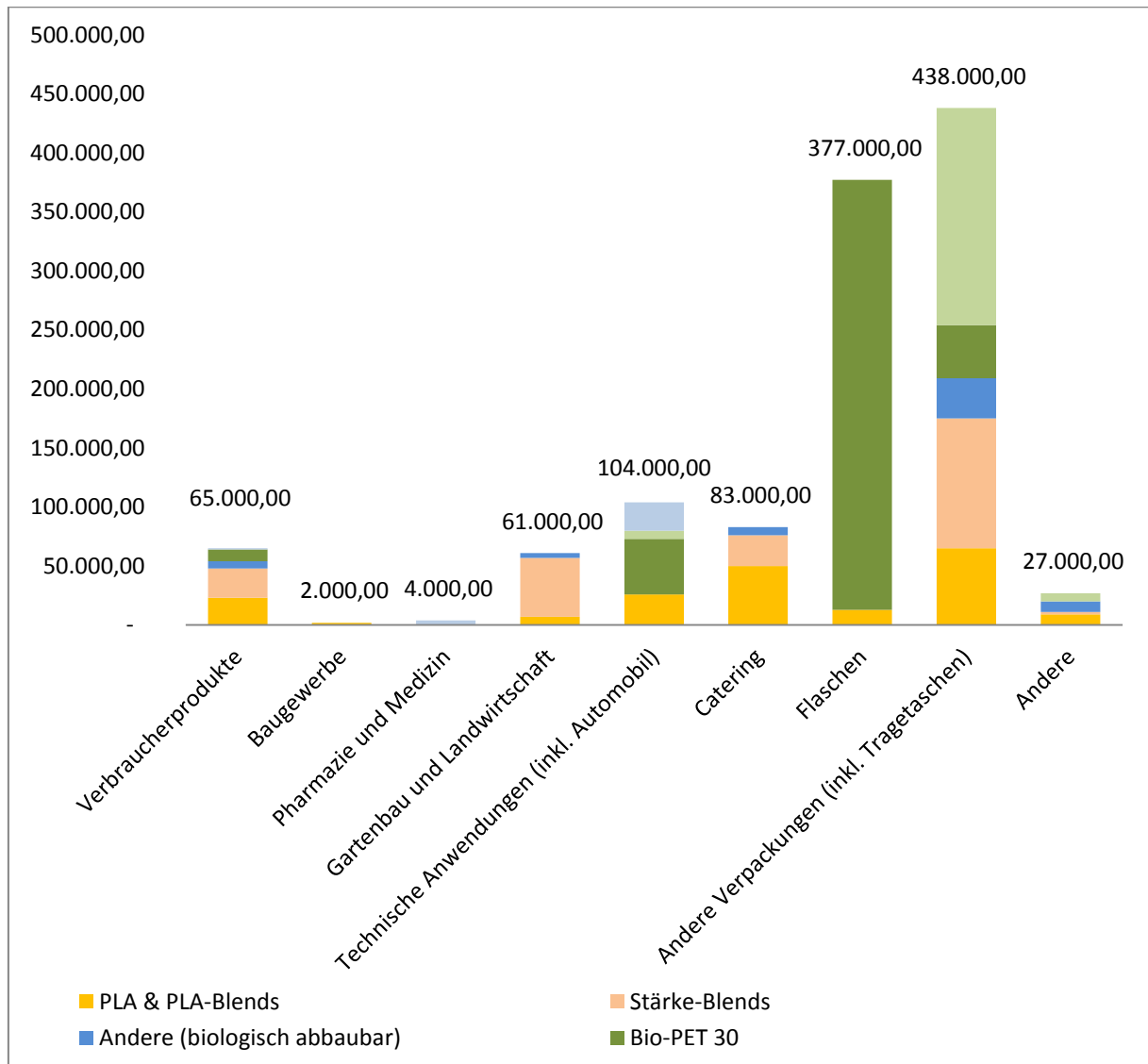
(Horn und Sumoski 2012, S.4). Vermischt mit weiteren Bestandteilen können PHBblends hergestellt werden, die abhängig vom verwendeten Zusatzstoff bestimmte Eigenschaften besitzen. Als Zusatz können Stärke, Celluloseacetat und weitere anorganische Materialien verwendet werden (Biokunststoffe.de o.J.d).

Zu den größten Herstellern von PHA zählen Kaneka Co. aus Japan, die amerikanischen Unternehmen Telles und Meredian Inc., sowie Tianan Biological Material Co. Ltd. und Tianjin Green BioSciences Ltd. aus China. Im Vergleich zu Stärkekunststoffen ist der Preis deutlich höher, jedoch sinken die Kosten konstant. 2003 bewegten sich die Preise zwischen 10-12€/kg pro kg, während sie heute auf 2,50 – 3,50€/kg gesunken sind (Shen, Haufe und Patel 2009, S.108ff.). Die genauen Herstellungskosten und -verfahren werden später im Kapitel 5.2.4. dieser Ausarbeitung näher erläutert.

2.2.5. Anwendungsgebiete

Biokunststoffe werden heutzutage in vielen unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. Die nachstehende Abbildung 2 zeigt die weltweiten Produktionskapazitäten von Biokunststoffen, aufgeteilt nach Anwendungsgebieten und weist auf den großen Anteil der Verpackungsindustrie im Bereich der Biokunststoffe hin. Biokunststoffe besitzen gute Eigenschaften, welche für die Herstellung von Verpackungen von großem Vorteil sind. Sie lassen sich leicht verformen, bedrucken, kleben, schweißen und können mit ähnlichen Verfahren wie herkömmliches Plastik zu Verpackungen verarbeitet werden. Diese Verpackungsanwendungen sind, unter anderem, Tragetaschen, Schalen, Becher, Flaschen, Dosen und Tuben (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. o.J.). Obwohl die meisten Bioverpackungen als Nischenprodukte gesehen werden, gibt es Beispiele die zeigen wie sich immer mehr große Unternehmen, für diese Variante der Verpackungen einsetzen, so zum Beispiel hat die Coca Cola Company 2011 bekanntgegeben, dass sie mit Biotechnologieunternehmen zusammenarbeiten, um Plastikflaschen herzustellen, die aus 100% biobasierten Materialien bestehen (Mülhaupt 2013, S.169).

Abbildung 2: Weltweite Produktionskapazitäten von Biokunststoffen nach Anwendungsgebieten



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an European Bioplastics 2011b.

Neben Verpackungen sind Cateringprodukte wie Teller, Becher, Besteck und Trinkhalme aus Biokunststoffen sehr beliebt. Diese sind in der Regel kurzlebige Produkte, so bieten sich Biokunststoffe als gute Alternative mit ökologischen wie ökonomischen Vorteilen, da man auf diese Weise an Entsorgungskosten sparen kann. Im Garten und Landschaftsbau ist die bestimmbare Lebensdauer von Biokunststoffen ein großer Vorteil. Biologisch abbaubare Mulchfolien sparen Zeit, da sie nach dem Gebrauch nicht wieder entfernt werden müssen. Weitere Beispiele von Anwendungen im Landschafts- und Gartenbau sind abbaubare Töpfe, Bindegarne, Folien und Netze die alle nach dem Gebrauch nicht mehr aufgesammelt werden

müssen, sondern gleich vor Ort kompostiert werden. In der Medizin werden Biokunststoffe, welche vom Körper absorbiert und abgebaut werden können, um so Patienten, zusätzliche Eingriffe zu ersparen, verwendet. Außerdem werden sie als Alternative zu den herkömmlichen Pillen- und Kapselmaterialien eingesetzt (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. o.J.).

Aber nicht nur in der Catering- und Verpackungsindustrie können Biokunststoffe angewendet werden, auch in der Automobilindustrie wird Bioplastik immer mehr eingesetzt, um nachhaltige Fahrzeuge herzustellen. Die Automobilhersteller Toyota und Ford stellen Fahrzeuge her, dessen Interieur teilweise aus Biokunststoffen besteht. Außerdem produziert der Reifenhersteller Goodyear Reifen mit Füllmaterial aus Maisstärke (Biokunststoffe.de o.J.a). Weitere Einsatzgebiete von Biokunststoffen hängen meistens direkt von den bestimmten Eigenschaften ab. So werden Hygieneartikel, Overalls und Schutzanzüge aus Kunststoffen hergestellt, welche wasserdicht sind, gleichzeitig aber Wasserdampf durchlassen während Spielzeuge für Kinder und Kauknochen für Hunde aus bunten Verpackungschips hergestellt werden (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. o.J.).

2.3. Vorteile und Nachteile von Bioplastik

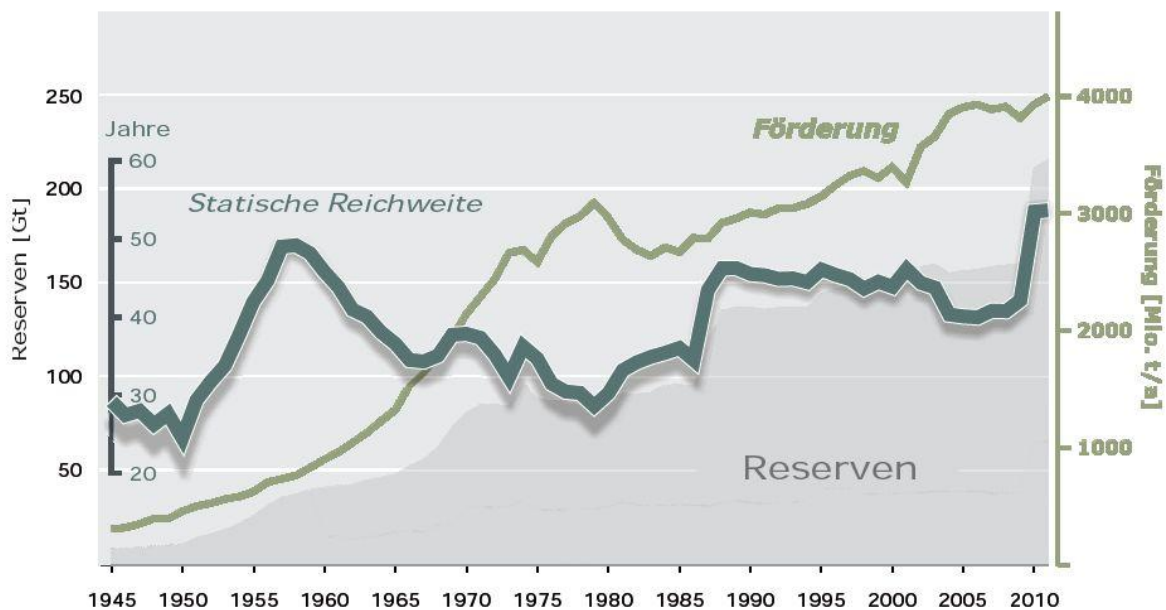
Durch Eigenschaften wie vollständige Kompostierbarkeit, Kohlenstoffneutralität, geringerer Energieverbrauch und nachwachsende Rohstoffe, werden Biokunststoffe als guter Schritt in Richtung einer nachhaltigeren Politik gesehen, in einer Welt, die vom Treibhauseffekt, Erderwärmung, verschmutzten Ozeanen und Ressourcenknappheit gekennzeichnet ist. Obwohl diese Eigenschaften für den Einsatz von Biokunststoffen sprechen, müssen Biokunststoffe ebenso kritisch betrachtet werden und auch die Nachteile, die sich durch die Verwendung und Herstellung dieser „grünen“ Alternative ergeben, in Betracht gezogen werden. Im folgenden Abschnitt wird auf die Vor- und Nachteile von Bioplastik näher eingegangen, besonders in Bezug auf Verarbeitung, Kompostierbarkeit, Ressourceneffizienz und gesundheitliche Risiken.

2.3.1. Nutzung nachwachsender Rohstoffe und die Erdölförderung

Um das wirtschaftliche Wachstum aufrecht zu erhalten, braucht die Welt immer mehr Energie. In den vergangenen zwei Jahrhunderten haben vor allem fossile Brennstoffe diese Energie geliefert. Diese sind aber endliche Ressourcen, welche nach vielen Jahren der Ausbeutung der Erschöpfung unterliegen. Darüber hinaus bringt der Einsatz von fossilen Brennstoffen Umweltprobleme, sowie weitreichende wirtschaftliche, soziale und politische Konsequenzen mit sich (Campbell 2012, S.114). Laut der BGR Energiestudie von 2012 (Andruleit, et al. 2012, S.15ff.) wurden 167 Mrd. t an Erdöl, was etwa 44% der weltweiten anfänglichen Erdölreserven entspricht, seit dem Beginn der industriellen Erdölförderung verbraucht. Alleine im Jahr 2011 wurden 3.998 Millionen Tonnen (Mio. Tonnen) gefördert was ein neues Maximum darstellt. Nach neuesten Berechnungen wird der „depletion mid-point“, der Zeitpunkt bei dem die Hälfte des Erdöls verbraucht sein wird, in etwa zehn bis 15 Jahren erreicht werden. Der Jahresdurchschnittspreis für Erdöl steigt von Jahr zu Jahr und laut Prognosen, wird dieser Trend auch weiterhin anhalten. Neben der Ressourcenknappheit, ist auch die immer komplexer und aufwändiger werdende Gewinnung von Erdöl ein Grund für den steigenden Preis, sowie politisch-wirtschaftliche Einflussfaktoren (Andruleit, et al. 2012, S.15ff.).

Ein Indikator für die geologische Verfügbarkeit von nichtnachwachsenden Rohstoffen ist die statische Reichweite. Diese stellt das Verhältnis der Reserven und der aktuellen Jahresförderung dar und besagt, *„wie viele Jahresverbräuche bei konstanter Förderung und fixen Reserven zukünftig gedeckt werden könnten“* (Andruleit, et al. 2012, S.33). Diese Zahl ist aber nur eine Zustandsbeschreibung und kann nur bedingt als Prognoseinstrument dienen. Wie Abbildung 3 zeigt, hängt die statische Reichweite von dem geologisch-technischen Kenntnisstand und der wirtschaftlichen und politischen Entwicklung ab. So stiegen zwischen 1945 und 2010, mit der Förderung auch die Erdölreserven an, da ständig neue Lagerstätten entdeckt wurden und die Ausbeutung technisch effizienter wurde (Andruleit, et al. 2012, S.33).

Abbildung 3: Historischer Verlauf der statischen Reichweite von 1945-2010 im Vergleich mit der Entwicklung der weltweiten Reserven und Förderung von Erdöl



Quelle: Andruleit et. al. 2012 S.33.

Durch die Verwendung nachwachsender Rohstoffe bei der Herstellung von Kunststoffen werden fossile Rohstoffe entlastet. Dieser Schritt leistet einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung im Verbrauch von Energierohstoffen. Außerdem wird durch den verringerten Gebrauch von Erdölreserven die intergenerative Gerechtigkeit gefördert. (Mülhaupt 2013, S.162f.) Ein weiterer Punkt, der für den Gebrauch von nachwachsenden Rohstoffen für die Kunststoffherstellung spricht, ist die Förderung der Landwirtschaft. Ungenutzte Landflächen können zum Anbau von Energiepflanzen genutzt, und so eine neue Einnahmequelle für die Landwirte und neue Arbeitsplätze geschaffen werden (Jarmai 2008, S.67).

Jedoch kann es aufgrund der Substitution von fossilen Ölen durch nachwachsende Rohstoffe, zu einem Konkurrenzkampf zwischen der Lebensmittelproduktion und dem intensivierten Anbau von Energiepflanzen kommen. In Anbetracht der immer steigenden Energiekosten entscheiden sich immer mehr Landwirte, die Produktion von „billigen“ Lebensmitteln aufzugeben, zugunsten des Anbaus „höherwertiger“ Energiepflanzen, die größere Einnahmen bringen (Mülhaupt 2013, S.164). Im Jahre 2007 kam es zum Beispiel zu der sogenannten „Tortilla Krise“ in Mexico. Infolge der steigenden Produktion von Biotreibstoff in den USA,

sprangen die Preise vom Grundnahrungsmittel Mais in die Höhe. In Mexico konnte man sich den Import des Kornes nicht mehr leisten, was als Folge Demonstrationen und Aufstände im Land auslöste (Sinn 2012, S.113).

2.3.2. Emission von Treibhausgasen

Die Erderwärmung durch Treibhausgase stellt ein massives Problem in unserer Gesellschaft dar, welches bestimmte Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen solcher Gase erfordert. Die Hauptursache für die Erderwärmung ist die uneingeschränkte CO₂ Emission durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kharecha und Hansen 2008, S.1). Biokunststoffe, welche aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden, leisten einen Beitrag zur Entlastung der Umwelt, da bei der Herstellung, Verwertung und Entsorgung von Biokunststoffen die Emission von Treibhausgasen geringer ist im Vergleich zu Erdöl basierten Kunststoffen. Diese Entlastung hängt von der verwendeten Technologie und dem Rohstoff ab, denn je größer der Eingriff in die Rohstoffbereitstellung- und Verarbeitung ist, desto geringer ist die Umweltentlastung (Krotscheck, Wimmer und Narodoslawsky 1997, S.5). Biokunststoffe gelten als Kohlenstoffneutral, da CO₂, welches durch Bioplastik freigegeben, wird aus Biomasse stammt, somit wird nur so viel CO₂ freigesetzt, wie viel vorher in der Pflanze gebunden war (Matsuura, Ye und He 2008, S.4). Auch verschiedene Ökobilanzen (Harding, et.al. 2007, S.65; Krueger, Kauertz und Detzel 2009, S.27) bestätigen, dass Biokunststoffe eindeutig vorteilhafter sind als herkömmliche Kunststoffe in Bezug auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen.

Auf der anderen Seite, kommt es durch die Intensivierung der Landwirtschaft und den Anbau von Energiepflanzen zu einem größeren Einsatz von Düngemitteln, welche die Emission von dem Treibhausgas Distickstoffmonoxid (N₂O) drastisch erhöhen. Zugunsten von Grünland für den Anbau von Biorohstoffen, kommt es außerdem, zur Abholzung des Regenwaldes und Abbau von Wiesen, welche eine große Rolle bei der Kohlendioxid-Sequestrierung spielen (Mülhaupt 2013, S.164). Laut einer Studie (Fargione, et al. 2008, S.1235), wird durch den Wechsel von fossilen auf Biotreibstoffen, eine Erhöhung von 17-420 Mal mehr an CO₂ Emis-

sionen erwartet, was schwere Folgen auf die natürlichen Lebensräume vieler Pflanzen und Tiere haben wird.

2.3.3. Gesundheitliche Risiken

Um die Eigenschaften bestimmter Kunststoffe zu verbessern, werden während der Herstellung bestimmte Polymere beziehungsweise Zusatzstoffe beigemischt. Besonders problematisch sind dabei sogenannte Weichmacher, wie Phthalate, Bisphenol A und verschiedene Flammschutzmittel. Durch die Beimischung von Phthalaten werden harte Kunststoffe wie PVC weich und können so in vielen Gebieten des alltäglichen Lebens, Anwendung finden. Da sie im Kunststoff nicht fest gebunden sind, lösen sie sich von dem Plastik ab, wenn sie in Berührung mit Wasser oder Fetten kommen und werden durch die Luft, Nahrung und Haut vom Menschen aufgenommen. Während Phthalate als fortpflanzungsgefährdend gelten, hat Bisphenol A einen negativen Einfluss auf das Hormonsystem des Menschen (Plastic Garbage Project 2013b).

Biobasierte Kunststoffe haben einen deutlichen Vorteil im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffen, in Bezug auf den Giftgehalt der Materialien, Gefahren bei der Verarbeitung, Gebrauch und Entsorgung sowie der Verwendung von schädlichen Zusatzstoffen. Die verwendeten Monomere lösen sich kaum vom Biokunststoff und wenn sie das tun sind sie nicht schädlich. Die meisten Weichmacher die in Biokunststoffen verwendet werden sind biobasiert wie Glycerin, Sorbit und Triethyl Citrat (TEC), und besitzen somit einen sehr geringen Giftgehalt, welcher keine Auswirkungen auf die Gesundheit hat (Momani 2009, S.27f.). Biokunststoffe können generell auch gesundheitliche Risiken verursachen, diese variieren jedoch, abhängig von den einzelnen Plastikarten und der verwendeten Herstellungsmethode (Alvarez-Chavez, et al. 2012, S.48ff.).

Die meisten biobasierten Rohstoffe werden mit industriellen landwirtschaftlichen Methoden angebaut, was große Mengen an Energie, Wasser, Chemikalien und genetisch veränderten Organismen für den Anbau erfordert. Vor allem die Verwendung von genetisch modifizierten Organismen zur Verbesserung der Eigenschaften von Biokunststoffen bereitet Sorgen, da deren Auswirkungen auf die Umwelt und Gesundheit noch nicht genug erforscht sind. Dar-

über hinaus kann es zu gesundheitlichen Risiken bei den einzelnen Schritten der Verarbeitung von Biokunststoffen kommen. Wie zum Beispiel bei der physischen Extraktion von PHA, wo Chloroform, Methylenchlorid und andere karzinogene Chemikalien freigesetzt werden. Bei der Herstellung von PLA wird, für die Gewinnung von Milchsäure während der Fermentation, Schwefelsäure verwendet (Alvarez-Chavez, et al. 2012, S.51ff.).

Auch beim biologischen Abbau von Biokunststoffen können gesundheitliche Risiken auftreten. Bei diesem Prozess werden nicht nur CO₂ und Wasser produziert, sondern auch wasserlösliche und giftige Metaboliten. Auch können sich winzige Partikel der Polymere vom Plastik lösen, welche dann für Bakterien und Sporen als Brutstätte dienen. Diese können von Wasser und Wind weitergetragen und so vom Menschen eingeatmet werden (Mülhaupt 2013, S.164).

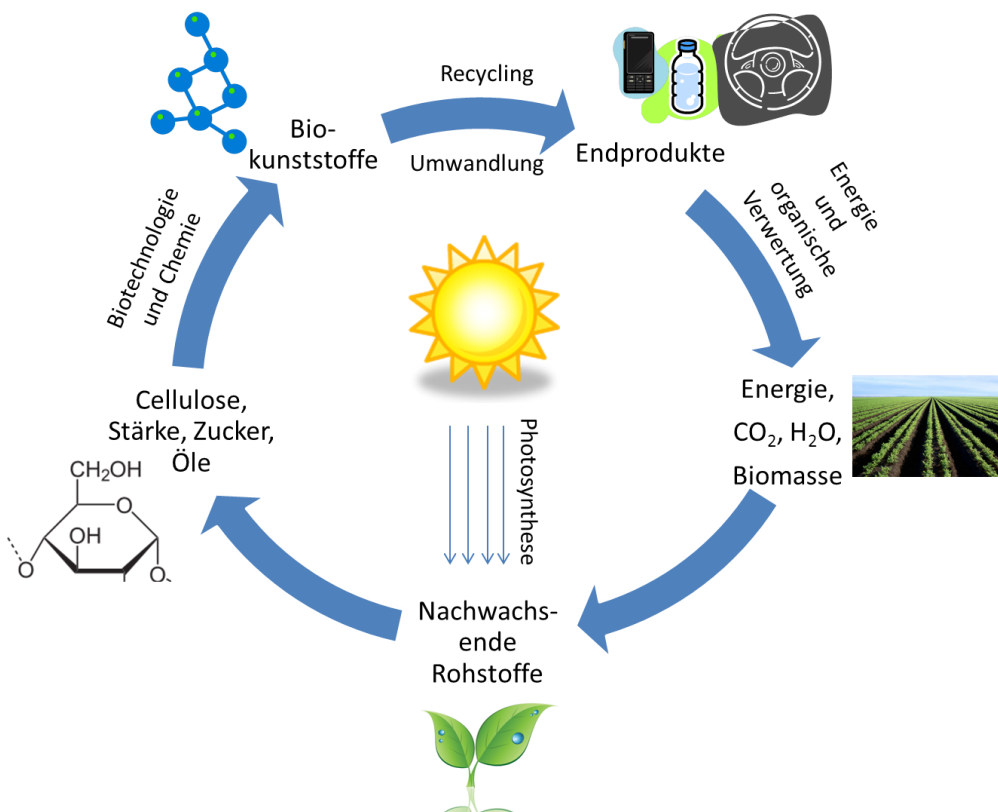
2.3.4. Kompostierbarkeit

Ein großes Problem, welches mit dem übermäßigen und leichtsinnigen Konsum von Plastik verbunden ist, ist die Abfallbeseitigung. Herkömmliche Kunststoffe sind nicht biologisch abbaubar und landen zum größten Teil in den Weltmeeren. Dort bilden sie Plastikmüllstrudel und treiben im Wasser, sinken an den Meeresboden und werden an die Strände gespült. Dieser Plastikmüllstrudel, bekannt auch als der „Great Pacific Garbage Patch“, wird von Jahr zu Jahr größer und hat erschreckende Auswirkungen auf das Meeresleben, Tiere, Natur und schließlich auch den Menschen (Plastic Garbage Project 2013a).

Biologisch abbaubare Kunststoffe werden nach dem Ende der Verwendbarkeit in industriellen Kompostieranlagen kompostiert und zerfallen unter entsprechenden Bedingungen zu CO₂, Wasser und Biomasse innerhalb von sechs bis zwölf Wochen. Auf diese Weise reduziert sich die Belastung auf die Umwelt, da keine Notwendigkeit nach Transport und Lagerung auf Mülldeponien oder Verbrennung in entsprechenden Anlagen entsteht. Die biologische Abbaubarkeit ist auch von Vorteil in bestimmten Anwendungsgebieten wie der Landwirtschaft, da die Kunststoffe im Erdboden zerfallen und den Landwirten so bestimmte Arbeitsschritte ersparen (European Bioplastics 2010a).

Abbildung 4 zeigt den idealen Lebenszyklus von biologisch abbaubaren Kunststoffen. Der Zyklus beginnt mit der Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen und endet nach der Verwendungsphase und Kompostierung wieder mit den nachwachsenden Rohstoffen. Dieser Lebenszyklus ist laut dem Gabler Wirtschaftslexikon (o.J.) ein „cradle to cradle“ Lebenszyklus, welcher am Ursprung beginnt und auch am Ursprung endet.

Abbildung 4: Idealer Lebenszyklus von Bioplastik



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an European Bioplastics 2011b.

Allerdings sind nicht alle biologisch abbaubaren Kunststoffe auch kompostierbar. Von Kompostierbarkeit kann gesprochen werden, wenn Kunststoffe in der passenden Umgebung und in einem bestimmten Zeitraum abgebaut werden, dabei aber keine giftigen Rückstände hinterlassen. Spezielle Bedingungen, die gewöhnlich nicht bei der Kompostierung gegeben sind, sollten dabei keine Rolle spielen, was bei manchen biologisch abbaubaren Kunststoffen nicht der Fall ist. Außerdem kann die vollständige Kompostierbarkeit nur in speziellen Kompostieranlagen gewährleistet werden und somit müssen die Abfälle vom Endverbraucher getrennt entsorgt und gesammelt werden was ein weiteres Problem darstellt. Diese Aufgabe

ist nicht immer leicht, da manche Biokunststoffe nur minimale sichtbare Unterschiede zu konventioneller Plastik besitzen und deshalb immer deutlich gekennzeichnet sein müssen (Kale, et al. 2007, S.258ff.). Wie der heutige Stand der Kompostierung aussieht, sowie weitere Methoden zur Abfallbeseitigung von Biokunststoffen werden im Kapitel 4.4. näher erläutert.

2.4. Normen, Zertifizierung und Kennzeichnung von Biokunststoffen

Mit Hilfe von Normen werden Kriterien festgelegt, mit welchen Produkte und Dienstleistungen besser beschrieben werden können. Jedes Unternehmen kann freiwillig entscheiden, ob es eine Norm einhalten will oder nicht. In Bezug auf Biokunststoffe bestimmen Normen die Messvorschriften der biologischen Abbaubarkeit beziehungsweise den Anteil an nachwachsenden Rohstoffen, sowie andere Kriterien die erfüllt werden müssen, damit ein Kunststoff als Biokunststoff bezeichnet werden kann (European Bioplastics 2012g).

Abbildung 5: Kennzeichnungen für biobasierte Kunststoffe



Quelle: European Bioplastics 2011g.

Die Einhaltung dieser Ansprüche kann vom Unternehmen selbst bestimmt werden oder von einer unabhängigen Zertifizierungsstelle geprüft werden. Die Zertifizierung der biologischen Abbaubarkeit beziehungsweise Kompostierbarkeit wird hauptsächlich durch das Deutsche Institut für Normung (DIN) CERTCO oder ein kooperierendes Institut durchgeführt, indem sie vom Unternehmen gebrachte Nachweise kontrollieren und testen. Ein Zertifikat vom Institut bevollmächtigt das Unternehmen ein Gütezeichen zu tragen, welches die Erfüllung der Normen offiziell bestätigt (European Bioplastics 2012d).

Abbildung 5 zeigt die Gütezeichen, die einen Kunststoff als biobasiert (links) beziehungsweise kompostierbar (rechts) kennzeichnen. Bei einem biobasierten Kunststoff, kann das Unternehmen entweder den biobasierten Kohlenstoff-Anteil oder biobasierten Masse-Anteil des Produktes angeben. Diese Einheiten unterscheiden sich voneinander und müssen beim Vergleich der Produkte berücksichtigt werden. Die wichtigste Europäische Norm zur Kompostierbarkeit eines Kunststoffes ist DIN EN 13432. Dieser Standard legt die Anforderungen fest, welche Kunststoffverpackungen erfüllen müssen, damit sie in industriellen Kompostieranlagen kompostiert werden können (European Bioplastics 2012h).

Nachdem in diesem Kapitel der Begriff der Biokunststoffe, die Arten, die Anwendungsgebiete, die Vor- und Nachteile, sowie die Normen, Zertifizierung und Standards erläutert wurden, werden im folgenden Abschnitt alle wichtigen Hintergrundinformationen zum Kunststoffmarkt geliefert.

3. Der Kunststoffmarkt

In diesem Kapitel wird die aktuelle Lage des gesamten Kunststoffmarktes näher erläutert. Es wird ein Vergleich zwischen den Produktionskapazitäten von herkömmlichen und Biokunststoffen gemacht. Danach werden die Prognosen und Trends für Biokunststoffe vorgestellt. In diesem Sinne werden die einzelnen Einflussfaktoren auf dem Markt, sowie die wichtigsten Unternehmen und Akteure detailliert beschrieben. Im Anschluss folgt ein Einblick in den österreichischen Bioplastikmarkt.

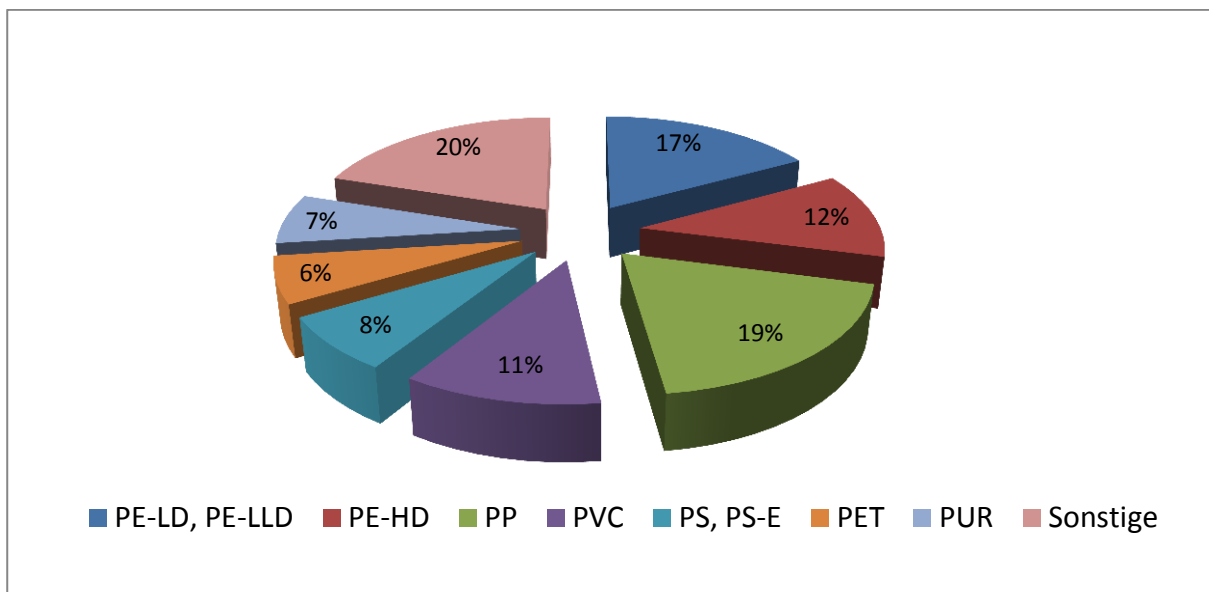
3.1. Aktuelles Marktpotenzial und Prognosen

Der Bedarf an Kunststoffen steigt von Jahr zu Jahr. Seit 1950 kann die Kunststoffindustrie ein Wachstum von etwa neun Prozent jährlich vermerken. Laut den Angaben des europäischen Plastikverbandes, Plastics Europe, wurden alleine im Jahr 2011 weltweit etwa 280 Mio. Tonnen an traditionellen Kunststoffen hergestellt, was einen Wachstum von 3,7% im Vergleich zum Vorjahr darstellt. Davon wurden 47 Mio. Tonnen an Kunststoffen in Europa produziert (Plastics Europe 2012, S.5ff.).

Die größten Segmente des Kunststoffmarktes im Jahr 2011 waren der Verpackungssektor (39,4%), das Baugewerbe (20,5%), die Automobilindustrie (8,3%) und die elektronischen Geräte (5,4%). Während die meisten Sektoren ähnliche Zahlen wie im Vorjahr aufbringen, konnte die Automobilindustrie einen Wachstum von 10% verbuchen (Plastics Europe 2012, S.7).

Abbildung 6 zeigt die Produktionskapazitäten der meisthergestellten Kunststoffarten im Jahr 2011. Die sechs wichtigsten Kunststoffe sind Polyethylen inkl. Polyethylen hoher Dichte (PE-HD), niedriger Dichte (PE-LD), und linear niedriger Dichte (PE-LLD), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC), Polystyren (PS), Polyethylenterephthalat (PET) und Polyurethan (PUR) und zusammen machen sie etwa 80% des gesamten Kunststoffbedarfes aus (Plastics Europe 2012, S.8)

Abbildung 6: Produktionskapazitäten von herkömmlichen Kunststoffen in Europa

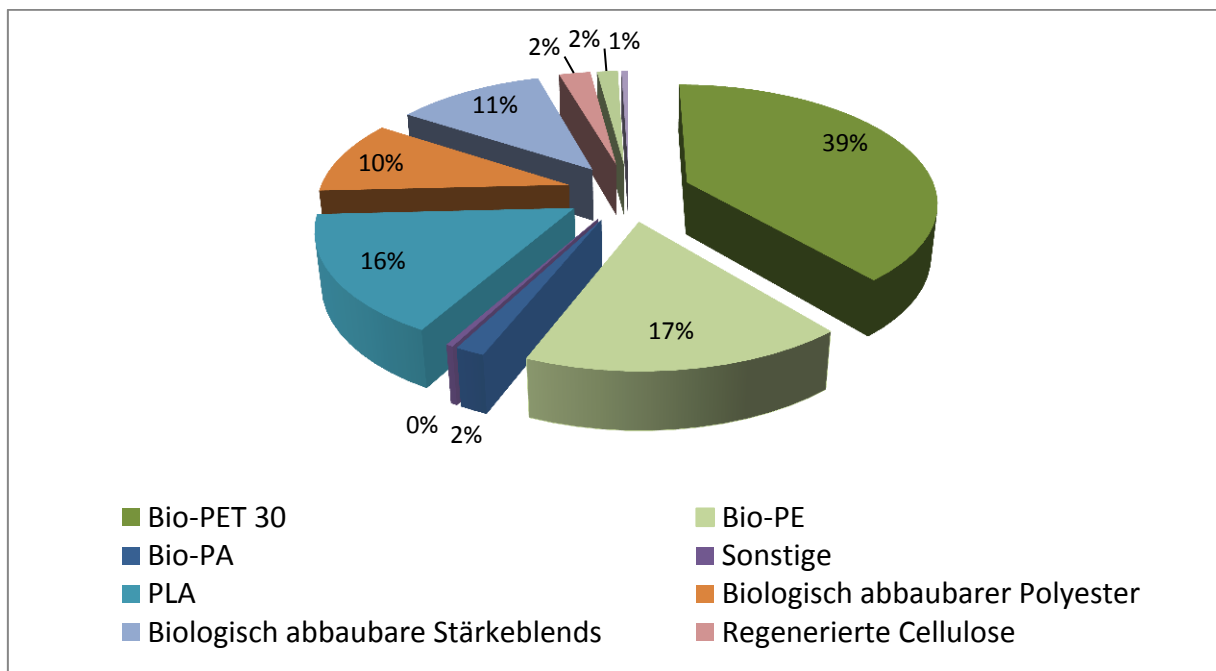


Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Plastics Europe 2012, S.8.

Der Biokunststoffmarkt ist durch ein hohes Wachstum und eine große Diversifikation gekennzeichnet. Im Vergleich zum herkömmlichen Kunststoffmarkt sind Biokunststoffe ein Nischenprodukt mit einer Produktionskapazität von etwa 1,2 Mio. Tonnen im Jahr 2011. Wird jedoch die langzeitige Entwicklung der Biokunststoffindustrie betrachtet, können große Fortschritte festgestellt werden. Die meisten Produkte, die auf Biokunststoffen basieren, stellen heute ausgereifte Erzeugnisse dar, welche in vielen Anwendungsgebieten ihre Nutzung finden (European Bioplastics 2013a).

Abbildung 7 stellt die Produktionskapazitäten von Biokunststoffen nach dem verwendeten Material dar. Das größte Marktsegment bilden biobasierte, nicht biologisch abbaubare Kunststoffe, insbesondere die sogenannten „drop-ins“. Diese stellen die biobasierte Version von Massenkunststoffen dar (BIO-PET 30, BIO-PE und BIO-PA), welche sich nur durch die biobasierte Komponente vom traditionellen Kunststoff unterscheiden (European Bioplastics 2013b).

Abbildung 7: Produktionskapazitäten von Biokunststoffen in Europa

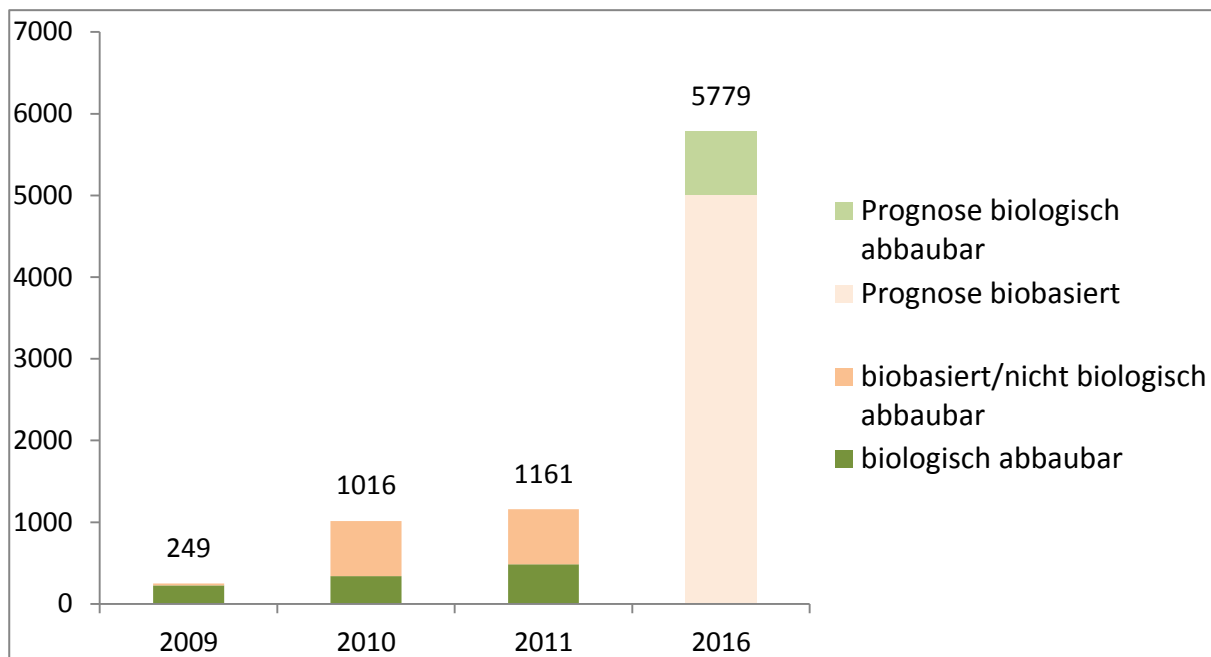


Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an European Bioplastics 2011b.

In den letzten zehn Jahren hat sich die Anzahl an wissenschaftlichen Arbeiten bezüglich Biokunststoffe verdreifacht. Das allein bestätigt das wachsende Interesse an nachhaltigen und umweltfreundlichen Lösungen (Queiroz und Collares-Queiroz 2009, S.71). Laut dem Verband European Bioplastics (2012e) schätzen Experten das Wachstum auf 500% der Produktionskapazität von Biokunststoffen bis 2016, was in etwa sechs Mio. Tonnen entspricht (Abbildung 8).

Fast täglich wächst die Anzahl der Produktionsstätten, sowie der Materialien, Anwendungen und Produkte. Dadurch erhöht sich auch stetig die Anzahl der Hersteller, Zulieferer und Konsumenten. Es werden neue Investitionen in die Herstellung und Vermarktung erwartet, sowie die Einführung neuer Gesetze, Regelungen und Rahmenbedingungen, welche der Biokunststoffbranche verhelfen sollen, dem Konkurrenzkampf mit den traditionellen Kunststoffen standhalten zu können (European Bioplastics 2012f).

Abbildung 8: Globale Produktionskapazitäten von Biokunststoffen (2009-2016)



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an European Bioplastics 2011b.

3.2. Einflussfaktoren

Die Entwicklung und Akzeptanz des Biokunststoffmarktes hängt in einem großen Ausmaß von verschiedenen Faktoren ab. Diese können einerseits die Marktentwicklung antreiben oder andererseits eine hemmende Wirkung auf den Biokunststoffmarkt haben. In diesem Abschnitt werden diese Faktoren detailliert erklärt.

3.2.1. Marktantreibende Faktoren

Es gibt eine große Menge an Faktoren, welche dazu beitragen können die Verwendung biobasierter und biologisch abbaubarer Kunststoffe zu fördern. Dazu zählen die Umwelt, die Ölversorgung, die technischen Eigenschaften und Funktionalität, die Akzeptanz der Verbraucher, die soziale Verantwortung der Unternehmen, sowie zahlreiche legislative Richtlinien bezüglich der Biokunststoffe.

Umwelt

In der heutigen Zeit ist das Bewusstsein der Verbraucher und auch der Unternehmen für die Umwelt ausgeprägter als noch vor einigen Jahren (Theinstid, et al. 2010, S.356). Immer größere Probleme, die im Zusammenhang mit einem rücksichtslosen Umgang mit der eigenen Umgebung entstehen, tragen dazu bei, alternative Wege und Möglichkeiten zu schöpfen. Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe gehören zu der Gruppe der umweltschonenden Alternativen zu herkömmlichen Kunststoffen. Einer der größten Vorteile von Biokunststoffen sind die positiven Einflüsse auf die Umwelt, welche sich folgendermaßen ausprägen (Barker und Richard 2009, S.7f.):

- geringere Treibhausgasemissionen
- Verwendung nachwachsender Rohstoffe
- biologische Abbaubarkeit
- Kompostierbarkeit

Durch die richtige Vermarktung können diese Eigenschaften, im Hinblick auf die Umwelt, sehr viel zur positiven Marktentwicklung von Biokunststoffen beitragen.

Ölversorgung

Durch die ständig wachsende Nachfrage von Treibstoffen, die sinkenden Lagerbestände, politische Unruhen sowie andere Faktoren, kam es in den letzten Jahren, vor allem um die Wende des 21. Jahrhunderts, zu einer drastischen Steigung der Rohölpreise. Da dieser Trend weiter anhält und petrochemische Kunststoffe stark davon betroffen sind, wirkt sich diese Tatsache positiv auf die Nachfrage von Biokunststoffen aus. Traditionelle Kunststoffe werden aus den Nebenprodukten der Raffination von Rohöl hergestellt, während Biokunststoffe kein Öl bei ihrer Produktion benötigen. Aus diesem Grund stellen Biokunststoffe eine wirtschaftlich attraktive Lösung und einen möglichen Ersatz zu traditionellen Kunststoffen dar. Allerdings ist der Preis von Stärke und Zucker, den wichtigsten Rohstoffquellen für Biokunststoffe, an den Ölpreis gekoppelt und sollte somit bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Biokunststoffen berücksichtigt werden (Barker und Richard 2009, S.8).

Technische Eigenschaften und Funktionalität

Kunststoffe müssen nach genauen Spezifikationen und Anforderungen hergestellt werden. Vor allem in der Verpackungsindustrie wird auf bestimmte Eigenschaften, wie die Atmungsaktivität, die Hitzebeständigkeit, eine optische Klarheit, sowie die Wasserbeständigkeit großer Wert gelegt. Die Verpackung von Kaffee muss, zum Beispiel gleichzeitig in der Lage sein CO₂ durchzulassen, um das Anschwellen des Pakets zu verhindern, aber auch undurchlässig für Sauerstoff sein um die Oxidation des Kaffees aufzuhalten (Barker und Richard 2009, S.9).

Ebenso können bestimmte Verpackungen von Obst und Gemüse die Haltbarkeit dieser Lebensmittel verlängern. Wenn aber diese Verpackungen aus kompostierbaren Biokunststoffen hergestellt werden, können Obst und Gemüse nachdem sie verderben oder unverkäuflich werden, leicht mittels Kompostierung entsorgt werden. Auf diese Weise wird die Entsorgung vereinfacht, da keine Kunststoffabfälle zum Recycling übrig bleiben. Derzeit gibt es eine Vielzahl an Biokunststoffen im Verpackungsektor mit unterschiedlichen Eigenschaften, welche sich für eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten eignen (Barker und Richard 2009, S.9).

Akzeptanz der Verbraucher

Allgemein wächst das Bewusstsein der Verbraucher und Unternehmen für die Umwelt immer mehr und somit auch für die damit verbundenen Probleme. Laut einer Umfrage von WRAP (2007, S.29) sind Endverbraucher bereit Biokunststoffe, wegen ihrer guten Umweltbilanz, zu kaufen und zu benutzen, jedoch wurden bei dieser Untersuchung auch einige Probleme festgestellt. Erstens hatten die Verbraucher nicht viele Informationen über Biokunststoffe, mehr als die Hälfte der Befragten hat noch nie etwas von biologisch abbaubaren Kunststoffen gehört und noch weniger von kompostierbaren. Zweitens, wussten die Verbraucher nicht ob sie schon mal mit Biokunststoffen in Berührung gekommen sind, da sie diese nicht von herkömmlichen Kunststoffen unterscheiden können. Der letzte Punkt betrifft die Entsorgung von Biokunststoffen. Trotz der Anweisungen zur Entsorgung von biologisch abbaubaren Kunststoffen, haben die meisten Verbraucher die Produkte auf eine ähnliche Art entsorgt wie es für herkömmliche Kunststoffe üblich ist (WRAP 2007, S.29).

Soziale Verantwortung der Unternehmen

Immer mehr Unternehmen sind bereit soziale Verantwortung für ihre Geschäftstätigkeiten zu übernehmen, um auf diese Weise den Ruf und das Image ihres Unternehmens aufzuwerten. Auch die Gesetzgeber unterstützen dieses Vorhaben. Die britische Regierung hat zum Beispiel ein Programm gestartet, welches Unternehmen die zur Milderung des Klimawandels und der Umweltschonung beitragen, unterstützt und berätet. Alle zwei Jahre werden die Unternehmen, welche am meisten zur nachhaltigen Entwicklung beigetragen haben, ausgezeichnet. Je mehr Unternehmen bei diesem Programm mitmachen, desto größer ist die Chance neue Teilnehmer zu finden und zu motivieren Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen zu benutzen (Barker und Richard 2009, S.10).

Legislative Regulierungen

Zu den marktfördernden Einflussfaktoren gehören auch einige legislative Regulierungen bezüglich der Biokunststoffe. In Europa zum Beispiel, gibt es bestimmte Richtlinien in Bezug auf die Reduktion der Verpackungen und vor allem der Verpackungsabfälle, um die Anreize zur Wiederverwertung der Materialien zu erhöhen. Bestimmte Biokunststoffe sind biologisch abbaubar und wenn diese ordnungsgemäß kompostiert werden, hinterlassen sie keine Restabfälle (Barker und Richard 2009, S.12).

Darüber hinaus wurden bestimmte Richtlinien bzgl. Abfalldeponien eingeführt. Diese tragen zur Verringerung biologisch abbaubarer Abfälle auf Deponien bei, fördern das Recycling und die Kompostierung, verhindern das Mischen von gefährlichen und nichtgefährlichen Abfällen und regulieren das Einhalten dieser Vorschriften. Um die weitgehende Einhaltung dieser Vorschriften zu garantieren, sowie die Menge an Abfällen auf Deponien zu reduzieren wurde auch die Deponie-Steuer eingeführt. Wenn Biokunststoffe rechtmäßig entsorgt beziehungsweise kompostiert werden, tragen sie zur Verringerung an Deponieabfällen bei (Barker und Richard 2009, S.13).

Kunststoffabfälle, welche exportiert werden, müssen bestimmte Vorschriften erfüllen und auf eine umweltverträgliche Art und Weise wiederverwertet werden. Da diese Vorschriften immer strenger werden und viele herkömmliche Kunststoffe auf den „schwarzen Listen“ der

Einführungsländer stehen, sind die Exporteure gezwungen sich mit den eigenen Kunststoffabfällen zu befassen. Diese Tatsache ist ein weiterer Faktor für die Verwendung von Biokunststoffen. Diese können auf mehrere Arten entsorgt werden wie zum Beispiel anaerobe Vergärung, heimische und industrielle Kompostierung, Recycling und Verbrennung (Barker und Richard 2009, S.14).

3.2.2. Markthemmende Faktoren

Da herkömmliche Kunststoffe schon seit Jahrzehnten entwickelt und ausgereift wurden, können nur wenige Biokunststoffe dieser Konkurrenz standhalten. Um traditionelle Kunststoffe ersetzen zu können, müssten diese umweltfreundlich, nachhaltig und günstig sein, sowie ähnliche Eigenschaften wie das auf Petroleum-basierte Plastik besitzen. Nur meistens sind Biokunststoffe viel teurer als herkömmliches Plastik und können diese nicht in allen Anwendungsgebieten ersetzen (Barker und Richard 2009, S.16f.). Zu weiteren Einflussfaktoren, welche einen hemmenden Einfluss auf die Entwicklung des Biokunststoffmarktes haben, zählen die Kosten, die Funktionalität, die Verpackungsverordnungen und die Trennung und Weiterverarbeitung der Kunststoffe.

Kosten

Wegen den hohen Kosten für benötigte Anlagen, teuren Rohstoffen, kleinen Produktionsmengen und hohen Forschungs- und Entwicklungsausgaben sind Biokunststoffe derzeit deutlich teurer als herkömmliche Kunststoffe. Diese Tatsache ist eines der größten Hindernisse auf die der Biokunststoffmarkt trifft (Barker und Richard 2009, S.17). Auch der Mangel an privaten Investoren in die Forschung und Entwicklung der Biokunststoffe ist ein Faktor, welcher Schwierigkeiten für den Markt verursacht. Ungeprüfte Technologien ziehen nur schwer neue Investoren an, welche mehr an erfolgsversprechenden Investitionen interessiert sind (Theinsthid, et al. 2010, S.357).

Eine Möglichkeit diese Lücke der Kosten zwischen bio- und herkömmlichen Kunststoffen zu verringern ist, Biokunststoffe in größeren Mengen herzustellen und durch die Skaleneffekte die Herstellungskosten zu senken. Andererseits könnten die Biokunststoffe konkurrenzfähig

ger werden, wenn die Rohölpreise weiter ansteigen und somit eine Erhöhung der Plastikpreise verursachen (Barker und Richard 2009, S.17).

Funktionalität

Während einige Eigenschaften von Biokunststoffen einen Vorteil bei bestimmten Anwendungsbereichen liefern, können andere Charakteristika das Anwendungsspektrum begrenzen. Im Vergleich zu der Vielfalt an traditionellen Kunststoffen ist das Angebot an Biokunststoffen sehr begrenzt. Dementsprechend kann konventionelles Plastik auch nicht in allen Anwendungsgebieten mit Biokunststoffen ersetzt werden. Einige grüne Kunststoffe erfüllen auch nicht alle Anforderungen die bei bestimmten Anwendungsgebieten gefordert werden. Zum Beispiel ist die Schmelztemperatur viel zu niedrig, die Transparenz zu gering oder das Plastik ist zu spröde. Durch eine stetige Weiterentwicklung der Biokunststoffe können diese Nachteile in der Funktionalität in absehbarer Zeit minimiert werden (Barker und Richard 2009, S.17).

Hinzu existieren vor allem im Verpackungssektor sehr viele Anforderungen an die Materialien die erfüllt werden müssen. Bestimmungen wie Volumen, Gewicht, Stärke, Wiederverwertbarkeit, sowie Minimierung des Gehaltes an schädlichen Stoffen müssen eingehalten werden. Solche Verpackungsverordnungen können ein Hindernis für neue Materialien wie Biokunststoffe darstellen, da die Einhaltung dieser Richtlinien mit zusätzlichen Kosten für das Unternehmen verbunden ist (Barker und Richard 2009, S.18).

Trennung und Weiterverarbeitung der Kunststoffe

Um Kunststoffprodukte nach der Verwendung auf eine entsprechende Art und Weise entsorgen, recyceln oder kompostieren zu können ist es wichtig, die Materialien voneinander zu unterscheiden um sie entsprechend den Polymer-Typen richtig trennen zu können. Diese Trennung ist ein aufwendiger Prozess, welcher in zwei Schritten durchgeführt wird. Erstens sollte vom Endverbraucher eine grobe Trennung der Kunststoffe in recyclebare und kompostierbare Materialien stattfinden. Danach wird von der lokalen Abfallbehörde, die komplexere

Trennung mit Hilfe von spezialisierten Sortieranlagen und geschultem Personal, durchgeführt (Barker und Richard 2009, S.18).

Meistens ist die Trennung der Materialien im ersten Schritt mit einigen Komplikationen verbunden. Es besteht ein Mangel an Wissen und Erfahrung, sowie der Bereitschaft zur Abfalltrennung. Darüber hinaus sind die Verbraucher unsicher wie man mit Biokunststoffabfällen umgehen muss. Im Weiteren sind Sortieranlagen nicht immer in der Lage Biokunststoffe sinnvoll zu identifizieren und Investitionen in spezielle biokunststoffgeeignete Anlagen sind derzeit sehr hoch (Barker und Richard 2009, S.18f.).

3.2.3. Greenwashing

Die allgegenwärtige Diskussion über umweltbezogene Probleme, haben beim Verbraucher das Bedürfnis geweckt diesen Problemen entgegenzuwirken und etwas zur Minimierung dieser umweltschädlichen Maßnahmen beizutragen. Der Begriff „Greenwashing“ ist in letzter Zeit immer mehr in den Medien vertreten und bezieht sich hauptsächlich auf Marketingmaßnahmen in Bezug auf bestimmte Produkte, mit dem Ziel den Verbraucher falsch zu informieren und das Unternehmen als umweltfreundlich und verantwortungsbewusst darzustellen. Auf diese Weise wird die gute Absicht der unzureichend Informierten Verbraucher ausgenutzt (European Bioplastics 2012b, S.3).

Auch in Verbindung mit Biokunststoffen, vor allem im Verpackungssektor, kommt es oftmals zum Greenwashing. Das Unternehmen „Danone“ zum Beispiel füllt den Joghurt „Activia“ in Verpackungen welche aus dem Biokunststoff PLA bestehen. Gleichzeitig werben sie für die gute Umweltbilanz dieses Kunststoffes, obwohl das „Institut für Umwelt und Forschung“ in Heidelberg diese Aussagen nicht bestätigen konnte (n-tv 2011).

Somit stellt diese Tatsache auch einen Einflussfaktor auf die Entwicklung des Biokunststoffmarktes dar. Um diesen Effekten entgegenzuwirken ist es für die Endverbraucher am wichtigsten sich an den richtigen Stellen zu informieren und die Behauptungen der Unternehmen zu hinterfragen und zu prüfen. Dabei sollten an erster Stelle die Ergebnisse unabhängiger Zertifizierungsstellen beachtet werden (European Bioplastics 2012b, S.3).

3.3. Unternehmen/Akteure

Im Kapitel 3.4. werden die wichtigsten Akteure auf dem Biokunststoffmarkt vorgestellt. Dazu gehören zentrale Akteure wie die Unternehmen, Zulieferer und Hersteller, die größten Herstellungsländer, sowie die Zusammenarbeit mit Forschungs- und Entwicklungsinstituten und innerhalb der Branche selbst.

3.3.1. Zentrale Akteure (Unternehmen, Zulieferer, Hersteller)

Zu den zentralen Akteuren des Biokunststoffmarktes gehören die Zulieferer, Hersteller und Unternehmen. Die Land- und Forstwirtschaft stellt die nötigen Rohstoffe (Zucker, Stärke und Cellulose) für die Herstellung von Biokunststoffen zur Verfügung. Die Hersteller verwenden diese um die Biokunststoffe wie Thermoplastische Stärke, Polylactide, Celluloseacetate und Polyhydroxyalkanoate zu produzieren. Die größten Biokunststoffvertreter befinden sich in der Europäischen Union (EU), den Vereinigten Staaten (USA) und Japan. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Hersteller von Biokunststoffen (Beucker, Marscheider-Weidemann und Carus 2007, S.31).

Tabelle 2: Die wichtigsten Biokunststoffhersteller

Material	Hersteller	Handelsname
Thermoplastische Stärke, Stärkewerkstoffe, Blends	Novamont (Italien)	MaterBi
	Rodenburg Biopolymers (Niederlande)	Solanyl
	BIOP (Deutschland)	BIOPAR
	Biotec (Deutschland)	Bioplast
	Stanelco (Großbritannien)	Starpol
	Corn Starch (Japan)	Compol
Polylactide (PLA)	NatureWorks (USA)	NatureWorks
	Toyota (Japan)	EcoPlastic
	Hycail (Niederlande)	Hycail
	FKuR (Deutschland)	Bio-Flex
	Purac (Niederlande)	Purac
	Neste (Finnland)	Neste
	Mitsui (Japan)	Lacea
Cellulose(-acetate)	Eastman (Japan)	Tenite
	FKuR (Deutschland)	Biograde
	Tate & Lyle (Großbritannien)	Susterra
	Albis Plastic (Deutschland)	Cellidor
	Mazzuchelli (Italien)	Bioceta
	Austel (Österreich)	Fasal
Polyhydroxyalkanoate (PHA, PHB)	Procter & Gamble (USA) & Kaneka (Japan)	Nodax
	Biomer (Deutschland)	Biomer
	Metabolix (USA)	Biopol
	Mitsubishi (Japan)	Biogreen

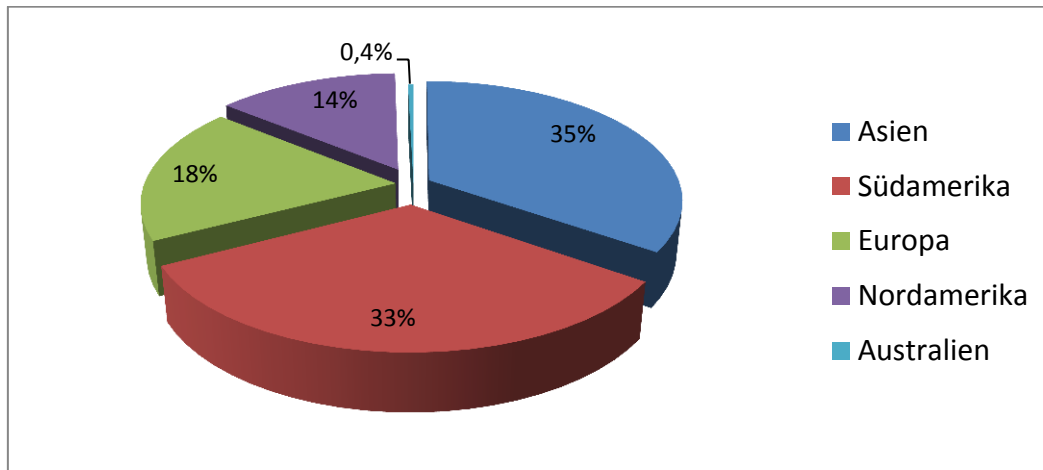
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Beucker, Marscheider und Carus 2007, S.32.

3.3.2. Orientierungsgebende Länder

Der Biokunststoffmarkt, sowohl die Zahl der Unternehmen als auch die wichtigsten Länder die am meisten zur Entwicklung des Marktes beitragen, ist leicht überschaubar. Biokunststoffe sind nicht überall auf der Welt gleichmäßig vertreten, wie die Abbildung 9 deutlich zeigt. Asien und Südamerika sind die größten Hersteller von Biokunststoffen. An dritter Stelle

folgt Europa knapp vor Nordamerika, während Australien mit 0,4% der gesamten Produktionskapazitäten auf diesem Gebiet ganz hinten ansteht (European Bioplastics 2011b).

Abbildung 9: Weltweite Produktionskapazitäten von Biokunststoffen nach Region



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an European Bioplastics 2011b.

Japan, als größter Vertreter in Asien, verfügt schon seit über 20 Jahren über Gesetze und Regelungen, die japanische Unternehmen motiviert, sich der Forschung von Biokunststoffen zu widmen. Frankreich fördert die Landwirtschaft und den Anbau nachwachsender Rohstoffe durch bestimmte Gesetze, während in den Niederlanden Zuschüsse für die Produktionsumstellung auf Biokunststoffe erteilt werden. Weitere orientierungsgebende Länder sind Großbritannien wo Verpackungen aus Biokunststoffen schon seit Jahren in Supermärkten zu finden sind, und die USA wo die Vernetzung zwischen der Landwirtschaft und der chemischen Industrie gefördert wird (Beucker, Marscheider-Weidemann und Carus 2007, S.35f.).

3.3.3. Zusammenarbeit in der Biokunststoffbranche

Die größten Hersteller von Biokunststoffen kommen sehr oft von der chemischen und der biotechnologischen Industrie. Allgemein ist der Bereich der Biokunststoffe ein interdisziplinäres Forschungsgebiet, mit dem sich viele unterschiedliche Felder beschäftigen. Es vereint wichtige Erkenntnisse der Kunststoffforschung und der Chemie, sowie das Wissen über die Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe. Aus diesem Grund sind auch unterschiedliche Or-

ganisationen für die Entwicklung von Biokunststoffen verantwortlich (Beucker, Marscheider-Weidemann und Carus 2007, S.36f.).

Auf dem europäischen Kontinent sollte der Verband „European Bioplastics“ erwähnt werden. 1993 in Deutschland gegründet, repräsentiert und vereint er die Mitglieder aus der Landwirtschaft, Chemie-, Kunststoff- und Recyclingindustrie, sowie industrielle Anwender der gesamten EU (European Bioplastics 2012a). Weitere nennenswerte Verbände in der EU sind Belgian Biopackaging, Club Bioplastiques und Belangenwereeniging Composteerbare Producten Nederland (Beucker, Marscheider-Weidemann und Carus 2007, S.37).

3.4. Bioplastikmarkt Österreich

Auch in Österreich besteht schon seit einigen Jahren Interesse für Biokunststoffe. Zahlreiche Unternehmen, Institutionen und Organisationen beschäftigen sich mit der Entwicklung von nachhaltigen und umweltschonenden Technologien. So werden nach Schätzungen in Österreich bereits 50.000 Tonnen jährlich an Biokunststoffen hergestellt, was aber im Vergleich zur gesamten Produktionskapazität in Europa eher gering ausfällt (Bruckner und Goldenits 2011, S.5). Ähnlich wie der gesamte Entwicklungstrend von Biokunststoffen sollen auch in Österreich das Interesse, die Kapazitäten und die Investitionen in Zukunft in diesem Bereich zunehmen (Wilhelm und Reitinger 2006, S.51f.).

Die stärksten österreichischen Vertreter der Biokunststoffbranche sind BioBag Austria und Naturabiomat GmbH (Bruckner und Goldenits 2011, S.11). **BioBag Austria** gehören zu den weltweit größten Herstellern von Biokunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, welche nach der EN 13432 vollständig biologisch abbaubar sind. Zu dem Sortiment gehören Müllsäcke, Einkaufstaschen, Hundekotbeutel, Mulschichten, Handschuhe, sowie Cateringprodukte. Mit Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen wurden **Naturabiomat GmbH** 2011 zusammen mit ihrem deutschen Tochterunternehmen zum Marktführer in Zentraleuropa (Bio-based News 2011). Auch dieses Unternehmen umfasst ein breites Sortiment an Produkten.

In Österreich tragen nicht nur Unternehmen, sondern auch Forschungszentren, sowie Verbände zur Entwicklung von Biokunststoffen bei. So hat die österreichische Energieagentur das Programm „nawaro“ gestartet, um den Verbrauchern und Interessenten einen Überblick

über Biokunststoffe und Akteure auf dem österreichischen Markt zu bieten (Bruckner und Goldenits 2011, S.11)

Laut einer Befragung (Jarmai 2008, S.82f.) sind folgende Beweggründe für österreichische Unternehmen für die Forschung und den Vertrieb, im Feld der Biokunststoffe, ausschlaggebend:

- Nachfrage nach einer bestimmten Qualität
- Nachfrage nach nachhaltigen Produkten
- Nutzung neuer Technologien
- Marketing
- Sinkende Rohölreserven
- Soziale Verantwortung
- Sinnstiftung

Außerdem kamen bei dieser Umfrage auch die größten Hindernisse für österreichische Unternehmen zum Vorschein. Die Einsatzbereiche für Produkte aus Biokunststoffen sind in Österreich immer noch sehr beschränkt. Auch der Zugang zu bestimmten Werkstoffen, sowie die Verfügbarkeit von Rohstoffen sind noch teils limitiert. Weitere Hindernisse sind die hohen Kosten für die Herstellung von Biokunststoffen, schwierige Zusammenarbeit mit Großhändlern, sowie die nötige Umstellung von Produktion und Logistik (Jarmai 2008, S.86).

Zu den Maßnahmen, die in Österreich unternommen werden sollten um zur weiteren Entwicklung des Biokunststoffmarktes beizutragen, gehören bestimmte Gesetze und Zielvorgaben wie die „Öko-Steuer“ und Abfallwirtschaftsgesetz, welche in anderen Ländern Europas eingesetzt werden. Außerdem spielen die öffentliche Beschaffung, sowie öffentlich zugängliche Informationen für Unternehmen und Konsumenten eine große Rolle. Zu guter Letzt sollte die Förderung von Forschung und Entwicklung in diesen Bereichen nicht außer Acht gelassen werden (Jarmai 2008, S.89ff.).

Während in diesem Abschnitt die Einflussfaktoren, die Trends und der aktuelle Stand des gesamten Kunststoffmarktes vorgestellt wurde, folgt im nächsten Kapitel eine Einführung in die Umweltökonomie und die wichtigsten Methoden zur Bewertung der Umwelt.

4. Umweltökonomie

Die Lebensqualität der Menschen steht in direktem Zusammenhang mit dem Umweltzustand. Als Konsequenz vieler menschlicher Handlungen sind saubere Luft, Gewässer, Wälder und eine große Artenvielfalt heute in vielen Teilen der Welt keine Selbstverständlichkeit mehr. Viele Bestandteile der Umwelt können nicht mehr als „freie“ Güter angesehen werden, sondern fallen unter das Konzept der „Knappheit“. Ähnlich wie bei gewöhnlichen Konsumgütern, gilt auch für Umweltgüter das Problem der angebrachten Allokation. Da unter dem Begriff der Umweltökonomie *„...die notwendige Reaktion auf die bewusst gewordene Knappheit verschiedener Umweltgüter“* (Wiesmeth 2003, S.41f.), verstanden wird, beschäftigt sich die Umweltökonomie mit folgenden Fragen (Wiesmeth 2003, S.42):

- Welche Umweltgüter werden benötigt?
- Wie sollen diese Umweltgüter zur Verfügung gestellt werden?
- Für wen sollen diese Güter zur Verfügung gestellt werden?
- Welcher Mechanismus kann zur Lösung dieser Probleme beitragen?

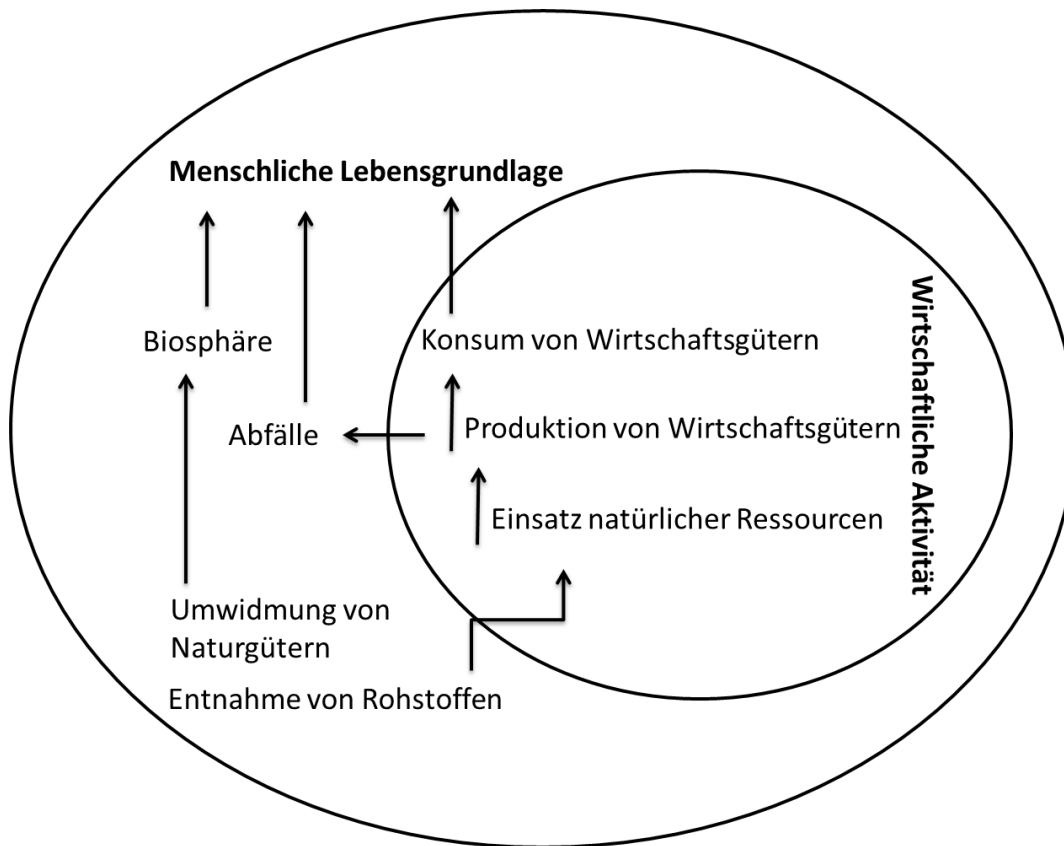
Im folgenden Abschnitt 4.1. werden die verschiedenen Konzepte und Methoden zur Beurteilung der Umwelt näher erläutert. Außerdem wird in diesem Zusammenhang ein Vergleich zwischen konventionellen Kunststoffen und Biokunststoffen, im Hinblick auf die Abfallwirtschaft, mit Augenmerk auf die verschiedenen Methoden der Abfallentsorgung, sowie deren Bewertung, geliefert.

4.1. Bewertung der Umwelt: Konzepte

Um die Vorteile der Erhaltung von Umweltgütern beziehungsweise die Nachteile, welche durch die Zerstörung dieser Güter entstehen, messen zu können, werden verschiedene Methoden eingesetzt. Die Ergebnisse, die diese Messungen liefern, können danach mit den Kosten verglichen werden und somit den Entscheidungsträgern helfen Entscheidungen zu treffen, welche den Nettonutzen der Gesellschaft maximieren. Ökonomische Bewertungen der Umwelt sind anthropozentrisch, somit werden die Vermögenswerte der Umwelt an deren

Nutzen für den Menschen bewertet (Mendelsohn und Olmstead 2009, S.326). Abbildung 10 zeigt die Beziehung zwischen Mensch, Wirtschaft und Natur.

Abbildung 10: Beziehung zwischen Mensch, Wirtschaft und Natur



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schaltegger 2000, S.10.

Der Wert der Umweltgüter kann mehrere Bestandteile haben, den Wert der Nutzung und Nichtnutzung eines Umweltgutes, den Optionswert und den Existenzwert. Der Wert der Nutzung eines Gutes beinhaltet immer eine beobachtbare Wechselbeziehung zwischen den Menschen und der Umwelt und kann direkt und indirekt sein. Der direkte Nutzungswert entsteht für Individuen, zum Beispiel beim Wandern durch Wälder oder beim Schwimmen in Seen (Mendelsohn und Olmstead 2009, S.326). Der indirekte Nutzungswert beziehungsweise der funktionelle Wert besteht in dem indirekten Nutzen der Menschen, welcher als Folge der primären Funktion unterschiedlicher ökologischer Systeme und Prozesse entsteht. Zum Beispiel die Fähigkeit der Wälder CO₂ aus der Atmosphäre zu sequestrieren hat positive Effekte auf den globalen Klimawandel. Der Wert der Nichtnutzung eines Umweltgutes leitet sich aus

dem psychischen Nutzen für den Menschen her und dem bloßen Wissen, dass eine gefährdete Spezies überlebt, eine Ressource existiert oder dem Wunsch ein bestimmtes Umweltgut für zukünftige Generationen zu erhalten. Optionswerte beziehen sich auf alle Nutzungswerte, welche zu einem zukünftigen Zeitpunkt realisiert werden können. Zum Beispiel in der Zukunft neu entdeckte Anwendungen für Pflanzen im Medizinbereich. Der Existenzwert eines Umweltgutes ist am schwierigsten zu bestimmen, da es verschiedene Ansichtsweisen zur Feststellung dieses Wertes gibt. Einerseits versteht man unter dem Existenzwert alle Nichtnutzungswerte und sogenannte „stellvertretende“ Nutzungswerte der Umweltgüter, zum Beispiel das Betrachten einer Fernsehsendung über die tropischen Wälder. Andererseits versteht man darunter den kognitiven Wert eines Gutes. Der Wert besteht darin, dass man in der Lage ist an eine bestimmte Ressource zu denken (Torras 2000, S.286).

Nachdem der Begriff des Wertes eines Umweltgutes genauer erklärt wurde, werden nun in den folgenden Kapitel 4.1.1 und 4.1.2. die Konzepte der ökologischen Bewertung aus der wirtschaftlichen Perspektive näher erläutert.

4.1.1. Das wirtschaftliche Konzept der ökologischen Bewertung

Der wirtschaftliche Nutzen eines Umweltgutes ergibt sich aus der Wechselwirkung zwischen den Menschen und dem Umweltgut. Bei Gütern, welche auf dem Markt gehandelt werden, sowie Holz, Pflanzen, Öl und Land, kann der Wert anhand von deren Preis ermittelt werden (Mendelsohn und Olmstead 2009, S.326).

Um größere Wertveränderungen der Güter beurteilen zu können, werden Angebots- und Nachfragefunktionen für jedes Gut herangezogen. Beide Funktionen stellen die Beziehung zwischen der Menge und dem Preis eines Gutes dar, die erste in Abhängigkeit der Konsumenten und die zweite in Abhängigkeit der Unternehmen. Der Gesamtwert eines Gutes ist die Differenz zwischen dem Bereich unterhalb der Nachfrage- und oberhalb der Angebotsfunktion bis zur verbrauchten Menge. Es ist der Unterschied zwischen der Zahlungsbereitschaft der Konsumenten, für jede Einheit eines bestimmten Gutes oder Services, und der Kosten, die anfallen um dieses Gut herzustellen (Mendelsohn und Olmstead 2009, S.326).

Für Waren und Dienstleistungen, welche nicht auf dem Markt gehandelt werden, müssen stattdessen andere wirtschaftliche Techniken, die im Einklang mit der Theorie über Märkte, Preise, Angebot- und Nachfragefunktionen, angewandt werden (Mendelsohn und Olmstead 2009, S.326). Diese Techniken werden im folgenden Kapitel 4.1.2. näher erklärt.

4.1.2. Zahlungsbereitschaft und Kompensationsbereitschaft

Nach dem Prinzip der **Zahlungsbereitschaft** ist der Wert eines Umweltgutes jene Summe, welche alle Mitglieder der Gesellschaft bereit sind dafür zu zahlen (willingness-to-pay). Dabei hängt die Höhe der Zahlungsbereitschaft von mehreren Faktoren ab. Zum einen ist ein wichtiges Prinzip die „Veränderung“ oder der „Unterschied“ des Zustandes. Abhängig von der Zustandsveränderung ändert sich auch die Höhe des empfundenen Wertes. Diese Abweichung kann zum Beispiel die Verringerung des Verkehrslärmes oder die Senkung der Treibhausemissionen sein, sowie die Vermehrung der Grünflächen (Schläpfer 2005, S.9).

Ein weiterer Faktor, der die Zahlungsbereitschaft beeinflusst, ist das Einkommen. Je höher das Einkommen ist, desto mehr kann eine Person in eine höhere Umweltqualität investieren. In Abhängigkeit der Einkommensverteilung ist der ökonomische Wert eines Gutes dadurch verzerrt. Daher ist es vorteilhaft bei der Wertermittlung eines Gutes mit Hilfe der Zahlungsbereitschaft, die alternativen Verwendungen der zur Verfügung stehenden Ressourcen zu kennen (Schläpfer 2005, S.9).

Das Konzept der **Kompensationsbereitschaft**, der Wert den eine Person bereit ist zu erhalten, um ein bestimmtes Gut, welches sie besitzt, abzugeben, kann stark von der Zahlungsbereitschaft abweichen. Zum einen hängt es davon ab, wie leicht ein Gut substituiert werden kann, denn je leichter ein Gut austauschbar ist, desto geringer wird sein Wert eingeschätzt. Zum anderen spielt die „Verlust-Aversion“ bei der Kompensationsbereitschaft eine große Rolle. Laut der „Verlust-Aversion“ werden Waren, die sich bereits im Besitz eines Menschen befinden, vom Besitzer als wertvoller angesehen, als Güter die er erwerben kann (Schläpfer 2005, S.10).

Welches Wertkonzept, welche Zahlungs- oder Kompensationsbereitschaft angewendet werden sollte, hängt von der jeweiligen rechtlichen Situation und dem konkreten Zusammenhang ab (Schläpfer 2005, S.10).

4.2. Bewertung der Umwelt: Methoden

Während im vorherigen Abschnitt 4.1. die theoretischen Aspekte der Bewertung von Umweltressourcen besprochen wurden, werden nun die empirischen Methoden zur Bestimmung des ökonomischen Wertes eines Umweltgutes analysiert. Wie es im folgenden Abschnitt 4.2. dargestellt wird, wurden verschiedene Techniken entwickelt und angewandt, um den Wert natürlicher Ressourcen zu messen. Obwohl die Bewertungsmethoden anhand mehrerer Grundlagen unterschieden werden können, folgt in dieser Arbeit die Unterteilung in folgende drei Gruppen (Schläpfer 2005, S.14):

- Ansätze anhand der Entscheidungen am Markt
- Ansätze anhand von politischen Entscheidungen
- Finanzwirtschaftliche Bewertungen

Die einzelnen Methoden werden in den Abschnitten 4.2.1 bis 4.2.3 näher beschrieben.

4.2.1. Ansätze anhand von Entscheidungen am Markt

Zu den Methoden, welche abhängig von Marktentscheidungen sind, zählen die Produktionskostenmethode, der Reparatur- und Reisekostenansatz, die Marktpreismethode, die Reisekostenmethode und die kontingente Bewertungsmethode.

Bewertung anhand von Produktionsfunktionen

Das wirtschaftliche System benötigt bestimmte Umweltmerkmale um zu funktionieren. Diese Umweltmerkmale stehen als Quelle von Energie und Rohstoff, als Senkung der Abfallprodukte, sowie direkt als Quelle von Nutzen zur Verfügung. Die Methode der Produktionsfunk-

tion versucht zu beschreiben, wie sich diese Umweltmerkmale auf die wirtschaftliche Tätigkeit eines Unternehmens auswirken (Schläpfer 2005, S.12).

Wenn ein ökologisches Attribut in die Produktionsfunktion eines Unternehmens eintritt, hat es einen Einfluss auf den Produktionsprozess und auf den Gewinn, der im Unternehmen realisiert wird. Kommt es zu Veränderungen der Umweltattribute kann, im Sinne dieser Methode, der Wert dieser Attribute anhand der Schwankungen des Gewinnes bestimmt werden. Dabei kann jedoch nicht vom „echten“ Wert eines Umweltgutes gesprochen werden, sondern vom repräsentativen Wert der Auswirkungen in Folge einer Umweltveränderung (Dosi 2000, S.13f.).

Dieser Ansatz wird in zwei Schritten durchgeführt: Zuerst werden die physischen Auswirkungen einer Umweltveränderung auf die Produktionstätigkeit bestimmt, danach erfolgt die Bewertung dieser Veränderung im Bezug auf die Änderung des Aktivitätsoutputs. Diese Bewertungsmethode wird sehr oft angewendet um Auswirkungen von schwankender Umweltqualität zu messen, vor allem im Bereich der Landwirtschaft und Fischerei. Darunter zählen Erscheinungen, wie zum Beispiel „saurer“ Regen und Wasserverschmutzung, sowie Auswirkungen von Wasserumleitung und Maßnahmen zum Schutz von Hurrikan-Schäden (Dosi 2000, S.14).

Bewertung anhand von Reparatur- und Vermeidungskosten

Als Basis der Bewertung anhand von Reparatur- und Vermeidungskosten dient der Wiederherstellungswert eines Umweltgutes. Dieser Restaurierungswert ist das Maß für die Kosten/Nutzen von (vermiedenen) negativen Veränderungen der Umwelt. Dabei sollten die Reparatur- beziehungsweise Sanierungskosten den wirtschaftlichen Wert des Gutes nicht überschreiten, da Individuen nicht bereit sind mehr Geld in die Vermeidung eines Schadens zu investieren, als der Schadenshöhe selbst (Dosi 2000, S.19f.).

Diese Methode wird oft in der Kosten-Nutzen-Analyse von neuen Projekten und öffentlichen Maßnahmen angewendet und in einigen Ländern bildet sie die Basis in der Schadensbegutachtung. Jedoch, im Fall von Substitutionsmöglichkeiten, welche mit niedrigeren Kosten er-

worben werden können, liefert diese Methode eine Überschätzung des wahren Schadenswertes (Dosi 2000, S.19f.).

Marktpreismethode (Hedonische Bewertungsmodelle)

Nach dem Grundgedanken der Marktpreismethode ist der Wert eines Umweltgutes die Summe aller impliziten Preise seiner einzelnen Eigenschaften. Zum Beispiel bildet sich der Wert einer Immobilie anhand verschiedener Eigenschaften, wie der physikalischen Struktur (Anzahl der Zimmer und Größe), den Merkmalen der Umgebung (Transportmöglichkeiten, Nähe zum Arbeitsplatz, Qualität der Schulen) und den Umweltqualitäten (sauberes Wasser und Luft, sowie Nähe der Grünflächen). Der hedonische Preisansatz sammelt Daten über die Preise der Hausverkäufe und der Hauseigenschaften und schätzt die marginalen, impliziten Preise dieser Eigenschaften. Somit wird der marginale Wert der Umweltfreundlichkeit für die Hausbesitzer erfasst. Diese Methode wird sehr oft angewendet, um den ökonomischen Wert der Luftqualität, den Zugang zu Feuchtgebieten und Grünflächen, sowie Unannehmlichkeiten wie Altlasten und Fluglärm und somit deren Einfluss auf die Immobilienpreise zu bestimmen (Mendelsohn und Olmstead 2009, S.331).

Um jedoch den Wert der einzelnen Eigenschaften bestimmen zu können, müssen Käufer und Verkäufer gute Informationen über die Merkmale aller Immobilienalternativen besitzen. In diesem Sinne eignet sich diese Methode nur für beobachtbare oder bekannte Vorzüge beziehungsweise Unannehmlichkeiten, was einen großen Nachteil darstellt (Mendelsohn und Olmstead 2009, S.331).

Eine weitere Form der Marktpreismethode stellt der hedonische Lohnansatz dar. Diese Methode wird in erster Linie angewendet, um das Mortalitätsrisiko an der Arbeitsstelle zu bewerten. Schwankungen der Gehälter nach dem Stellenprofil zeigen den marginalen Wert der einzelnen Eigenschaften der Arbeitsstelle und somit auch die Gefahr des zufälligen Todes oder der Körperverletzung während der Arbeit (Mendelsohn und Olmstead 2009, S.331).

Reisekosten Methode

Die Reisekostenmethode wurde in erster Hinsicht entwickelt, um den Wert eines Erholungsgebietes zu bestimmen. Dabei wird der Nutzen eines Naturgutes anhand der Variation der Reisekosten, die Menschen bereit sind zu zahlen, um einen bestimmten Ort zu besuchen, bewertet. Die Beziehung zwischen Fahrtkosten und Besuchsraten ermöglicht die Abschätzung einer Nachfragefunktion für den Erholungsort (Mendelsohn und Olmstead 2009, S.330).

Hierbei werden zwei Ansatzpunkte unterschieden: Anzahl der Besuche und Auswahl des Zielortes aus Alternativen. Im ersten Fall stellt die Anzahl der Besuche eine Funktion der Reisekosten dar, welche proportional zu der Entfernung zum Zielort sind. Bei diesem Ansatz werden Substitutionsgüter und die unterschiedlichen Merkmale, die diese besitzen, ganz außer Acht gelassen, welches den größten Nachteil darstellt. Um dieses Problem zu eliminieren wurde der zweite Ansatz entwickelt (Dosi 2000, S.20f.).

Die Reisekostenmethode ist sowohl in Industrie,- als auch in Schwellenländern weit verbreitet, um den Wert von natürlichen Ressourcen zu evaluieren, insbesondere die Zahlungsbereitschaft von internationalen Touristen für Wildnis Gebiete (Dosi 2000, S.21).

Zahlungsbereitschaftsbefragung

Bei der Zahlungsbereitschaftsbefragung werden Umfragen durchgeführt, bei denen einzelne Personen direkt über ihre Präferenzen und Zahlungsbereitschaft für bestimmte Umweltqualitäten befragt werden. Dabei werden die Befragten aus einer Zufallsstichprobe ausgewählt. Bei der Vorbereitung der Umfrage müssen folgende Punkte beachtet werden (Schläpfer 2005, S.18):

- die Fragen müssen deutlich und verständlich formuliert sein und das zu bewertende Umweltgut muss deutlich zu erkennen sein,
- das Zahlungsmittel muss realistisch sein,
- strategische Antworten sollten vermieden werden,

- „Protest-Antworten“ sollten identifiziert und bei der Analyse als solche behandelt werden und
- es sollte sichergestellt werden, dass die Befragten die Aufgabe verstanden haben.

Die Zahlungsbereitschaftsbefragung wird oft für die Unterstützung der öffentlichen Entscheidungsfindung angewendet, vor allem um Projekte mit positivem Einfluss auf die Umwelt zu bewerten. Ein großer Vorteil dieser Methode ist die Fähigkeit, sowohl Nutzungs- als auch Nichtnutzungswerte eines Projektes zu schätzen, während Nachteile in Form von Verzerrungen, abhängig vom Fragenformat (offen oder geschlossen), entstehen (Dosi 2000, S.27ff.).

4.2.2. Ansätze anhand von politischen Entscheidungen

Zu den Methoden, welche anhand von politischen Entscheidungen den Wert eines Umweltgutes bestimmen, gehören die Analyse von Volksabstimmungen und der Medianwähleransatz, welche im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

Analyse von Volksabstimmungen

„Stimmbürger wägen Steuer-Kosten und Nutzen von Abstimmungsvorlagen ab. Wenn die Stimmenden die individuellen Kostenfolgen einer Finanzierungsvorlage abschätzen können, dann gibt das Abstimmungsverhalten Aufschluss über die minimale Zahlungsbereitschaft (bei Ja-Stimmenden) bzw. maximale Zahlungsbereitschaft (bei Nein-Stimmenden) für eine Vorlage“ (Schläpfer 2005, S.20).

Bei dieser Methode werden Volksabstimmungen abgehalten, um die Finanzierung von Umweltgütern zu bestimmen, als Alternative zu Umfragemethoden. Außerdem können die Ergebnisse der Bewertung auch auf vergleichbare Studien übertragen werden und somit ein Benefit-Transfer realisiert werden (Schläpfer 2005, S.20).

Medianwähleransatz

Anhand dieser Methode entscheidet der Staat über das Budget für öffentliche Maßnahmen zum Naturschutz. Dabei wird die Höhe des Budgets durch Wahlprozesse bestimmt. Diese Prozesse laufen nach dem Mehrheitsprinzip ab, wobei jeder Wähler eine Stimme hat und der Budgetvorschlag mit mehr als 50% der Stimmen angewendet wird. *„Der Medianwähler ist der Bürger, dessen bevorzugtes Ausgabenniveau dem Median unter allen bevorzugten Ausgabenniveaus entspricht (Schläpfer 2005, S.21).“*

4.2.3. Finanzwirtschaftliche Bewertungen

Die wichtigsten finanzwirtschaftlichen Bewertungsmethoden, die in der Umweltökonomie eingesetzt werden, sind die Kosten-Nutzen-Analyse, die Kosten-Nutzwertanalyse und die Kosten-Wirksamkeits-Analyse.

Kosten-Nutzen-Analyse

Die Kosten-Nutzen-Analyse ist eines der bekanntesten Instrumente zur Beurteilung von wirtschaftlichen Faktoren eines Projektes oder Programmes. Dabei ist es erforderlich alle finanziellen, wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Auswirkungen zu beurteilen. Das Hauptziel einer Kosten-Nutzen-Analyse ist es, alle möglichen Auswirkungen eines Projektes zu analysieren und zu monetarisieren, um so die Kosten und Nutzen des Projektes zu bestimmen. Anschließend werden die Ergebnisse aggregiert und Schlussfolgerungen gezogen, ob das Projekt oder Programm vorgenommen werden sollte. Die Auswertung findet im Einklang mit den vorher definierten Zielen statt, welche im Bezug auf die Gesellschaft, in der das Projekt einen Einfluss hat, definiert werden. Kosten und Nutzen sollten unter Berücksichtigung der Ergebnisse eines alternativen Szenarios, in welchem das Projekt nicht durchgeführt wird, inkrementell bewertet werden (European Union 2006, S.4).

Die Vorgehensweise einer Kosten-Nutzen-Analyse sieht folgendermaßen aus (Hanusch 2010, S.7):

- Bestimmung der Nebenbedingungen
- Bestimmung der Alternativen
- Bestimmung der Projektwirkungen
- Zeitliche Homogenisierung
- Gegenüberstellung der Kosten und Nutzen
- Berücksichtigung von Risiko und Unsicherheit
- Erstellung einer Rangordnung der Alternativen

Die Ergebnisse der Analyse werden in einem Endbericht präsentiert, in dem auch alle Probleme, die im Zusammenhang mit der Analyse aufgetreten sind, angesprochen werden müssen (Hanusch 2010, S.7).

Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse wurde als Erweiterung der Kosten-Nutzen-Analyse entwickelt, da diese nicht nur die monetären Werte der Elemente eines Projektes beurteilt, sondern auch die persönlichen Präferenzen des Entscheidungsträgers berücksichtigt. Das Hauptziel dieses Bewertungsverfahrens ist es, den Nutzwert mehrerer Projekte oder Alternativen, die zur Lösung eines bestimmten Problems beitragen, zu vergleichen und eine Rangordnung zu erstellen. Dabei ist das Projekt mit dem höchsten Nutzwert das vorteilhafteste. Allgemein stellt der Nutzwert einen subjektiven Wert dar, der vom Entscheidungsträger bestimmt wird (Hanusch 2010, S.175).

Die Nutzwertanalyse wird mit Hilfe der folgenden Schritte durchgeführt (Hanusch 2010, S.175f.):

- Erfassung der Ziele
- Bestimmung der Nebenbedingungen
- Bestimmung der Alternativen
- Wirksamkeits- oder Zielertragsanalyse

- Ermittlung der Zielerfüllungsgrade
- Gewichtung der Zielerfüllungsgrade
- Amalgamation und Entscheidung

Kosten-Wirksamkeits-Analyse

Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse gehört zu den bedeutendsten Analysen der finanzwirtschaftlichen Bewertung. Das Ziel dieser Analyse ist es, aus einer Anzahl an möglichen Alternativen, bei denen der Nutzen nicht monetär gemessen werden kann, die vorteilhafteste zu bestimmen (Hanusch 2010, S.161). Diese Bewertungsmethode wird im Kapitel 5 dieser Arbeit detaillierter beschrieben.

Nachdem ein Überblick der Umweltökonomie und der wichtigsten Bewertungsmethoden der Umwelt gegeben wurde, werden nun im folgenden Abschnitt Ökobilanzen von Biokunststoffen, sowie die gängigsten Methoden zur Abfallbeseitigung von Bioplastik erläutert.

4.3. Ökobilanz von Biokunststoffen

Eine Ökobilanz ist ein Analyseinstrument zur Messung von Einflüssen von Produkten oder Dienstleistungen auf die Umwelt. Auch im Bereich der Biokunststoffe wurden schon zahlreiche Analysen durchgeführt. Dabei werden alle Faktoren, die einen Einfluss auf die Umwelt haben, bewertet und alle Etappen im Lebenszyklus eines Produktes in Betracht gezogen. Auf diese Weise werden wichtige Informationen zu den positiven und negativen Umwelteinflüssen, möglichen Szenarien, sowie Verbesserungsmöglichkeiten gewonnen. Die Ökobilanz stellt somit eine wichtige Basis für Entscheidungsträger bzgl. ökonomischer, ökologischer und politischer Fragen eines Produktes dar (European Bioplastics 2008, S.3).

Laut dem Verband European Bioplastics (2008, S.5) hängen die Ergebnisse einer Ökobilanz von Biokunststoffen von folgenden den Punkten ab:

- den verwendeten Rohstoffen,
- dem Herstellungsprozess,

- dem Transport,
- der Nutzung durch den Endverbraucher und
- den Entsorgungsmöglichkeiten.

In Abhängigkeit von diesen Faktoren schwanken die Resultate der Analyse. Außerdem befinden sich Biokunststoffe in ihrer frühen Entwicklungsphase, werden aber regelmäßig mit herkömmlichen Kunststoffen verglichen, obwohl diese ausgereifte Materialien sind und Jahrzehnte lang optimiert wurden. Diese Tatsache, sowie das Optimierungspotenzial von Biokunststoffen müssen während der Analyse berücksichtigt und integriert werden, da es ansonsten zu unausgewogenen Ergebnissen kommen kann (European Bioplastics 2008, S.5).

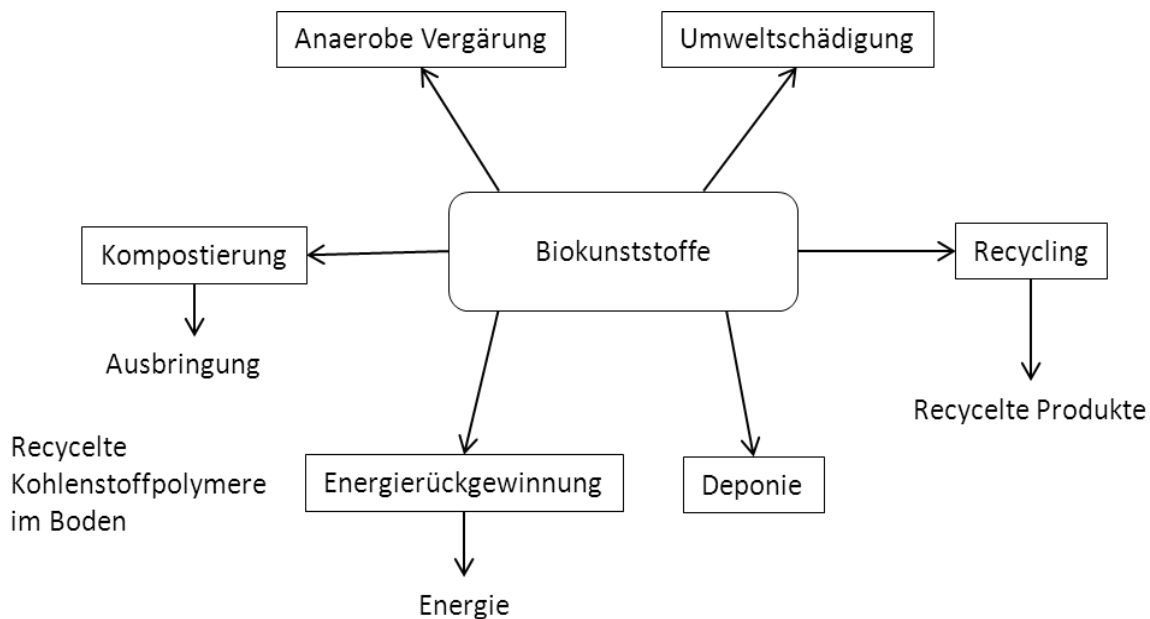
Ergebnisse mehrerer Ökobilanzen (Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008), in denen Biokunststoffe mit fossilen Kunststoffen verglichen wurden, zeigen deutlich vorteilhaftere Werte von Biokunststoffen, was die Treibhausgasemissionen, Energieverbrauch und Schädlichkeit für den Menschen betrifft. Andererseits haben sie einen negativen Einfluss auf Land und Gewässer durch Übersäuerung und Überdüngung. In keiner Analyse auf die Umweltschädlichkeit konnten Biokunststoffe vollends überzeugen, da sie immer in bestimmten Punkten schlechter abgeschnitten haben im Vergleich zu traditionellen Kunststoffen.

Für diese Arbeit liefern Ökobilanzen von Biokunststoffen die nötigen Daten für die Wirksamkeitsanalyse. In dem Sinne wird im Kapitel 5.2.5. eine detaillierte Zusammenfassung mehrerer Ökobilanzen vorgestellt, sowie die untersuchten Einflusskategorien auf die Umwelt und die erzielten Ergebnisse.

4.4. Abfallwirtschaft von Biokunststoffen

Im folgenden Abschnitt werden die Entsorgungs- und Verwertungsmöglichkeiten von Biokunststoffen am Ende ihres Lebenszyklus diskutiert. Abbildung 11 stellt die gängigen Methoden der Abfallentsorgung von Biokunststoffen dar. Die einzelnen Methoden zu Entsorgung: Recycling, Verbrennung, Deponie und biologische Abfallbehandlung, werden dabei näher erläutert, sowie deren Auswirkung auf die Umwelt.

Abbildung 11: Integration von Biokunststoffen mit den Entsorgungsinfrastrukturen



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Song et. al. 2009, S.2131

4.4.1. Recycling

Beim mechanischen Recycling werden Abfallmaterialien wiederverwertet in Form von „neuen“ Sekundär-Rohstoffen, ohne dabei die Grundstruktur des Materials zu verändern. Dabei werden spezielle Einrichtungen gebraucht, um die riesige Menge an Materialien, die aus unterschiedlichen Materialtypen, Größen und Formen besteht, zu trennen und zu sortieren. Eine ordnungsgemäße Kennzeichnung der Materialien ist hier sehr wichtig, um eine hohe Reinheit der Recyklate zu garantieren. In dem Sinne wurden verschiedene Technologien entwickelt, wie Infrarot, Laser und Röntgenverfahren um die Materialien zu identifizieren. Nach dem Reinigen und Schleifen wird das Material durch Umschmelzen und Regranulieren wiederhergestellt. Die neuentstandenen Materialien können nun mit den gängigen Technologien der Kunststoffkonvertierung weiterverarbeitet werden (European Bioplastics 2010b, S.3).

Grundsätzlich kann für das Recycling von biobasierten Kunststoffen die gleiche Technologie angewendet werden wie für konventionelle Kunststoffe, während biologisch abbaubare Kunststoffe nicht wirklich dafür geeignet sind (European Bioplastics 2010b, S.3). Aufgrund

ihrer chemischen Struktur sind jedoch manche Arten von Biokunststoffen besser geeignet, um wiederverwertet zu werden als andere. Zum Beispiel können Stärke und natürliche Fasern in den Kunststoffen die Eigenschaften des Sekundär-Rohstoffes verschlechtern. Des Weiteren, wenn unterschiedliche Arten von Kunststoffen recycelt werden, müssen auch mögliche Inkompatibilitäten zwischen individuellen Polymeren berücksichtigt werden (Song, et al. 2009, S.2129f.).

Das Recycling von Biokunststoffen ist noch nicht vollständig ausgereift und hängt zum einen von der Menge der recycelten Biokunststoffe ab, welche neue Investitionen der Recycling-Industrie rechtfertigen sollte, sowie von der Entwicklung von Märkten für die, in diesem Prozess entstandenen sekundären Rohstoffe (European Bioplastics 2010b, S.5).

4.4.2. Verbrennung mit Energierückgewinnung

Die Verbrennung mit Energierückgewinnung oder die thermische Verwertung ist ein Verfahren der Abfallbehandlung, bei welchem die Energie der Materialien verwertet und gleichzeitig die Menge des Abfalls, welcher deponiert werden muss, verringert wird (European Bioplastics 2011a, S.3).

Der Energiegehalt von Biokunststoffen ähnelt dem des konventionellen Plastiks, wobei der Unterschied nur chemischer Natur ist. Zum Beispiel hat Polyolefin einen höheren Heizwert als Polyester, unabhängig von der Regenerierbarkeit oder der biologischen Abbaubarkeit des Materials. Ein weiterer Unterschied zwischen konventionellen und biobasierten Kunststoffen ist das durch die Verbrennung freigelassene CO₂. Das CO₂, welches durch die Verbrennung von biobasierten Kunststoffen erzeugt wird, gilt als CO₂ neutral, da es aus erneuerbaren und nicht fossilen Rohstoffen stammt. Somit tragen Biokunststoffe weniger zur potentialen Erderwärmung bei (European Bioplastics 2011a, S.6).

Dieses Verfahren zur Entsorgung von Biokunststoffen ist für alle Arten geeignet, sowohl für biobasierte, als auch biologisch abbaubare Kunststoffe, als auch für Gemische von Kunststoffabfällen, welche nicht mehr verwertbar sind. Außerdem trägt die Energierückgewinnung aus Biokunststoffabfällen zur Schonung der Ressourcen (Öl, Kohle, Gas) bei (European Bioplastics 2011a, S.6).

4.4.3. Deponie

Eine Deponie ist eine technische Anlage, in der Abfälle gelagert und vergraben werden. Historisch gesehen stellen Deponien die häufigste Methode der Abfallentsorgung auf der Welt dar (European Bioplastics 2011c, S.3f.).

Auf einer Deponie sollten gute Voraussetzungen für die Zersetzung biologisch abbaubarer Kunststoffe herrschen. Das Niveau der Abbaubarkeit und der gewonnenen Menge an Biogas hängen von der Temperatur, der Luftmenge, sowie der Feuchtigkeit in den Deponien ab. Diese Faktoren müssen bestimmte Werte einhalten, damit sich die Materialien zersetzen können (European Bioplastics 2011c, S.5).

Von allen vorgestellten Entsorgungsmethoden ist die Lagerung von Abfällen in Deponien, wegen den negativen Auswirkungen auf die Umwelt und Gesundheit, die unbeliebteste. Deponien erfordern eine sorgfältige Verwaltung, besonders in Bezug auf die Feuchtigkeit und Gase, um einen sicheren Ort für die Abfallbeseitigung darzustellen. Werden die Deponiegase sorgfältig energetisch verwertet, können diese zur Minimierung der Treibhausgase beitragen (European Bioplastics 2011c, S.5).

4.4.4. Biologische Abfallbehandlung

Innerhalb der biologischen Abfallbehandlung kann zwischen der aeroben Kompostierung und der anaeroben Vergärung unterschieden werden. Bei der Kompostierung werden durch das Einwirken von Bakterien oder Mikroorganismen organische Substanzen abgebaut und zerfallen zu CO₂, Wasser und Humus, wobei es zu hoher Hitzebildung kommt. Die anaerobe Vergärung hingegen findet mit Hilfe von Mikroorganismen und der Abwesenheit von Sauerstoff statt und resultiert in Biogas (Methan und CO₂) und Kompost, fast ohne Hitzebildung (European Bioplastics 2010a, S.3).

Der biologischen Abfallbehandlung können nur biologisch abbaubare Biokunststoffe unterzogen werden, dabei spielt die Erneuerbarkeit der Rohstoffe der Materialien keine Rolle. Außerdem ist diese Entsorgungsmethode, wegen den geringen negativen Umwelteinflüsse,

das wichtigste Entsorgungsverfahren für biologisch abbaubare Kunststoffe (Song, et al. 2009, S.2130).

Nachdem eine Übersicht der Umweltökonomie, sowie der wichtigsten Methoden zur Bewertung der Umwelt und Umwelteinflüsse beschrieben wurden, wird im folgenden Kapitel eine Kosten-Effektivitäts-Analyse von Biokunststoffen, im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffen, gemacht.

5. Kosten-Effektivitäts-Analyse von Biokunststoffen

Biokunststoffe gelten als mögliche Alternativen zu herkömmlichen Kunststoffen und sollen negative Effekte, welche diese auf die Umwelt haben, reduzieren. Diese Arbeit beschäftigt sich mit den unterschiedlichen Aspekten dieser Effekte und bringt sie in einen direkten Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffen, um so einen besseren Einblick auf die Vor- und Nachteile beider Kunststoffarten zu ermöglichen. Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe einer Kosten-Effektivitäts-Analyse die unterschiedlichen Umwelteinflüsse, welche sowohl „bio“ als auch „fossile“ Kunststoffe haben, zu erfassen und in Verbindung mit den jeweiligen Kosten zu setzen.

In diesem Kapitel werden zuerst die theoretischen Grundlagen und die Schritte zur Durchführung der Kosten-Effektivitäts-Analyse erklärt. Danach erfolgt die Analyse der ausgewählten Biokunststoffe im Vergleich zu einzelnen, herkömmlichen Kunststoffen. Im Anschluss folgen die Interpretation der Ergebnisse, sowie mögliche Handlungsempfehlungen.

5.1. Modellbeschreibung

Die Kosten-Effektivitäts-Analyse ist ein analytisches Verfahren, welches den Entscheidungsträger bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Alternativen unterstützen soll. Dabei werden die Alternativen im Hinblick auf ihre Kosten und Wirksamkeit einander gegenübergestellt, mit der Absicht die Handlungsoptionen zu finden, welche am meisten zur Erreichung der vorgegebenen Ziele beitragen (Quade 1968, S.1f.). Diese wird vor allem in den Bereichen des Verkehrs- und Verteidigungssektors, Gesundheits-, Bildungs- und Forschungswesens, sowie in der Umweltökonomie eingesetzt (Hanusch 2010, S.161).

Ein wichtiges Merkmal dieser Analyse, welches sie von anderen Wirtschaftlichkeitsrechnungen, wie zum Beispiel der Kosten-Nutzen-Analyse, unterscheidet, ist die Einbindung der Wirksamkeitsparameter in physischen und nicht in monetären Größen. Diese Wirksamkeiten können anhand Nominal-, Ordinal- und Kardinalskalen gemessen werden. Während die Nominalskala keine vergleichenden Aussagen ermöglicht, da sie die Kategorien nur durch Be-

schreibungen wie „ja oder nein“ messbar macht, ermöglicht die Ordinalskala einen direkten Vergleich der Parameter durch eine komparative Betrachtung. Kardinalskalen erlauben zusätzlich eine quantitative Messung der Eigenschaften und gelten somit als die geeignetste Methode zur Messung der Wirksamkeitsparameter der Kosten-Effektivitäts-Analyse (Hanusch 2010, S.162ff.).

Die Kosten-Effektivitäts-Analyse vermeidet einerseits die Probleme, welche mit einer Bewertung des Nutzens in monetären Einheiten entstehen, muss aber andererseits auch kritisch betrachtet werden, da hier der Nutzen nur eindimensional betrachtet werden kann und so eine große Einschränkung darstellt. Außerdem kann die Analyse nur dann sinnvolle Ergebnisse liefern, wenn sich alle Alternativen durch eine spezifische Wirkung unterscheiden und dabei keine weiteren Nebenwirkungen besitzen. Einen weiteren Kritikpunkt stellt der berechnete Ratio dar, der im Vergleich zu den gesamten Kosten indifferent ist und keine Angaben darüber gibt, wie hoch das Budget ist, sondern nur zeigt, welche der vergleichenden Handlungsoptionen die günstigste ist (Metz 2006, S.26f.).

Laut Hanusch (2010, S.162) wird die Kosten-Effektivitäts-Analyse in folgenden Schritten durchgeführt:

1. *Zielanalyse* – die verfolgten Ziele werden vollständig, widerspruchsfrei und operationalisierbar bestimmt
2. *Nebenwirkungen* - die relevanten Nebenbedingungen werden erfasst
3. *Alternativen Bestimmung* – alle alternativen Handlungsmöglichkeiten werden im Einklang mit den Zielen und Nebenwirkungen bestimmt
4. *Kostenanalyse* - Messung und Bewertung der Kosten
5. *Wirksamkeitsanalyse* – Quantifizierung der positiven und negativen Effektivität, wobei geeignete physische Maße angewendet werden müssen
6. *Zeitliche Homogenisierung* – falls möglich müssen die zeitlich unterschiedlich anfallenden Kosten und Wirksamkeiten diskontiert werden
7. *Berücksichtigung von Ungewissheiten* – Modifizierung der Daten unter der Berücksichtigung von Risiko

8. *Kosten-Wirksamkeits-Matrix/Kosten-Wirksamkeits-Ratio* – Zusammenfassung der Ergebnisse in der Form einer Kosten-Effektivitäts-Matrix beziehungsweise mit Hilfe von einem Kosten-Effektivitäts-Ratio.

5.2. Analyse

Im Abschnitt 5.2. werden die einzelnen Schritte der Kosten-Effektivitäts-Analyse im Hinblick auf den Vergleich zwischen mehreren herkömmlichen Kunststoffen und Biokunststoffen detailliert beschrieben.

5.2.1. Zielanalyse

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine umweltökonomische Evaluation der Senkung von umweltschädlichen Einflüssen von Biokunststoffen zu machen, um herauszufinden, wie ökologisch und ökonomisch der Umstieg von fossilen Kunststoffen auf Biokunststoffe wirklich ist. Dabei sollten die Eigenschaften von Biokunststoffen denen der fossilen Kunststoffe entsprechen und die höheren Kosten durch höhere Leistungen gerechtfertigt werden. Das Zielsystem sieht demnach folgendermaßen aus:

- Verringerung des fossilen Energiebedarfs
- Verringerung der Emission von Treibhausgasen
- Keine Erhöhung der Versäuerung von Landflächen, der Meere und dem Flusswasser
- Keine Erhöhung der Eutrophierung der Meere und des Flusswassers
- Keine Steigerung der photochemischen Ozonbildung
- Senkung des Verbrauchs abiotischer Ressourcen
- Senkung der Toxizität für den Menschen

5.2.2. Nebenbedingungen

Unter Nebenbedingungen einer Kosten-Effektivitäts-Analyse werden bestimmte einschränkende Rahmenbedingungen verstanden, welche in der Entscheidungssituation eine wichtige Rolle spielen und somit vor der Evaluierung berücksichtigt werden müssen (Hanusch 2010, S. 11).

Die erste wichtige Nebenbedingung, die einen Einfluss auf die Zielerreichung dieser Analyse hat, ist die Verfügbarkeit von Biokunststoffen. Diese gehören zu einer kleinen Industrie und die Produktionskapazitäten sind, wie bereits im Kapitel 3.1. gezeigt, deutlich geringer im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffen. Eine weitere Nebenbedingung sind die eingeschränkten Einsatzmöglichkeiten von Biokunststoffen. Die Anwendungsgebiete sind stark abhängig von den technischen Eigenschaften einzelner Kunststoffe. Während herkömmliche Kunststoffe schon seit mehreren Jahrzehnten weiter entwickelt und verbessert wurden, herrscht im Bereich der Biokunststoffe noch eine Menge Aufholbedarf um den gleichen technischen Stand wie die Plastikindustrie zu erreichen. Außerdem sind Biokunststoffe auf bestimmte gesetzliche Voraussetzungen und steuerliche Begünstigungen angewiesen, welche derzeit in vielen Ländern noch nicht gegeben sind.

5.2.3. Bestimmung der Alternativen

Für diese Arbeit wurden jeweils drei Alternativen aus der Gruppe der herkömmlichen Kunststoffe und drei aus der Gruppe der Biokunststoffe bestimmt. Die hier verwendeten Biokunststoffe sind Thermoplastische Stärke (TPS), Polymilchsäure (PLA) und Polyhydroxyfettsäuren (PHB). Die Wahl fiel auf diese drei Kunststoffe, da sie zum einen vollständig biologisch abbaubar und biobasiert sind und andererseits weil sie zu den stärksten Vertretern der Biokunststoffindustrie gehören. Die herkömmlichen Kunststoffe wurden anhand des Substitutionspotentials und ähnlicher Eigenschaften mit den Biokunststoffen ausgewählt. Diese sind: Polyethylen hoher Dichte (HDPE), Polypropylen (PP) und Polyethyleneterephthalat (PET).

Für die Kosten-Effektivitäts-Analyse wurde der Kunststoff PET als Basiskunststoff ausgesucht, mit dem alle anderen Kunststoffe verglichen werden, sowohl Bio-, als auch alle herkömmlichen Kunststoffe. PET gehört zu den wichtigsten Kunststoffen weltweit welcher in vielen Anwendungsgebieten eingesetzt wird, besonders aber in der Verpackungsindustrie. Alle für diese Analyse ausgewählten Kunststoffe eignen sich als Substitut von PET, was auch einen wichtigen Grund für diese Auswahl darstellt.

Alle Kosten- und Wirksamkeitsparameter beziehen sich auf die Herstellung von einem Kilogramm des jeweiligen Kunststoffpolymers.

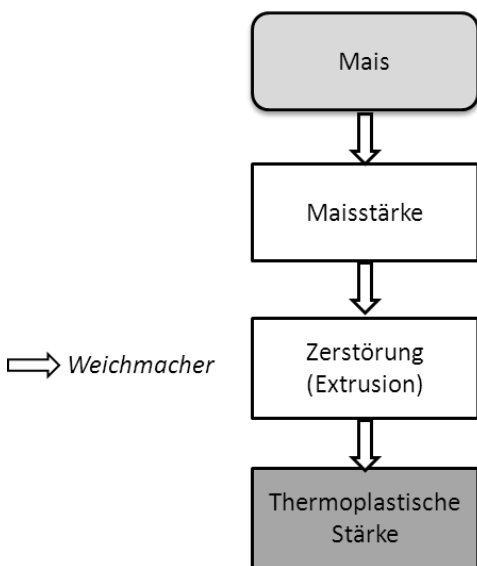
5.2.4. Kostenanalyse

Bei der Kostenanalyse werden die Kosten für die Materialbeschaffung, den Transport und die Herstellung der Kunststoffe berücksichtigt. Der Herstellungsprozess und die Kosten der einzelnen Kunststoffe werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

Thermoplastische Stärke (TPS)

Das Herstellungsverfahren von thermoplastischer Stärke (Abbildung 12) beginnt mit der Bearbeitung von nativer Stärke. Native Stärke wird, mit Hilfe des Nassmahlverfahrens, aus stärkehaltigen Pflanzen gewonnen. Dabei wird der Kern der Pflanze, in diesem Fall das Maiskorn, zuerst in einer sauren Lösung aufgeweicht und anschließend grob gemahlen. Aus dem gespaltenen Kern wird das mit Keimen verunreinigte Öl entfernt. Durch feineres Mahlen wird die Faser vom Endosperm getrennt und anschließend zentrifugiert um auch das weniger dichte Protein von der dichteren Stärke zu trennen. Der gewonnene Stärkeschaum wird noch gewaschen, entwässert und getrocknet bevor er weiterverarbeitet werden kann (Shen, Haufe und Patel 2009, S. 28).

Abbildung 12: Herstellungsverfahren von Thermoplastischer Stärke



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an IfBB 2013c

Um thermoplastische Stärke zu erhalten, muss die native Stärke als nächstes in einem Extruder weiterverarbeitet werden. Unter vorgegebenen Bedingungen wie Temperatur, Druck, Scherung, Wassermenge und Zeit werden die native Kristallinität und die körnige Struktur von Amylase und Amylopektin fast völlig zerstört. Eine Erhöhung der Temperatur während des Prozesses führt schließlich zur Schmelzung der kristallinen Struktur der Stärkekörner. Als Folge darauf schwellen die Körner und nehmen die dazugegebenen Weichmacher auf. Durch die Scherung öffnen sie sich und zerfallen in winzige Teile, welche sich dann neu vermischen und somit thermoplastische Stärke bilden (Shen, Haufe und Patel 2009, S.29).

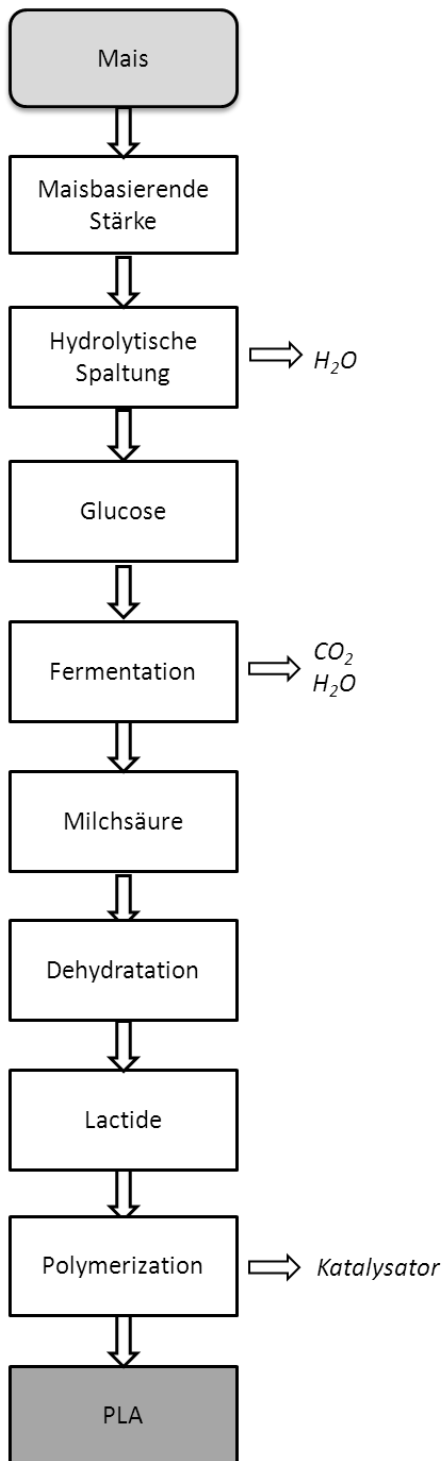
Polymilchsäure (PLA)

Bei der Herstellung von PLA (Abbildung 13) muss zuerst Stärke in Zucker umgewandelt werden. Dies geschieht durch die enzymatische oder saure Hydrolyse. Die gewonnene Zuckerlösung wird anschließend von Mikroorganismen fermentiert. Geschieht dies unter bestimmten Bedingungen der Sauerstoffzufuhr über die Enzym Lactatdehydrogenase, kann man aus Glukose Milchsäure gewinnen. Oftmals muss in diesem Schritt Kalk in die Mischung zugegeben werden, da viele Mikroorganismen niedrigen pH-Bedingungen nicht standhalten können und die Gärung auf diese Weise neutralisiert werden kann. Die erhaltene Säure wird anschlie-

ßend in der Kombination von Veresterung, Destillation, Hydrolyse des Esters und Rückgewinnung des Alkohols durch Verdampfen gereinigt (Shen, Haufe und Patel 2009, S.58f.).

Als nächstes muss die Milchsäure zu einem hochmolekularen Polymer umgewandelt werden. Dies geschieht mittels der Ringöffnungspolymerisation. Durch Kondensation der wässrigen Milchsäure entsteht das niedermolekulare Prepolymer. Dieses Prepolymer wird dann depolymerisiert, indem die Temperatur der Polykondensation erhöht und der Druck gesenkt wird, wobei als Resultat ein Gemisch von Lactid und Stereoisomeren entsteht. Mit Hilfe von Katalysatoren wird die intermolekulare Zyklisierung beschleunigt. Nach der Reinigung in einer Vakuumdestillation wird hochmolekulares PLA Polymer durch katalysierte Ringöffnungspolymerisation in der Schmelze hergestellt. Durch das Steuern der Ringöffnungspolymerisation ist es möglich, die Zwischenprodukte und somit auch die Eigenschaften des resultierenden PLA zu kontrollieren (Shen, Haufe und Patel 2009, S.59f.).

Abbildung 13: Herstellungsverfahren von Polymilchsäure (PLA)

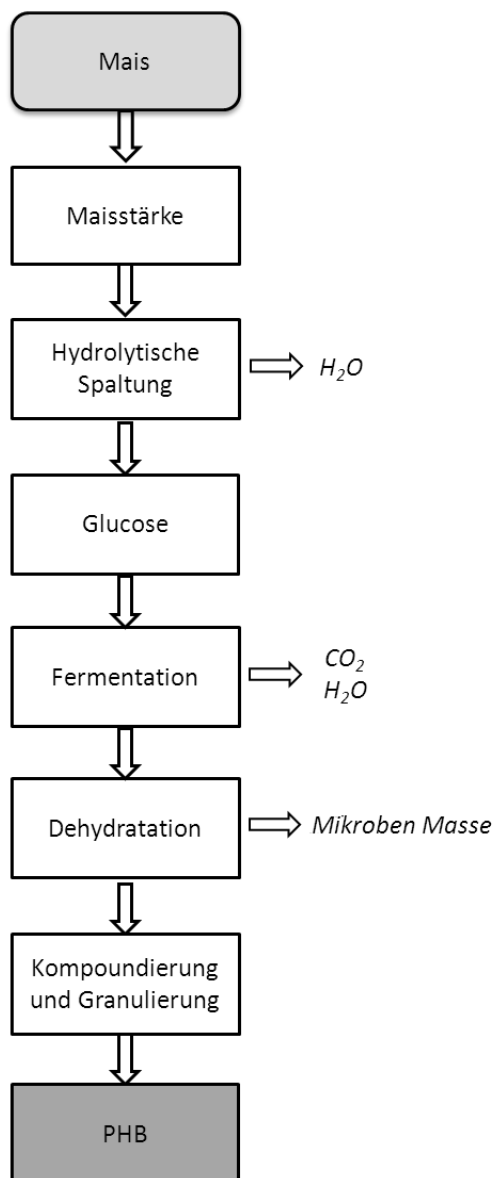


Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an IfBB 2013b.

Polyhydroxyfettsäure (PHB)

Polyhydroxyfettsäuren werden mit Hilfe von Mikroorganismen aus Stärke oder Zucker hergestellt. Das Herstellungsverfahren (Abbildung 14) besteht aus folgenden Schritten: Fermentation, Isolierung, Reinigung, sowie Compoundierung und Granulierung (Shen, Haufe und Patel 2009, S.100).

Abbildung 14: Herstellungsverfahren von Polyhydroxyfettsäure (PHB)



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an IfBB 2013a.

Die Fermentation findet in einem großen Gärbehälter statt, unter Anwesenheit von einem mit Bakterien angereicherten mineralischen Medium. Eine Kohlenstoffquelle wird langsam und in unterschiedlicher Menge zugeführt, bis das Zellwachstum und die PHB-Akkumulation abgeschlossen sind. Dabei können den Bakterien verschiedene Kohlenstoffquellen zugeführt werden, da in Abhängigkeit von diesen unterschiedliche Polymere gewonnen werden (Shen, Haufe und Patel 2009, S.100).

Derzeit gibt es zwei Methoden der Extraktion von PHA, die Lösungsmittlextraktion und die „Enzym-Cocktail“ Extraktion. Bei der ersten Methode werden die Zellen konzentriert, getrocknet und mit heißem Methanol extrahiert. Danach wird das PHA in warmem Chloroform gelöst und die restlichen Zelltrümmer beziehungsweise Reste werden aus der Lösung entfernt. Das PHB wird anschließend wieder mit Methanol gewaschen und unter einem Vakuum getrocknet, um die Qualität des Polymers zu verbessern. Mit dieser Methode kann hoch reines PHB hergestellt werden, allerdings verursacht die Verwendung von großen Mengen an organischen Lösungsmitteln ökologische und gesundheitliche Bedenken (Shen, Haufe und Patel 2009, S.100f.).

Um die Verwendung organischer Lösungsmittel zu vermeiden, wurde das Enzym-Cocktail Extraktionsverfahren entwickelt. Ein Cocktail von Enzymen, einschließlich Proteasen, Nukleasen und Lysozymen wird verwendet, um die Bakterienzellen zu behandeln. Somit können Proteine, Nukleinsäuren und Zellwände entfernt werden, ohne das PHB zu beschädigen. Aktuell wird diese Methode nicht in dieser Form angewendet, meistens wird das Enzym-Cocktail-Verfahren mit der Lösungsmittel-Methode kombiniert (Shen, Haufe und Patel 2009, S.101).

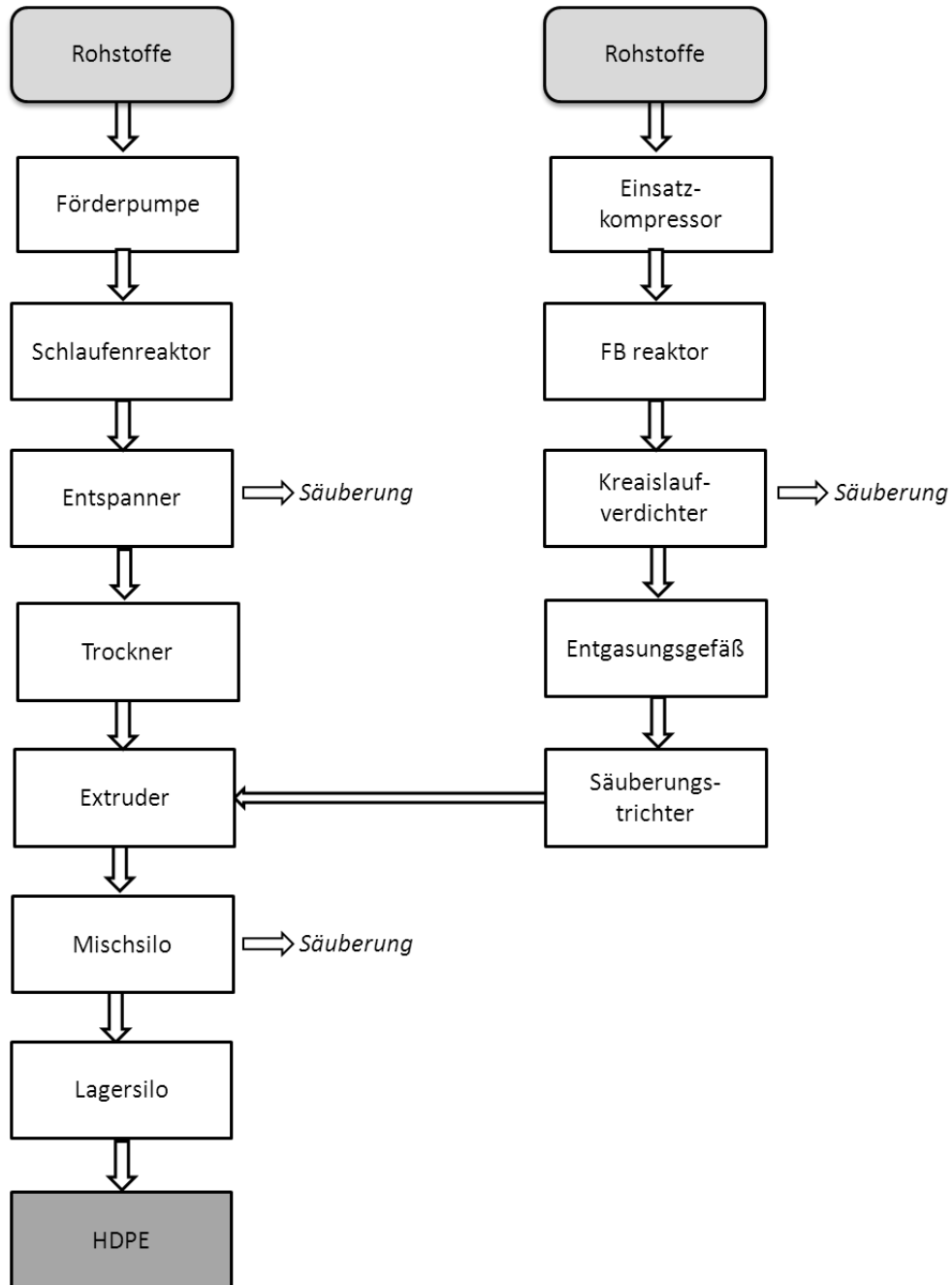
Polyethylen hoher Dichte (HDPE)

HDPE gehört zur Gruppe der Polyolefine, welche aus Olefin Monomeren hergestellt werden, da diese eine reaktive Doppelbindung enthalten. HDPE ist ein Polyethylen mit einer Dichte von mehr als 940 Kilogramm pro Meter (kg/m) und wird in einem Niederdruck-Reaktor produziert. Es bestehen hauptsächlich zwei Techniken für die Herstellung von HDPE, welche bildlich in Abbildung 15 dargestellt sind (Europe Plastics 2008b):

Abbildung 15: Herstellungsverfahren von HDPE

Suspensionspolymerisation

Gasphasenpolymerisation



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Europe Plastics 2008b.

Suspensionspolymerisation: das Polymer wird unter relativ niedrigen Temperaturen (70-110 Grad Celsius (°C)) und einem Niederdruck (1 - 5 Megapascal (MPa)) in einem gesättigten

Kohlenwasserstoff-Medium erzeugt. Das Polymer bildet dabei eine Suspension oder ein bewegliches Brei. Im nächsten Schritt wird das Reaktionsmedium entfernt und das Verdünnungsmittel vom Polymer getrennt. Das erhaltene Pulver wird mit Stabilisatoren gemischt und allgemein zu Pellets extrudiert (Europe Plastics 2008b).

Gasphasenpolymerisation: Ein Gasphasenreaktor ist ein Fließbett aus trockenen Polymerpartikeln, welche entweder durch das Rühren oder durch Durchleiten von Gas (Ethylen) bei hohen Geschwindigkeiten erhalten wird. Der Druck ist in der Regel relativ niedrig bei ungefähr 2 MPa und die Temperaturen bewegen sich im Bereich zwischen 70-110°C. Das erhaltene Pulver wird mit Stabilisatoren gemischt und zu Pellets extrudiert (Europe Plastics 2008b).

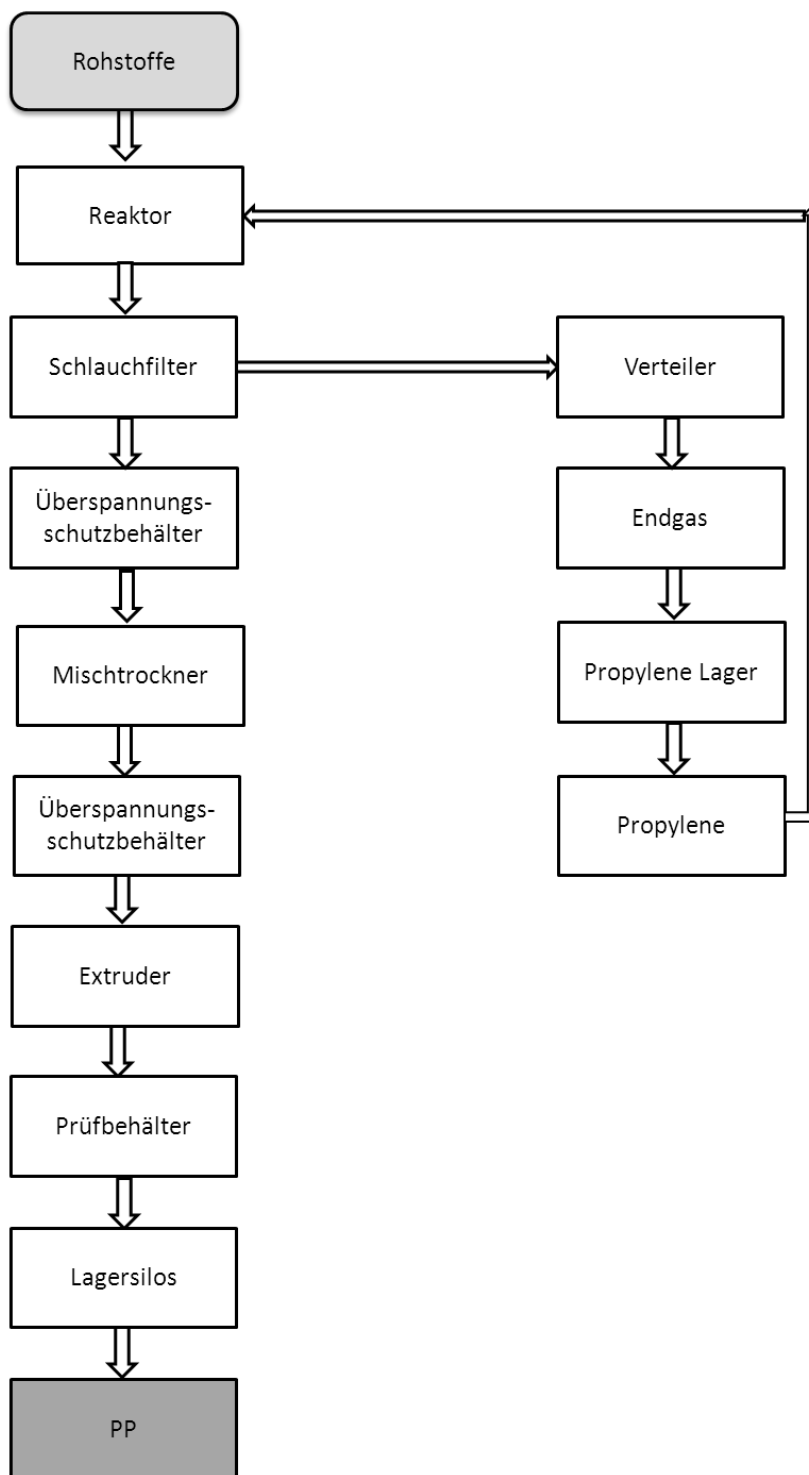
Polypropylen

PP ist ein Polyolefin mit einer Dichte von 900 kg/m, und wird mit Hilfe von verschiedenen Niederdruckverfahren produziert. Dabei werden Co-Monomere wie Ethylen und Buten verwendet um die Zähigkeit, Schlagfestigkeit und Transparenz des Materials zu verbessern. Auch hier gibt es zwei wichtige Techniken für die Herstellung von PP (Europe Plastics 2008c):

Flüssigkeitsmassenpolymerisation: das Polymer wird bei dieser Methode in einem flüssigen Propylen-Medium erzeugt. Zuerst bildet das Polymer darin eine Suspension, von der das Reaktionsmedium anschließend entfernt und das Polymer vom Propylen getrennt wird. Als nächstes wird das erhaltene Pulver mit Stabilisatoren versetzt und in der Regel zu Pellets extrudiert (Europe Plastics 2008c).

Gasphasenpolymerisation: Die Gasphasenpolymerisation (Abbildung 16) läuft ähnlich wie bei der Produktion von HDPE ab. Die Polymerpartikel werden bei niedrigem Druck von etwa 2 MPa und Temperaturen zwischen 60-80°C erzeugt. Dabei werden unterschiedliche Konfigurationen verwendet bis eine akzeptable Partikelgröße und Form des Polymers entstehen (Europe Plastics 2008c).

Abbildung 16: Herstellungsverfahren von Polypropylen

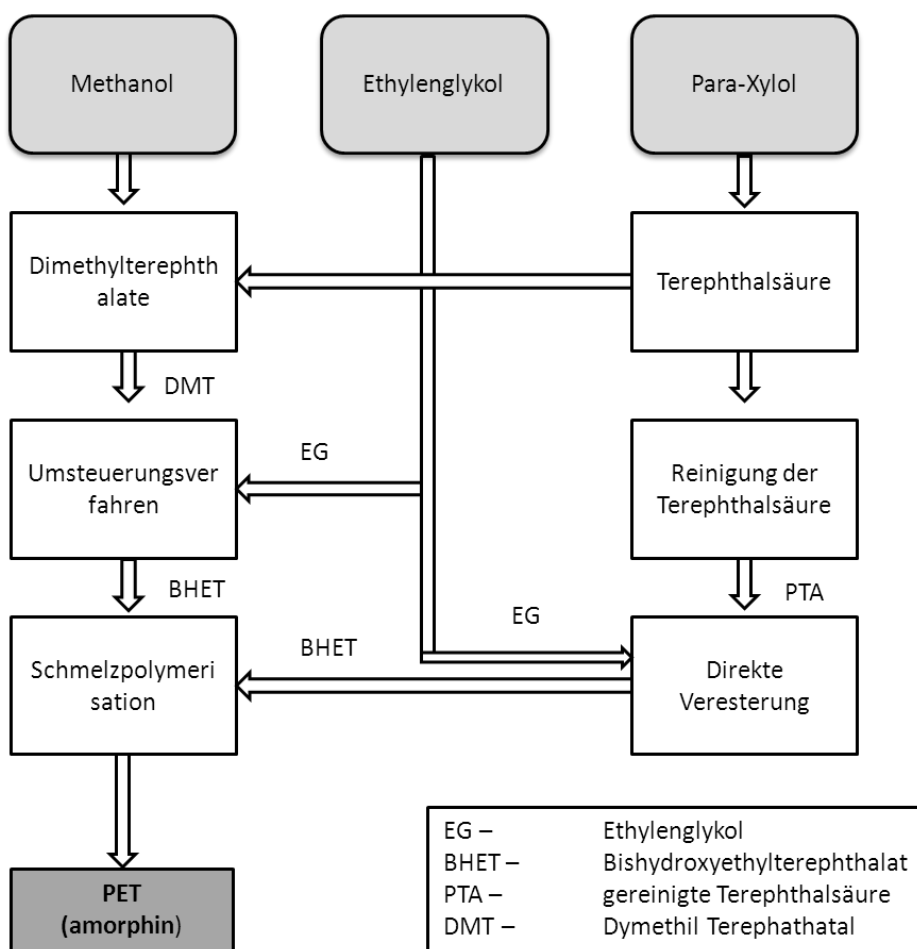


Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Europe Plastics 2008c.

Polyethylenterephthalat

PET ist ein thermoplastisches Polymer, welches durch die Umsetzung einer Verbindung von zwei Säure-Gruppen mit zwei Alkoholgruppen hergestellt wird. Die verwendete Säure ist Terephthalsäure, welche aus para-Xylol hergestellt wird und der Alkohol Ethylenglykol der auf Ethylen basiert. In der Praxis gibt es zwei Methoden für die Herstellung von PET (Europe Plastics 2008a):

Abbildung 17: Herstellungsverfahren von Polyethylenterephthalat (PET)



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Europe Plastics 2008a.

Bei der ersten Methode, welche auf der rechten Seite der Abbildung 17 gezeigt ist, wird zuerst para-Xylol benutzt um Terephthalsäure zu erzeugen, welche anschließend gereinigt werden muss. Die gereinigte Terephthalsäure (PTA) wird daraufhin mit Ethylenglykol in Ver-

bindung gebracht um das Zwischenprodukt Bishydroxyethylterephthalat (BHET) zu bekommen, als Nebenprodukt fällt Wasser an (Europe Plastics 2008a).

Auf der linken Seite der Abbildung 16 sieht man den alternativen Weg bei dem zuerst para-Xylol zu Terephthalsäure oxidiert, dann aber sofort mit Methanol vermischt wird um Dimethylterephthalat (DMT) zu produzieren. Wenn DMT mit Ethylenglykol in Verbindung gebracht wird, ist das Ergebnis wieder das Zwischenprodukt BHET, wie in dem oben beschriebenen Weg, aber mit Methanol als Nebenprodukt statt Wasser. Das Methanol kann regeneriert und wiederverwendet werden (Europe Plastics 2008a).

Das BHET, welches auf beide Arten gewonnen wird, wird in der flüssigen Form polymerisiert um daraus amorphen PET herzustellen. Die erste Methode um PET herzustellen wird hauptsächlich angewendet um amorphes PET herzustellen, während die zweite Art dazu dient um PET in Form von Fasern zu erzeugen (Europe Plastics 2008a).

Kosten

Da die Biokunststoffindustrie im Vergleich zu der herkömmlichen Kunststoffindustrie noch sehr klein ist, und die Herstellungskosten ein sensibler Bereich sind, gab es von den eigentlichen Herstellern der Biokunststoffe keine öffentlich zugänglichen Daten zu diesem Bereich. Für die Kosten-Effektivitäts-Analyse wurden deshalb die geschätzten Daten zu den Kosten der Kunststoffe von der Iowa State University (ISU) übernommen. Diese Daten wurden für die Software „Polymers Environmental Comparator“⁴ generiert in Zusammenarbeit mit dem United States Department of Agriculture (USDA) Biopreferred Program, Nypro Corp., M-Base und Center for Crops Utilization Research (CCUR/ISU). In der folgenden Tabelle 3 sind die Kosten für die Herstellung von jeweils einem Kilogramm Polymer zusammengefasst:

⁴ „Polymers Environmental Comparator“ ist eine Software zur Berechnung der Kosten, des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen von petrochemischen und Biokunststoffen: <http://pec.materialdatacenter.com/>

Tabelle 3: Übersicht der Kunststoffpreise

Kunststoff	PLA	TPS	PHB	HDPE	PP	PET
Kosten (€/kg)	2,01	3,05	3,74	1,22	2,38	2,40

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Polymers Environmental Comparator o.J.

Wie in Tabelle 3 gezeigt, haben die Biokunststoffe TPS und PHB deutlich höhere Herstellungskosten als die berücksichtigten fossilen Kunststoffe. Einzig die Kosten von PLA ähneln den herkömmlichen Kunststoffen. Die niedrigeren Kosten von PLA werden durch den effizienten Fermentationsprozess bei der Herstellung von PLA erreicht, welcher auch weiterhin entwickelt und verbessert wird (Shen, Haufe und Patel 2009, S.74). Unter den herkömmlichen Kunststoffen ist HDPE mit 1,22 €/kg der günstigste.

5.2.5. Wirksamkeitsanalyse

Für die folgende Analyse wurden mehrere Wirksamkeitsparameter herangezogen, die im Einklang mit der Zielanalyse stehen. Die ausgewählten Parameter basieren auf unterschiedlichen Ökobilanzen (Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008) und den Ergebnissen, die in diesen erzielt wurden. Nicht nur bei der Kostenanalyse ist der Bestand von relevanten Daten schwer zugänglich, sondern auch bei der Wirksamkeitsanalyse. Auch in diesem Bereich gibt es eine geringe Auswahl an Daten, die für die Kosten-Effektivitäts-Analyse erfordert werden. Für die herkömmlichen Kunststoffe wurde auf die Daten des angesehenen internationalen Plastikverbandes „Plastics Europe“ zugegriffen. Weitere Werte entstammen aus Zeitschriften wie „Journal of Biotechnology“ und „Journal of Life Cycle Assessment“, sowie Forschungsarbeiten der niederländischen Universitäten von Utrecht und Amsterdam. Diese Ökobilanzen zeigen die verschiedenen Auswirkungen, welche Biokunststoffe im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffen auf die Umwelt und den Menschen, im Laufe ihres Lebenszyklus, haben. Je kleiner die Auswirkung auf die Umwelt ist, desto besser ist ein Kunststoff. Aus diesem Grund sind die Begriffe „Effektivität“ und „Wirksamkeit“ für diese Analyse nicht immer passend, weshalb auch die Begriffe Auswirkung

und Auswirkungsparameter im folgenden Abschnitt dieser Arbeit vermehrt verwendet werden. Folgende Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der gewählten Auswirkungsmaße. Die untere und die obere Grenze des Wertes besteht aus den niedrigsten und höchsten erzielten Ergebnissen der Ökobilanzen. Darunter folgt eine kurze Beschreibung der einzelnen Parameter:

Tabelle 4: Zusammenfassung der Auswirkungsparameter für die KEA

Untergruppe	Wert (untere und obere Grenze)	Quelle
Energiebedarf		
PET	87,80 (80,40; 95,0)	Plastics Europe 2008; Shen et al. 2009
HDPE	74,85 (73,70; 76,00)	Harding et.al. 2007; Plastics Europe 2008
PP	79,45 (73,00; 85,90)	Plastics Europe 2008; Harding et.al. 2007
PLA	30,54	Groot und Boren 2010
TPS	25,40	Patel et.al. o.J.
PHB	44,70	Harding et.al. 2007
Erderwärmung		
PET	3,715 (3,370; 4,060)	Plastics Europe 2008; Shen et al. 2009
HDPE	2,235 (1,960; 2,510)	Plastics Europe 2008; Harding et.al. 2007
PP	2,700 (2,000; 3,400)	Plastics Europe 2008; Harding et.al. 2007
PLA	0,502	Groot und Boren 2010
TPS	1,140	Patel et.al. o.J.
PHB	2,600	Harding et.al. 2007
Versäuerung		
PET	0,018185 (0,015370; 0,021000)	Plastics Europe 2008; Shen et al. 2009
HDPE	0,014445 (0,006390; 0,022500)	Plastics Europe 2008; Harding et.al. 2007
PP	0,027465 (0,006130; 0,048800)	Plastics Europe 2008; Harding et.al. 2007
PLA	0,021000	Groot und Boren 2010
TPS	0,010600	Patel et.al. o.J.
PHB	0,024900	Harding et.al. 2007
Eutrophierung		
PET	0,00112000 (0,00104000; 0,00120000)	Plastics Europe 2008; Shen et al. 2009
HDPE	0,00062055 (0,00043000; 0,00081110)	Plastics Europe 2008; Harding et.al. 2007
PP	0,00329000 (0,00074000; 0,00584000)	Plastics Europe 2008; Harding et.al. 2007
PLA	0,00500000	Groot und Boren 2010
TPS	0,00470000	Patel et.al. o.J.
PHB	0,00519000	Harding et.al. 2007

Tabelle 4: Zusammenfassung der Auswirkungsparameter für die KEA (Fortsetzung)

Photochemische Ozonbildung		
PET	0,001685 (0,001000; 0,002370)	Shen et al. 2009; Plastics Europe 2008;
HDPE	0,001230	Plastics Europe 2008
PP	0,001310 (0,000920; 0,001700)	Plastics Europe 2008; Harding et.al. 2007
PLA	0,003400	Groot und Boren 2010
TPS	0,005000	Patel et.al. o.J.
PHB	0,000780	Harding et.al. 2007
Abiotischer Abbau		
PET	0,0450	Shen et al. 2009;
HDPE	0,0353	Harding et.al. 2007
PP	0,0414	Harding et.al. 2007
PLA	0,6650	Groot und Boren 2010
TPS	-	-
PHB	0,0218	Harding et.al. 2007
Humantoxizität		
PET	4,3900	Shen et al. 2009;
HDPE	2,5900	Harding et.al. 2007
PP	1,8700	Harding et.al. 2007
PLA	0,0085	Groot und Boren 2010
TPS	0,2000	Patel et.al. o.J.
PHB	0,8570	Harding et.al. 2007

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Energiebedarf – Verbrauch erneuerbarer und nichterneuerbarer Energierohstoffe für die Herstellung von Kunststoffen.

Erderwärmung – die Erhöhung der Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche verursacht durch die atmosphärischen Treibhausgase. Zusätzlich aber kommt es durch menschliche Aktivitäten zu einer weiteren Erhöhung dieser Temperaturen, was schwere Folgen auf das gesamte Ökosystem und den Menschen hat (Europe Plastics 2008c).

Versäuerung – Emissionen von Treibhausgasen, die durch Verkehr, Verbrennung, Energieerzeugung und Landwirtschaft entstehen, verursachen den sogenannten „sauren Regen“ welcher schädlich für die Umwelt, Seen, Wälder und Gebäude ist (Europe Plastics 2008c).

Eutrophierung – der Anstieg des Wachstums von Wasserpflanzen und Algen verursacht durch Emissionen von Ammoniak, Nitrat und Phosphat aus Verkehr, Düngemittel, Energieerzeugung und Abwasser. Diese verbrauchen große Mengen an Sauerstoff im Wasser und verringern somit den bestehenden Sauerstoffgehalt für andere Lebewesen (Europe Plastics 2008c).

Photochemische Ozonbildung – Durch die Einwirkung von Sonnenlicht auf bestimmte Schadstoffe kommt es zur Bildung von reaktiven chemischen Verbindungen, wie zum Beispiel der Ozonbildung. Diese chemischen Verbindungen können einen negativen Einfluss auf die menschliche Gesundheit, Kulturpflanzen, sowie das gesamte Ökosystem haben (Labouze, et al. 2004, S.188).

Abiotischer Abbau – der Abbau abiotischer Ressourcen hat große Auswirkungen auf das moderne Leben der Menschen und der zukünftigen Generationen (Steen 2006, S.49).

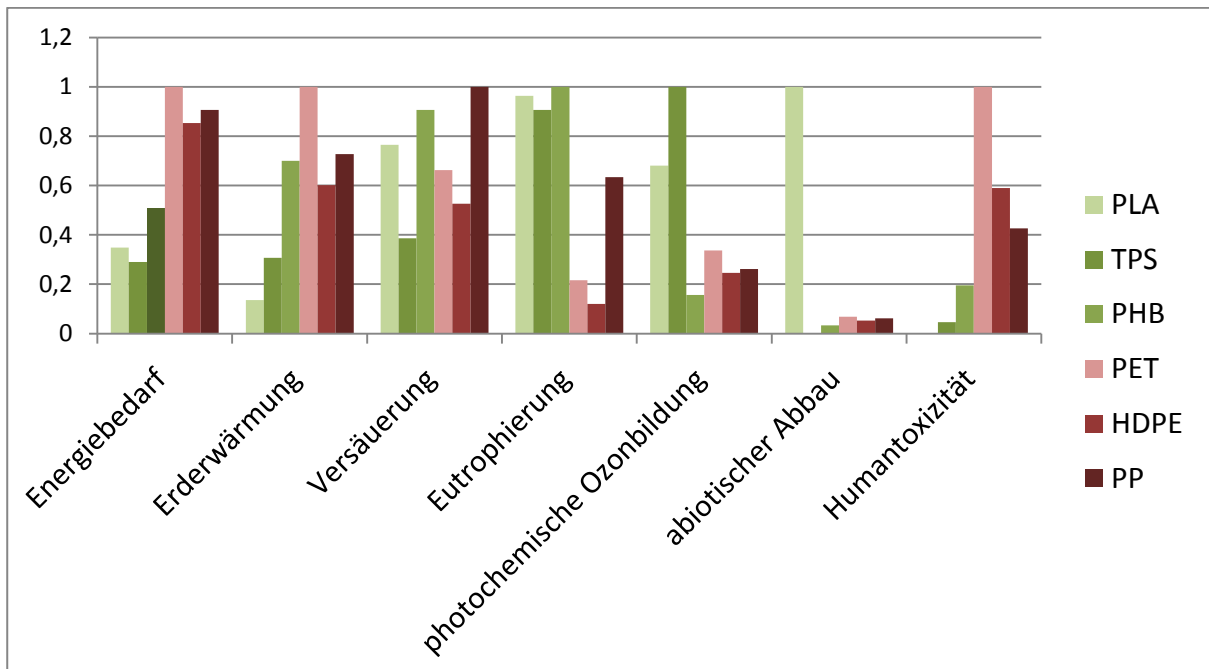
Humantoxizität – bezieht sich auf die schädlichen Stoffe, welche bei der Herstellung von Kunststoffen eingesetzt werden, beziehungsweise welche bei der Verwendung und Entsorgung dieser Kunststoffe freigesetzt werden und somit eine Gefahr für die Gesundheit der Menschen die damit in Berührung kommen darstellen.

In der folgenden Abbildung 18 ist der Vergleich der Auswirkungsparameter mit Hilfe von normalisierten Werten dargestellt. Anhand der zur Verfügung stehenden Daten ist ersichtlich, dass die Herstellung von Biokunststoffen deutlich weniger an nichterneuerbaren Rohstoffen verbraucht im Vergleich zu den fossilen Kunststoffen. Auch in den Kategorien der Erderwärmung und Humantoxizität haben Biokunststoffe einen deutlichen Vorteil zu herkömmlichen Kunststoffen. Anders sieht es bei der Eutrophierung aus, denn hier haben fossile Kunststoffe eindeutig bessere Werte als Biokunststoffe, was mit der erhöhten Verwendung von Düngemittel beim Anbau der für die Herstellung von Biokunststoffen benötigten Rohstoffe in Zusammenhang steht.

In den restlichen Kategorien, wie bei der Versäuerung, der photochemischen Ozonbildung und dem abiotischen Abbau, schwanken die Daten abhängig von den einzelnen Kunststoffen. Hier kann keine deutliche Annahme getroffen werden, ob herkömmliche oder Biokunst-

stoffe in diesen Kategorien einen Vorteil besitzen, sondern die einzelnen Kunststoffe müssen separat betrachtet werden.

Abbildung 18: Vergleich der Auswirkungsparameter der berücksichtigten Kunststoffe anhand normalisierter Werte



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Kunststoffe, welche in grünen Nuancen dargestellt sind, gehören zu der Gruppe der Biokunststoffe, während die rötlich markierten Kunststoffe sich auf die herkömmlichen Plastikarten beziehen.

5.2.6. Zeitliche Homogenisierung

Laut Hanusch (2010, S.101f.) müssen in einer Kosten-Effektivitäts-Analyse, soweit möglich, alle Kosten und Nutzen auf einen gemeinsamen Zeitpunkt diskontiert werden. Auf diese Weise findet eine zeitliche Homogenisierung statt, welche es erlaubt diese Kosten und Nutzen miteinander zu vergleichen. Bei der Diskontierung wird der sogenannte Gegenwartswert, der Wert zu Beginn eines Projektes, aller Kosten und Nutzen berechnet. Desto weiter die Kosten und Nutzen von der Gegenwart entfernt liegen, desto geringer fällt dieser Wert

aus. Auch abhängig von der Diskontierungsrate kann der Gegenwartswert schwanken und somit Einfluss auf das Ergebnis der Analyse haben.

Im vorliegenden Fall kann aufgrund der verwendeten Daten keine Diskontierung vorgenommen werden. Anhand der schwierigen Zugänglichkeit der Daten, besonders der Herstellungskosten von Biokunststoffen, ist es nicht möglich die genauen Bestandteile dieser festzustellen, sowie den Zeitpunkt an dem sie anfallen zu bestimmen. Deswegen stellt diese Analyse eine statische Untersuchung dar, mit dem Ziel, die aktuelle Situation auf dem Kunststoffmarkt zu bewerten. Da die fehlende Diskontierung die Ergebnisse dieser Untersuchung deutlich beeinflusst, wird diese Tatsache aus diesem Blickfeld berücksichtigt.

5.2.7. Berücksichtigung von Ungewissheiten

Generell sind alle Annahmen zu den Kosten und Auswirkungen in dieser Analyse mit Risiko und Unsicherheit verbunden. Alle angenommenen Kosten basieren auf geschätzten Werten, da konkrete Daten bezüglich der Herstellung der Kunststoffe nicht öffentlich zugänglich sind. Wie im vorigen Kapitel 5.2.6. erwähnt, sind diese Daten statisch und enthalten keine näheren Informationen zur Zusammensetzung der Kosten oder zum Zeitpunkt, an dem sie anfallen, somit konnte keine Diskontierung durchgeführt werden.

Die Auswirkungsparameter zu den Kunststoffen entstammen aus unterschiedlichen Ökobilanzen und schwanken somit in Abhängigkeit von den subjektiven Einschätzungen der einzelnen Autoren. Des Weiteren konnten in der Kategorie „abiotischer Abbau“ keine Daten für den Kunststoff „thermoplastische Stärke“ ermittelt werden. Diese Kategorie wurde trotzdem weiter berücksichtigt, da sie ein wichtiges Indiz für die Umwelteinflüsse der verglichenen Kunststoffe ist. Die fehlenden Daten zu dem Kunststoff TPS wurden in diesem Fall ignoriert und nur für die restlichen fünf Kunststoffe analysiert.

5.2.8. Ergebnisse der Analyse

Nachdem alle Schritte der Kosten-Effektivitäts-Analyse erklärt und beschrieben wurden, folgt nun die Präsentation der Ergebnisse. Diese Ergebnisse werden zuerst in einer Kosten-

Wirksamkeits-Matrix dargelegt, danach folgt die detaillierte Auswertung mit Hilfe von inkrementellen Kosten-Wirksamkeits-Verhältnissen.

Kosten-Wirksamkeits-Matrix

Eine Kosten-Wirksamkeits-Matrix enthält alle Daten die in der Analyse berücksichtigt werden müssen und kommt dann zum Einsatz, wenn gleichzeitig mehrere Wirksamkeitsmaße untersucht werden müssen (Hanusch 2010, S.170). Mit Hilfe von Tabelle 5 werden alle Kosten und Wirkungen der einbezogenen Kunststoffe miteinander in Verbindung gesetzt und verglichen. Um mit Hilfe der Matrix die beste Alternative zu bestimmen, muss ein Kunststoff in allen Punkten die vorteilhaftesten Werte haben. Er muss die niedrigsten Kosten, sowie die geringsten Werte aller Auswirkungsparameter besitzen.

Wegen der großen Anzahl an Auswirkungsparametern gibt es auf den ersten Blick keinen Kunststoff, welcher in allen Punkten die besten Werte aufweist. Während HDPE der günstigste unter den einbezogenen Kunststoffen ist, hat er deutlich schlechtere Werte in den Kategorien „Energiebedarf“, „Erderwärmung“ und „Humantoxizität“ im Vergleich zu anderen Kunststoffen. Andererseits besitzt PHB, als teuerster Kunststoff, die besten Werte in den Kategorien „photochemische Ozonbildung“ und „abiotischer Abbau“.

Tabelle 5: Kosten-Wirksamkeits-Matrix

			Auswirkungen						
	Kunststoff	Kosten (€/kg)	Energiebedarf (MJ/kg)	Erderwärmung (kg CO ₂ eq/kg)	Versäuerung (kg SO ₂ eq/kg)	Eutrophierung (kg PO ₄ eq/kg)	photochemische Ozonbildung (kg C ₂ H ₄ eq/kg)	abiotischer Abbau (kg Sb eq/kg)	Humantoxizität (kg 1,4-DB eq/kg)
bio	PLA	2,01	30,54	0,502	0,021000	0,00500000	0,003400	0,6650	0,0085
bio	TPS	3,05	25,40	1,140	0,010600	0,00470000	0,005000	-	0,2000
bio	PHB	3,74	44,70	2,600	0,024900	0,00519000	0,000780	0,0218	0,8570
fossil	PET	2,40	87,70	3,715	0,018185	0,00112000	0,001685	0,0450	4,3900
fossil	HDPE	1,22	74,85	2,235	0,014445	0,00062055	0,001230	0,0353	2,5900
fossil	PP	2,38	79,45	2,700	0,027465	0,00329000	0,001310	0,0414	1,8700

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Das inkrementelle Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis (ICER)

Da sich anhand der Kosten-Wirksamkeits-Matrix keine eindeutig dominanten Kunststoffe durchsetzen konnten, werden nun die einzelnen Auswirkungsmaße getrennt voneinander betrachtet. Auf diese Weise, können mit Hilfe des inkrementellen Kosten-Wirksamkeits-Ratios, die einzelnen Kunststoffe besser beurteilt werden.

Das inkrementelle Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis wird folgendermaßen berechnet (Schöffski und Graf von der Schulenburg 2012):

$$ICER = \frac{C_{neu} - C_{standard}}{A_{neu} - A_{standard}} = \frac{\Delta C}{\Delta A}$$

C_{neu} – Kosten der Alternativen

$C_{standard}$ – Kosten des Basiskunststoffes PET

A_{neu} – Auswirkungen der Alternativen

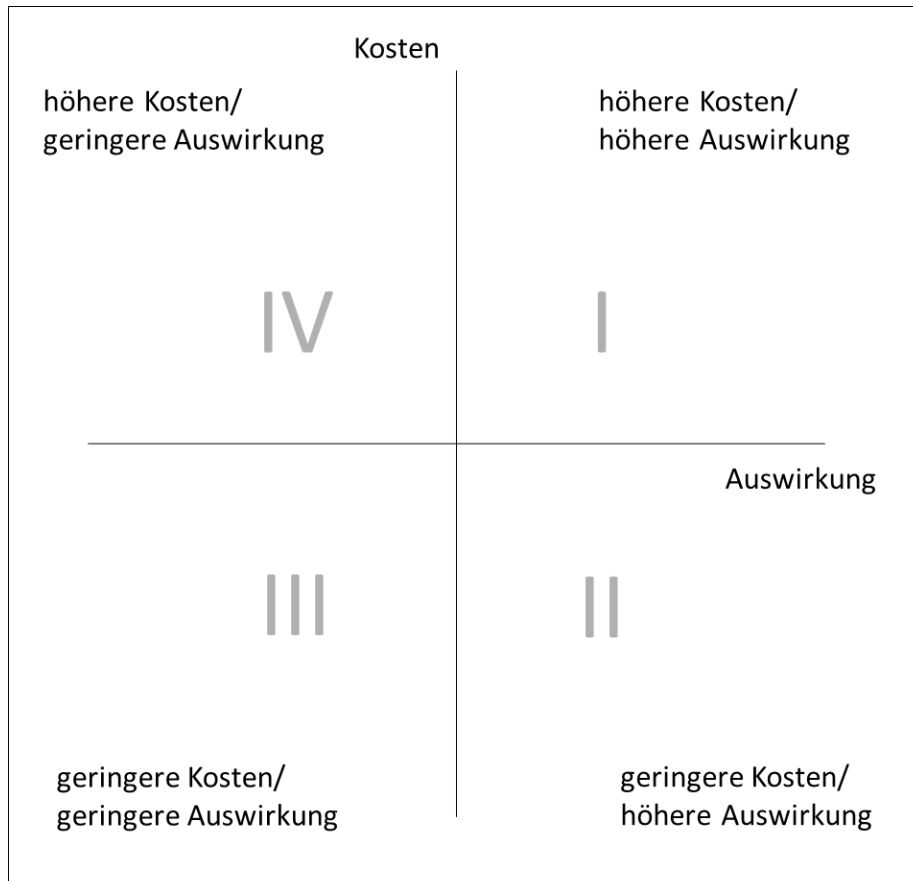
$A_{standard}$ – Auswirkung des Basiskunststoffes PET

Allgemein sind immer die Alternativen besser, welche geringere Kosten und eine geringere Auswirkung als der Basiskunststoff PET aufweisen. Für die einzelnen Kategorien werden nun die Verhältnisse vorgestellt und die Ergebnisse mit Hilfe einer Kosten-Wirksamkeits-Ebene präsentiert wie in Abbildung 19 gezeigt.

Eine Kosten-Wirksamkeits-Ebene zeigt wie sich bestimmte Entscheidungen auf die Kosten und die Wirksamkeiten eines oder mehrerer Projekte auswirken. Die Ebene besteht aus vier Quadranten, wobei jeder eine andere Situation darstellt. Die jeweilige Situation wird ins Verhältnis zu den zusätzlichen Kosten und zusätzlichen Auswirkungen der Ergebnisse eines Projektes, im Vergleich zum Standardprojekt gestellt. Befindet sich eine Alternative im dritten Quadranten sind die Kosten und Auswirkungen dieser Alternative vorteilhafter als die der Standardalternative, somit sollte die Entscheidung zu Gunsten des neuen Projektes fallen. Andererseits zeigt der erste Quadrant der Ebene eine Überlegenheit des Standardprojektes im Vergleich zum neuen Projekt. Befinden sich die Alternativen im zweiten oder vierten Quadranten der Ebene, dann ist die Entscheidung nicht mehr klar, sondern ein Urteil

muss gefällt werden, ob höhere Kosten beziehungsweise höhere Auswirkungen gerechtfertigt sind (Briggs und Fenn 1998, S.724f.).

Abbildung 19: Kosten-Wirksamkeits-Ebene



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Briggs und Fenn 1998, S.724

Energiebedarf

In Tabelle 6 ist das ICER der Kategorie Energiebedarf dargestellt. Anhand der Ergebnisse haben alle Alternativen geringere Auswirkungen in Bezug auf den Energiebedarf bei der Herstellung, als der Basiskunststoff PET. Niedrigere Kosten haben der Biokunststoff PLA und beide fossile Kunststoffe HDPE und PP, während die Biokunststoffe TPS und PHB höhere Herstellungskosten aufweisen.

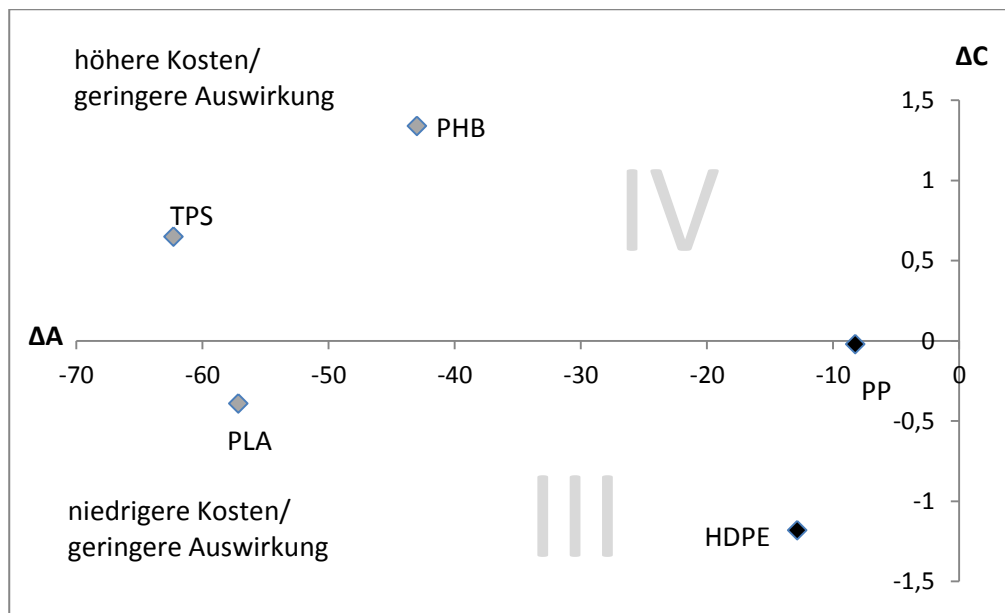
Tabelle 6: ICER der Kategorie Energiebedarf

	Kunststoff	Kosten (€/kg)	Energiebedarf (MJ/kg)	Δ Kos- ten	Δ Energiebe- darf	ICER ($\Delta K/\Delta A$)
Standard	PET	2,40	87,70			
bio	PLA	2,01	30,54	-0,39	-57,16	0,00682295
bio	TPS	3,05	25,40	0,65	-62,30	-0,01043339
bio	PHB	3,74	44,70	1,34	-43,00	-0,03116279
fossil	HDPE	1,22	74,85	-1,18	-12,85	0,09182879
fossil	PP	2,38	79,45	-0,02	-8,25	0,00242424

Quelle: Eigene Berechnung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Das positive Verhältnis der Kunststoffe HDPE, PLA und PP deutet auf einen Vorteil im Vergleich zu PET hin. Bei der Substitution dieser Kunststoffe würden sowohl Kosten, als auch nichterneuerbare Energiequellen gespart werden.

Abbildung 20: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für Energiebedarf



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Abbildung 20 zeigt in welchem Quadranten der Kosten-Wirksamkeits-Ebene sich die einzelnen Alternativen befinden. Für alle Kunststoffe welche sich im dritten Quadranten befinden, kann eine Empfehlung für die Substitution gegeben werden. Die Implementierung der Biokunststoffe TPS und PHB hängt von den Präferenzen der Entscheidungsträger, sowie vom vorgegebenen Budget ab.

Erderwärmung

In der folgenden Tabelle 7 werden die Ergebnisse der Kategorie Erderwärmung präsentiert. Ähnlich wie bei der vorigen Kategorie, haben auch hier alle Alternativen geringere Auswirkungen beziehungsweise geringere Treibhausgasemissionen als der Basiskunststoff PET, während die Kunststoffe PLA, HDPE und PP auch niedrigere Herstellungskosten besitzen. Daher haben diese Kunststoffe einen positiven ICER im Gegensatz zu TPS und PHB, welche einen negativen Ratio, wegen den höheren Kosten, aufweisen. Obwohl die Biokunststoffe viel weniger zum Problem der Erderwärmung beitragen, wirken sich die hohen Herstellungskosten negativ auf das Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis aus.

Tabelle 7: ICER der Kategorie Erderwärmung

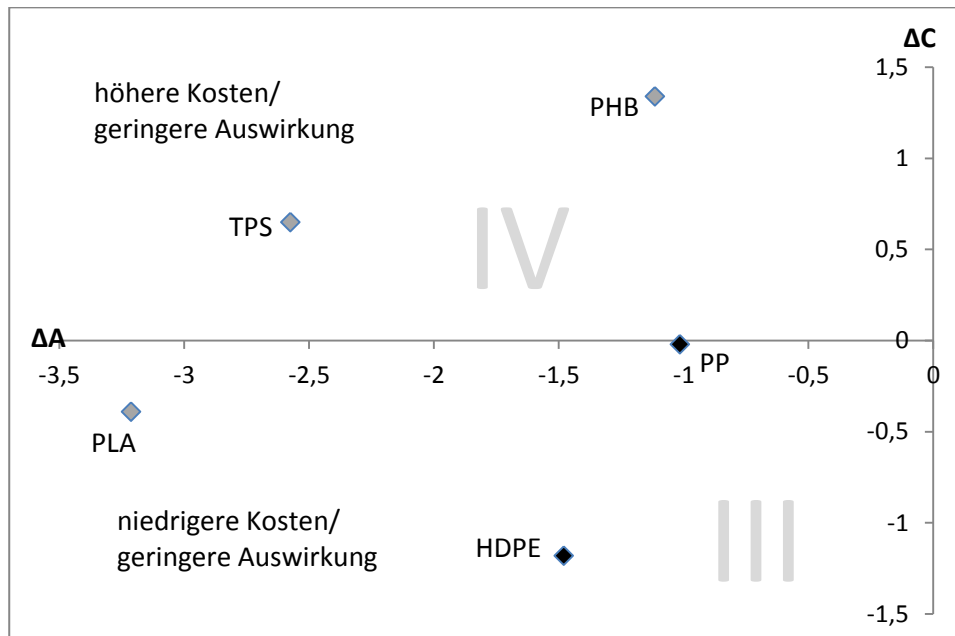
	Kunststoff	Kosten (€/kg)	Erderwärmung (kg CO ₂ eq/kg)	Δ Kosten	Δ Erderwärmung	ICER (ΔK/ΔA)
Standard	PET	2,40	3,715			
bio	PLA	2,01	0,502	-0,39	-3,21	0,12138189
bio	TPS	3,05	1,140	0,65	-2,58	-0,25242718
bio	PHB	3,74	2,600	1,34	-1,12	-1,20179372
fossil	HDPE	1,22	2,235	-1,18	-1,48	0,79729730
fossil	PP	2,38	2,700	-0,02	-1,02	0,01970443

Quelle: Eigene Berechnung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Auch die Kosten-Wirksamkeits-Ebene, dargestellt in der Abbildung 21, bestätigt die Vorzüge der Alternativen im Vergleich zum Basiskunststoff PET. Das beste Substitutionspotential haben jedoch der herkömmliche Kunststoff HDPE in Bezug auf die niedrigsten Herstellungskosten und der Biokunststoff PLA wegen den geringsten Auswirkungen. Die Biokunststoffe TPS

und PHB befinden sich mit ihren geringeren Auswirkungen auf die Erderwärmung und geringeren Herstellungskosten wieder im vierten Quadranten der Ebene.

Abbildung 21: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für Erderwärmung



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Versäuerung

Tabelle 8: ICER der Kategorie Versäuerung

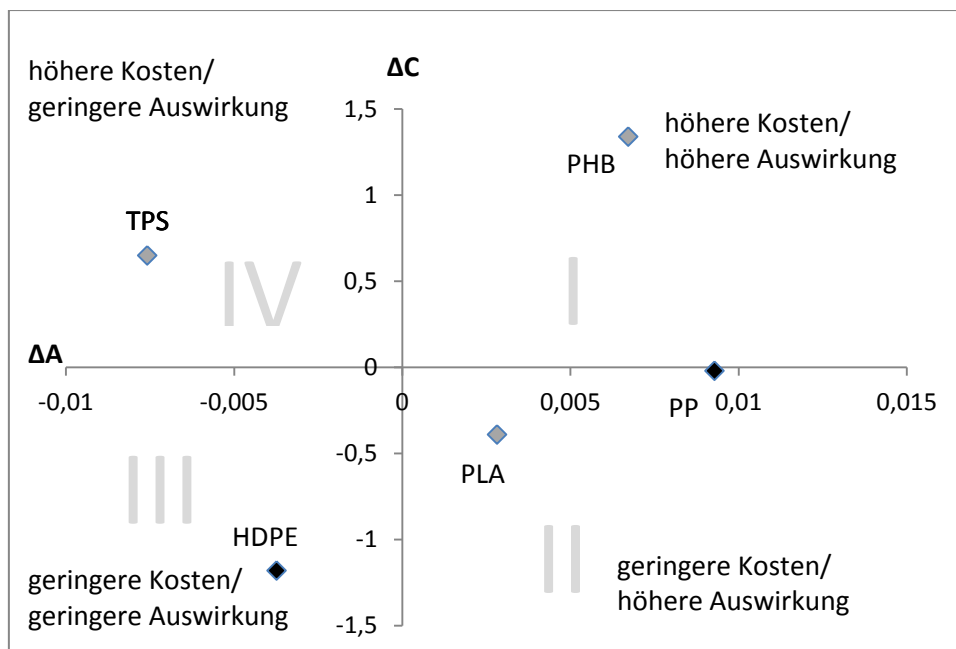
	Kunststoff	Kosten (€/kg)	Versäuerung (kg SO ₂ eq/kg)	Δ Kosten	Δ Versäue- rung	ICER ($\Delta K/\Delta A$)
Standard	PET	2,40	0,018185			
bio	PLA	2,01	0,021000	-0,39	0,002815	-138,543517
bio	TPS	3,05	0,010600	0,65	-0,007585	-85,6954515
bio	PHB	3,74	0,024900	1,34	0,006715	199,553239
fossil	HDPE	1,22	0,014445	-1,18	-0,003740	315,508021
fossil	PP	2,38	0,027465	-0,02	0,009280	-2,15517241

Quelle: Eigene Berechnung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Die Versäuerung von Landflächen und Wasser hängt sehr stark von der Landwirtschaft ab, vor allem von der Benutzung von Düngemittel. Da für die Produktion von Biokunststoffen vermehrt pflanzliche Rohstoffe erfordert und somit angebaut werden, tragen diese Kunststoffe stark zur Versäuerung bei, was auch Tabelle 8 bestätigt.

Einen kleineren Beitrag zur Versäuerung der Landflächen als der Basiskunststoff PET leisten die Kunststoffe TPS und HDPE, während PLA, PHB und PP höhere Werte aufweisen. Der einzige Kunststoff der in dieser Kategorie einen positiven Ratio hat, auf Grund besserer Werte bei der Auswirkung und Kosten im Vergleich zum Basiskunststoff PET, ist HDPE und befindet sich auf der Kosten-Wirksamkeits-Ebene (Abbildung 22) im dritten Quadranten. Der Biokunststoff PHB weist auch einen positiven Ratio auf, befindet sich aber im ersten Quadranten, aufgrund der höheren Herstellungskosten und gleichzeitig höheren negativen Auswirkungen auf die Versäuerung von Gewässern und Landflächen. Somit ist dieser Kunststoff nicht kosteneffektiv und eine Substitution kann hier nicht Empfohlen werden.

Abbildung 22: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für Versäuerung



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Die Kunststoffe PP und PLA befinden sich im zweiten Quadranten. PP hat jedoch nur leicht niedrigere Herstellungskosten als PET, dafür aber deutlich höhere Auswirkungen, weshalb auch in diesen Fall keine Empfehlung für diesen Kunststoff folgen kann. Die Entscheidung für oder gegen die Implementierung der Kunststoffe PLA und TPS hängt wiederum von den Präferenzen des Entscheidungsträgers ab und dem zur Verfügung stehenden Budgets ab.

Eutrophierung

In der Kategorie der Eutrophierung von Gewässern hat einzig der Kunststoff HDPE bessere Werte bei der Auswirkung und Kosten und liefert somit einen positiven ICER (Tabelle 9). Einen positiven Ratio haben auch PHB und TPS, befinden sich aber im ersten Quadranten der Kosten-Wirksamkeits-Ebene (Abbildung 23), was auf höhere Kosten und höhere Werte der Eutrophierung, im Vergleich zum Standard PET, hindeutet. Für diese Kunststoffe kann keine Empfehlung zur Substitution gegeben werden, da sie eindeutig als nicht kosteneffektiv eingestuft werden können.

Tabelle 9: ICER der Kategorie Eutrophierung

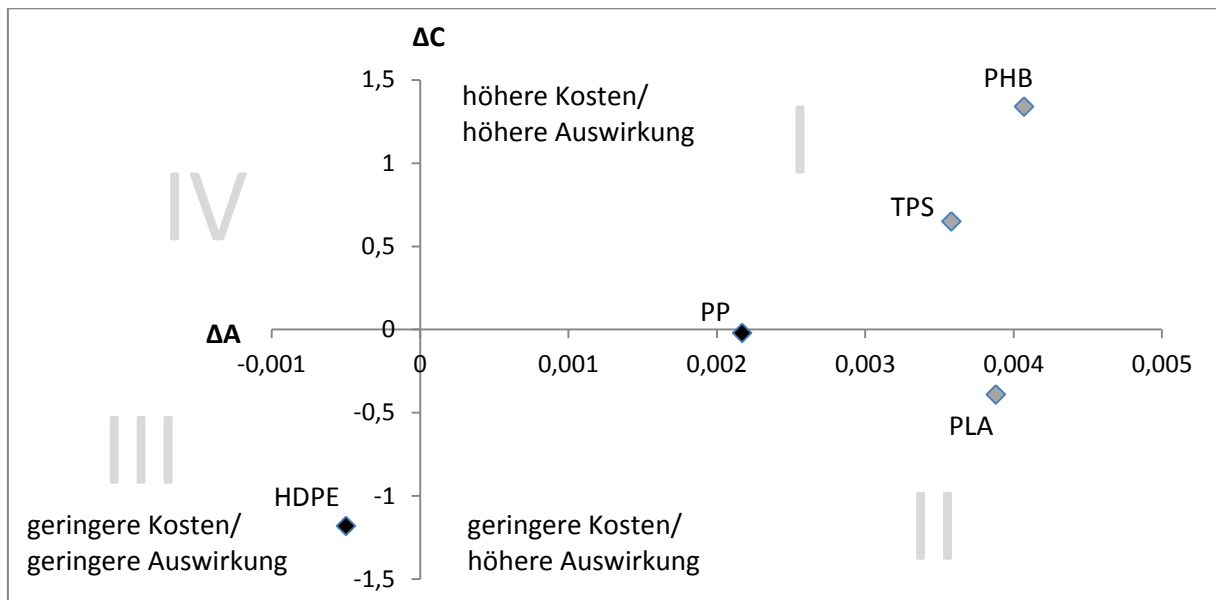
	Kunststoff	Kosten (€/kg)	Eutrophierung (kg PO ₄ eq/kg)	Δ Kosten	Δ Eutrophie- rung	ICER (ΔK/ΔA)
Standard	PET	2,40	0,00112000			
bio	PLA	2,01	0,00500000	-0,39	0,00388000	-100,515464
bio	TPS	3,05	0,00470000	0,65	0,00358000	181,564246
bio	PHB	3,74	0,00519000	1,34	0,00407000	329,238329
fossil	HDPE	1,22	0,00062055	-1,18	-0,00049945	2362,59886
fossil	PP	2,38	0,00329000	-0,02	0,00217000	-9,21658986

Quelle: Eigene Berechnung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

PP befindet sich wieder an der Grenze zum ersten Quadranten und sollte somit, ähnlich wie bei der vorigen Kategorie, nicht zur Implementierung empfohlen werden. Der Biokunststoff PLA befindet sich im zweiten Quadranten der Kosten-Wirksamkeits-Ebene wegen den etwas niedrigeren Kosten und deutlich schlechteren Werten der Eutrophierung.

In der Kategorie der Eutrophierung kann nur der Kunststoff HDPE eindeutig als kosteneffektiv bezeichnet werden, weswegen eine Implementierung dieses Kunststoffes als vorteilhaft bezeichnet werden kann.

Abbildung 23: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für Eutrophierung



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Photochemische Ozonbildung

In der nächsten Kategorie, photochemische Ozonbildung haben alle Alternativen, bis auf PLA, bessere Werte der photochemischen Ozonbildung. Bei den Kosten schneiden wieder PLA, HDPE und PP besser ab. Tabelle 10 zeigt das inkrementelle Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis der Kunststoffe im Vergleich zum PET. Während die beiden herkömmlichen Kunststoffe positive ICER aufweisen, haben alle drei Biokunststoffe negative Werte.

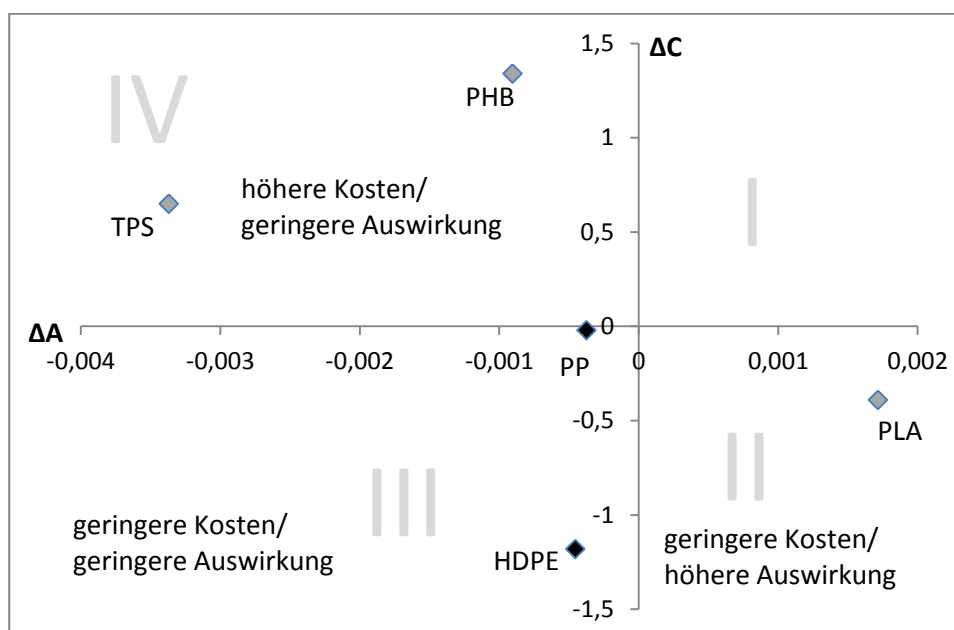
Tabelle 10: ICER der Kategorie photochemische Ozonbildung

	Kunststoff	Kosten (€/kg)	photochemische Ozonbildung (kg C ₂ H ₄ eq/kg)	Δ Kos- ten	Δ Photochemi- sche Ozonbil- dung	ICER (ΔK/ΔA)
Standard	PET	2,40	0,001685			
bio	PLA	2,01	0,003400	-0,39	0,001715	-227,405248
bio	TPS	3,05	0,005000	0,65	-0,003370	-192,878338
bio	PHB	3,74	0,000780	1,34	-0,000905	-1480,66298
fossil	HDPE	1,22	0,001230	-1,18	-0,000455	2593,40659
fossil	PP	2,38	0,001310	-0,02	-0,000375	53,3333333

Quelle: Eigene Berechnung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Daher befinden sich PP und HDPE im dritten Quadranten der Kosten-Wirksamkeits-Ebene (Abbildung 24) und stellen somit kosteneffektive Alternativen dar. Die Implementierung aller drei Biokunststoffe, welche sich im zweiten und vierten Quadranten befinden, hängt ausschließlich vom Entscheidungsträger und seinen Präferenzen ab.

Abbildung 24: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für photochemische Ozonbildung



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Abiotischer Abbau

Der Verbrauch abiotischer Rohstoffe ist eine weitere Kategorie, mit welcher umweltschädliche Einflüsse von Kunststoffen gemessen werden können. In Tabelle 11 ist das ICER dieser Kategorie dargestellt. Werte zum abiotischen Abbau von TPS konnten aus der Literatur nicht entnommen werden, weswegen dieser Kunststoff in dieser Kategorie nicht in Betracht gezogen werden kann.

Die fossilen Kunststoffe HDPE und PP, sowie der Biokunststoff PHB haben bessere Werte der Kategorie „Abiotischer Abbau“ als der Standardkunststoff PET, während HDPE, PP und PLA auch geringere Herstellungskosten liefern. Einen positiven ICER haben somit nur die beiden herkömmlichen Kunststoffe und befinden sich im dritten Quadranten der Kosten-Wirksamkeits-Ebene (Abbildung 25.)

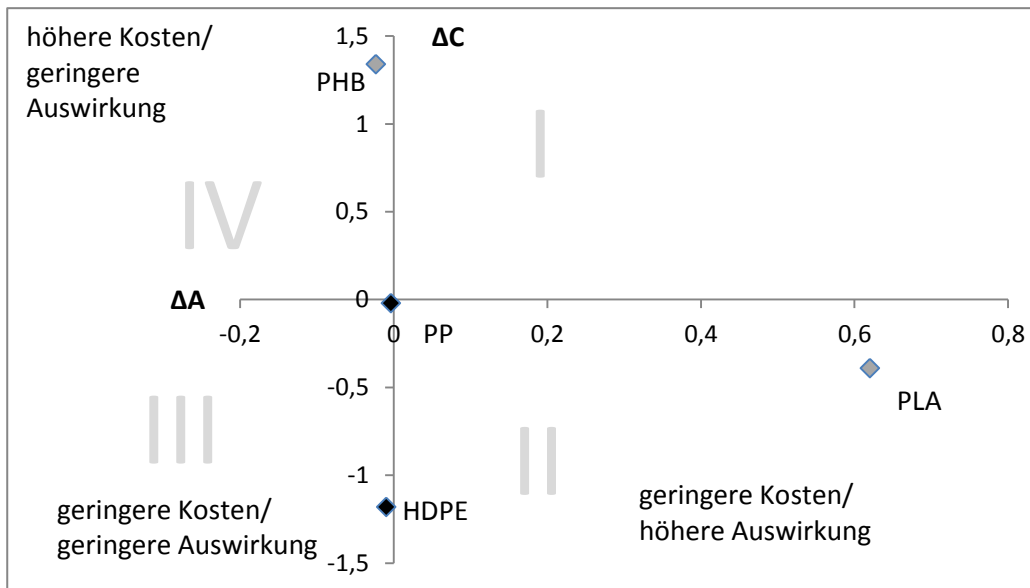
Tabelle 11: ICER der Kategorie abiotischer Abbau

		Kosten (€/kg) (Iowa University)	abiotischer Abbau (kg Sb eq/kg)	Δ Kosten	Δ Abiotischer Abbau	ICER (ΔK/ΔA)
Standard	PET	2,40	0,0450			
bio	PLA	2,01	0,6650	-0,39	0,6200	-0,62903226
bio	TPS	3,05	-	-	-	-
bio	PHB	3,74	0,0218	1,34	-0,0232	-57,7586207
fossil	HDPE	1,22	0,0353	-1,18	-0,0097	121,649485
fossil	PP	2,38	0,0414	-0,02	-0,0036	5,55555556

Quelle: Eigene Berechnung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

PHB liegt im vierten Quadranten, hat deutlich höhere Herstellungskosten als PET, ist aber nur gering vorteilhafter im abiotischen Abbau, während PLA genau umgekehrte Werte liefert. Somit gehören diese zwei Biokunststoffe zu den eher nicht kosteneffektiven Alternativen.

Abbildung 25: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für abiotischer Abbau



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Humantoxizität

Gesundheitsschädliche Einwirkungen von Kunststoffen stellen ein großes Problem der Kunststoffindustrie dar. Dieses Problem kann man als Resultat der Verwendung von schädlichen Weichmachern im Herstellungsprozess von herkömmlichen Kunststoffen interpretieren. Tabelle 12 zeigt einen Überblick der berechneten ICER der Kunststoffe im Vergleich zum Basiskunststoff PET.

Alle vergleichenden Kunststoffe haben einen besseren Wert als der Basiskunststoff PET, jedoch haben nur PLA, HDPE und PP auch niedrigere Herstellungskosten und somit einen positiven ICER. Gleichzeitig befinden sich diese Alternativen im dritten Quadranten der Kosten-Wirksamkeits-Ebene (Abbildung 26) und stellen kosteneffektive Alternativen zum Kunststoff PET dar.

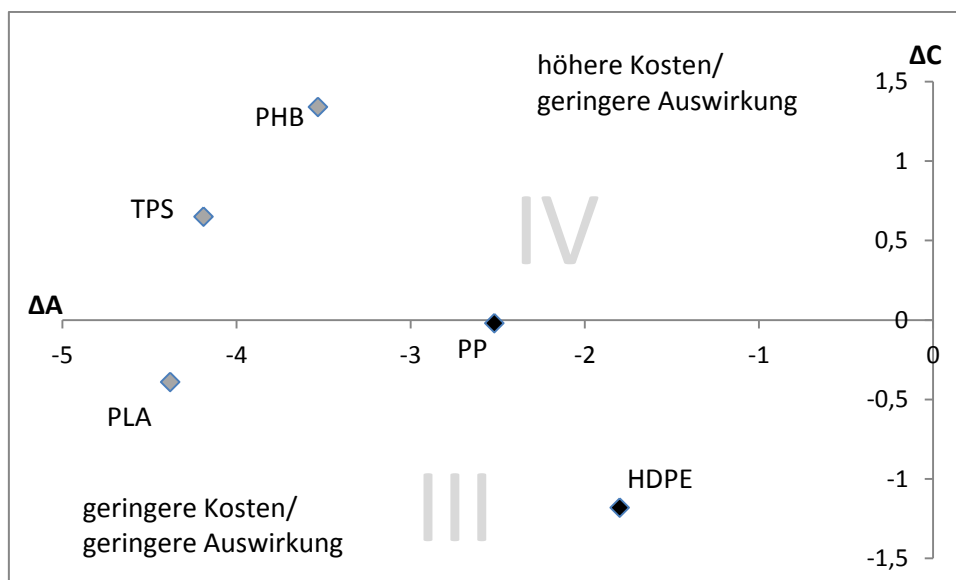
Tabelle 12: ICER der Kategorie Humantoxizität

	Kunststoff	Kosten (€/kg)	Humantoxizität (kg 1,4-DB eq/kg)	Δ Kos- ten	Δ Humantoxizi- tät	ICER ($\Delta K/\Delta A$)
Standard	PET	2,40	4,3900			
bio	PLA	2,01	0,0085	-0,39	-4,3815	0,08901061
bio	TPS	3,05	0,2000	0,65	-4,1900	-0,15513126
bio	PHB	3,74	0,8570	1,34	-3,5330	-0,37928106
fossil	HDPE	1,22	2,5900	-1,18	-1,8000	0,65555556
fossil	PP	2,38	1,8700	-0,02	-2,5200	0,00793651

Quelle: Eigene Berechnung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Die Biokunststoffe TPS und PHB befinden sich im vierten Quadranten aufgrund der höheren Herstellungskosten und der geringeren negativen Auswirkung auf die menschliche Gesundheit. Ihre Implementierung kann durchaus empfohlen werden, hängt jedoch von den Präferenzen des Entscheidungsträgers ab.

Abbildung 26: Kosten-Wirksamkeits-Ebene für Humantoxizität



Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von Polymers Environmental Comparator o.J.; Groot und Boren, 2010; Harding, et.al., 2007; Patel, et.al. o.J.; Plastics Europe, 2008

Fazit

Einzelnen betrachtet schwanken die Ergebnisse sehr stark, abhängig von der betrachteten Kategorie. Das Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis ist somit hilfreich um einzelne Wirksamkeitsmaße zu bewerten, jedoch wird durch das Verhältnis die absolute Höhe der Wirksamkeit vernachlässigt. Außerdem kann mit dem ICER eine Empfehlung der vorteilhaftesten Alternative nur in solchen Fällen gegeben werden, wenn der Entscheidungsträger ausschließlich einzelne Zielkriterien betrachtet.

Der fossile Kunststoff HDPE stellt in allen Kategorien die beste Alternative zum Kunststoff PET dar. Von den Biokunststoffen hat PLA, dank der relativ niedrigen Herstellungskosten, das größte Potenzial den Kunststoff PET zu substituieren. In drei Kategorien (Energiebedarf, Erderwärmung und Humantoxizität) liefert er zu diesem Zeitpunkt kosteneffektive Ergebnisse. Die Implementierung der restlichen drei Kunststoffe: PHB, TPS und PP hängt in jedem Fall von den Präferenzen der Entscheidungsträger ab, sowie vom zur Verfügung stehenden Budget.

5.3. Interpretation der Ergebnisse

Anhand der durchgeführten Kosten-Effektivitäts-Analyse und der erhobenen Daten bezüglich der Kosten und der Wirksamkeiten mehrerer konventioneller und alternativer Kunststoffe gilt es nun festzustellen, ob und wie sich Biokunststoffe im direkten Vergleich zu ölbasierten Kunststoffen verhalten. Vor allem war es Ziel dieser Arbeit festzustellen, ob aktuell ein Potential besteht, traditionelle Kunststoffe mit Biokunststoffen zu ersetzen und inwiefern die „grüne“ Alternative eine ökologische und ökonomische Lösung darstellt.

Im Falle der einheitlichen Betrachtung des Zielsystems, kann keine eindeutige Empfehlung für oder gegen Biokunststoffe gegeben werden. Basierend auf den Ergebnissen der Analyse ist nur der fossile Kunststoff HDPE in allen Punkten besser als der Basiskunststoff PET. Andererseits, während Biokunststoffe in manchen Kategorien bessere Werte liefern, überzeugen traditionelle Kunststoffe in anderen. Grundsätzlich kann bestätigt werden, dass Biokunststoffe einen Nachteil aufgrund der hohen Herstellungskosten aufweisen. Beinahe alle Biokunststoffe sind zwei bis drei Mal teurer als der billigste herkömmliche Kunststoff HDPE. Ursache

für die hohen Kosten sind geringere Produktionskapazitäten, sowie komplizierte und nicht ausgereifte Herstellungsverfahren.

Nichterneuerbarer Rohstoffverbrauch, globale Erderwärmung und Schadstoffgehalt sind Kategorien in denen Biokunststoffe unmissverständlich vorteilhaftere Zahlen als konventionelle Kunststoffe liefern, jedoch die Kosteneffektivität durch die hohen Herstellungskosten, abgeschwächt wird. Da diese Kategorien einige der größten Probleme bezüglich herkömmlicher Kunststoffe darstellen, kann die Annahme bestätigt werden, dass Biokunststoffe eine mögliche Alternative in der Problemlösung dieser Bedenken sind. Allerdings verursacht die Herstellung und Verwendung von Biokunststoffen neue Risiken der Umweltschädigung, welche bis jetzt nicht mit konventionellen Kunststoffen in diesem negativen Ausmaß in Verbindung gebracht wurden. Die Herstellung von biobasierten und biologisch Abbaubaren Kunststoffen erfordert erhebliche landwirtschaftliche Aktivitäten. Für den Anbau von notwendigen Rohstoffen werden große Landflächen geschaffen, indem Wälder abgeholzt werden. Außerdem werden große Mengen an Düngemittel eingesetzt, welche die Versäuerung und Eutrophierung von Landflächen, Wäldern, Seen und Gebäuden verursacht.

Zusammenfassend hängt zu diesem Zeitpunkt die Empfehlung für oder gegen Biokunststoffe stark vom Entscheidungsträger und seinen Präferenzen ab. Werden nur einzelne oder eine Gruppe an Zielen verfolgt, im Sinne der sozialen Verantwortung, können Biokunststoffe sehr wohl bereits jetzt in einem bestimmten Ausmaß zur Verringerung an umweltschädlichen Einflüssen beitragen.

6. Conclusio

Biokunststoff ist ein bekannter Begriff, welcher in letzter Zeit allgegenwärtig vertreten ist. Es gibt eine Vielzahl an verschiedenen Typen von Biokunststoffen die einen pflanzlichen, mikroorganischen oder tierischen Ursprung haben können. Der Herstellungsprozess ist meistens kompliziert und stellt einen großen Kostentreiber dar. Abhängig von ihren Eigenschaften werden die Biokunststoffe in unterschiedlichen Anwendungsgebieten eingesetzt. Diese reichen von der Verpackungs-, Catering- und Automobilindustrie bis zum Baugewerbe und dem Medizin- und Pharmaziebereich. Es existieren spezielle Normen, Standards und Zertifizierungen für Biokunststoffe, welche es dem Verbraucher ermöglichen sollen, Biokunststoffe von anderen Materialien zu unterscheiden und diese auf eine angemessene Weise entsorgen zu können.

Der Biokunststoffmarkt ist im Vergleich zu traditionellen Kunststoffen noch sehr klein. Allein im Jahr 2011 wurden 270 Mio. Tonnen an herkömmlichen Kunststoffen hergestellt, während im gleichen Zeitraum nur 1,2 Mio. Tonnen an Biokunststoffen produziert wurden. Obwohl Experten bis zum Jahr 2016 einen Anstieg der Biokunststoffherstellung von 500% prognostizieren, wird die Lücke in der Produktionskapazität zwischen Biokunststoffen und traditionellen Kunststoffen nicht kleiner. Es gibt einige Faktoren, welche die Entwicklung des Biokunststoffmarktes fördern. Diese sollten beachtet werden um eine Vergrößerung des Marktes zu ermöglichen.

Im Zeitalter des Klimawandels und des Treibhauseffektes war die Debatte um Kunststoffe und deren Auswirkungen auf die Umwelt noch nie so aktuell. In diesem Sinne beantwortet die Umweltökonomie ein paar wichtige Fragen bezüglich des Wertes der Umwelt und der Ressourcenknappheit. Mit Hilfe von einigen Methoden und Konzepten können diese Fragen beantwortet werden. So sind die Zahlungs- und Kompensationsbereitschaft der Konsumenten wichtige Instrumente zur Bestimmung des Wertes eines Umweltgutes und helfen festzustellen für welche Umweltqualitäten Menschen bereit sind zu investieren. Zu den wichtigsten finanzwirtschaftlichen Ansätzen gehören die Kosten-Nutzen-Analyse, Kosten-Wirksamkeits-Analyse und die Kosten-Nutzwert-Analyse.

Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse von Biokunststoffen konnte sowohl die positiven als auch negativen Annahmen bezüglich der Biokunststoffe bestätigen. Während Biokunststoffe einen geringeren Energiebedarf und Treibhausgasemissionen aufweisen, verursachen sie durch die hohe Anwendung von Pestiziden und die Abholzung großer Landflächen erhebliche Schäden für Land und Wasser. Zusätzlich verhindern zu hohe Kosten bei der Herstellung den Durchbruch auf dem Kunststoffmarkt. Letztendlich hängt die Entscheidung für oder gegen den Einsatz von Biokunststoffen vom Entscheidungsträger ab. Gilt es nur die Probleme, die herkömmliche Kunststoffe verursachen, zu minimieren, sollte die Empfehlung für Biokunststoffe lauten, es sollten jedoch die Schäden, welche Biokunststoffe verursachen, nicht außer Acht gelassen werden.

Diese Arbeit beschäftigte sich mit dem Gebiet der Biokunststoffe. Als erstes wurden allgemeine Informationen bezüglich der Kunststoffe geliefert und die damit verbundene Problematik. Der Begriff „Biokunststoffe“ wurde erläutert und ein kurzer Einblick in die historischen Hintergründe dieser Plastikart gegeben. Außerdem wurden mehrere Arten von Biokunststoffen und deren Vor- und Nachteile vorgestellt. Darauf folgte eine Analyse der aktuellen und zukünftigen Entwicklungen des Biokunststoffmarktes im Vergleich zu den traditionellen Kunststoffen. Einzelne Faktoren, welche die Entwicklungen am Markt beeinflussen, wurden besprochen und ein Einblick auf den österreichischen Biokunststoffmarkt geliefert. Ein zusätzliches Gebiet, welches in dieser Arbeit behandelt wurde, ist die Umweltökonomie. Hier wurden die einzelnen Methoden zur Beurteilung der Umwelt erklärt. Schlussendlich folgte in diesem Zusammenhang eine Kosten-Effektivitäts-Analyse von Biokunststoffen im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffen. Die Ergebnisse der Analyse wurden sowohl in einer Kosten-Wirksamkeits-Matrix, als auch mit Hilfe von inkrementellen Kosten-Wirksamkeits-Verhältnissen dargestellt.

Quellenverzeichnis

Literatur:

- Alvarez-Chavez, C.R., Edwards, S., Moure-Eraso, R., Geiser, K. (2012) *Sustainability of bio-based plastics: general comparative analysis and recommendations for improvement*. Journal of Cleaner Production 23(1), 47-56.
- Andruleit, H., Babies, H.G., Bahr, A., Kus, J., Meßner, J., Schauer, M. (2012) *Energiestudie 2012 – Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Hannover.
- Barker, M., Safford, R. (2009) *Industrial uses for crops: markets for bioplastics*. Project report No.450. HGCA: London.
- Beier, W. (2009) *Biologisch abbaubare Kunststoffe*. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau.
- Beucker, S., Marscheider-Weidemann, F., Carus, M. (2007) *Zukunftsmarkt Biokunststoffe*. Umweltbundesamt: Dessau-Roßlau.
- Briggs, A., Fenn, P. (1998) *Confidence intervals or surfaces? Uncertainty on the cost-effectiveness plane*. Health economics, 7(8), 723-740.
- Bruckner, A., Goldenits, D. (2011) *Biokunststoffe in Österreich*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Wien.
- Campbell, C.J. (2011). *Recognition of peak oil*. WIREs Energy Environ 1 (1), 2012: 114-117
- Dosi, C.(2000) *Environmental values, valuation methods and natural disaster damage assessment*. UN ECLAC: Chile.
- European Union (2006) *Guidance on the methodology for carrying out Cost-Benefit Analysis*. European Commission. Working Document No. 4.
- Fargione, J., Hill, J., Tillman, D., Polsky, S., Hawthorne, P. (2008) *Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt*. Science 319(5867), 1235–1238.

- Groot, W.J., Boren, T. (2010) *Life Cycle Assessment of the manufacture of lactide and PLA biopolymers from sugarcane in Thailand*. The International Journal of Life Cycle Assessment 15, 70-984
- Hanusch, H. (2010) *Nutzen-Kosten-Analyse*. 3. Auflage. Vahlen: München.
- Harding, K.G., Dennis, J.S., Blottonitz v. H., Harrison, S.T.L. (2007) *Environmental analysis of plastic production processes: Comparing petroleum-based polypropylene and polyethylene with biologically-based poly- β -hydroxybutyric acid using life cycle analysis*. Journal of Biotechnology 130(2007), 57-66.
- Horn, A., Sumoski, N. (2012) *Bio Plastics: An Economic and Environmental Choice*. University of Pittsburgh; Swanson School Engineering: Pittsburgh.
- Jarmai, K. (2008) *Das Verhältnis von Produktinnovation und nachhaltiger Entwicklung*. Wirtschaftsuniversität Wien: Wien, 2008.
- Kale, G., Kijchavengkul, T., Auras, R., Rubino M., Selke, S.E., Singh, S.P. (2007) *Compostability of Bioplastic Packaging Materials: An Overview*. Macromolecular Bioscience 7(3), 255-277.
- Kharecha, P.A., Hansen, J.E. (2008) *Implications of "peak oil" for atmospheric CO₂ and climate*. Global Biogeochemical Cycles 22(3), 1-10.
- Krotscheck, C., Wimmer, R., Narodoslawsky, M. (1997) *Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Österreich*. Institut für Verfahrenstechnik, Technische Universität Graz: Graz.
- Krueger, M., Kauertz, B., Detzel, A. (2009) *Life cycle assessment of food packaging made of of Ingeo biopolymer and (r)PET*. IFEU Bericht: Heidelberg.
- Kuruppalil, Z. (2011) *Green Plastics: An Emerging Alternative for Petroleum-Based Plastics*. International Journal of Engineering Research and Innovation 3(1), 59-64

- Labouze, E., Honore, C., Moulay, L., Couffignal, B., Beekmann, M. (2004) *Photochemical Ozone Creation Potentials: A new set of characterization factors for different gas species on the scale of Western Europe*. The International Journal Of Life Cycle Assessment 9(3), 187-195.
- Lee, S.Y. (1996) *Bacterial Polyhydroxyalkanoates*. Biotechnology and Bioengineering 49(1), 1-14.
- Lloyd B., Forest, A.S. (2010) *The transition to renewables: can PV provide an answer to peak oil and climate change challenges?* Energy Policy 38 (11), 7378-7394.
- Lloyd, B., Subbarao, S. (2009) *Development challenges under the Clean Development Mechanism (CDM)—Can renewable energy initiatives be put in place before peak oil?* Energy Policy 37 (1), 237–245.
- Matsuura, E., Ye, X., He, X. (2008) *Sustainability Opportunities and Challenges of Bioplastics*. School of Engineering, Blekinge Institute of Technology: Karlskrona.
- Mendelsohn, R., Olmstead, S. (2009) *The Economic Valuation of Environmental Amenities and Disamenities: Methods and Applications*. Annual Review of Environment and Resources 34, 325-347.
- Metz, S. (2006) *Gesundheitsökonomische Evaluationsmethoden*. Biometrie und Medizin 5, 5-35.
- Meyer-Aurich, A., Venus, J., Jolliet, O., Arbor, A. (2008) *Ökonomische und umweltrelevante Potenziale der Herstellung und Nutzung von Polymilchsäure aus nachwachsenden Rohstoffen als Ersatz für Kunststoffe aus petrochemischer Herstellung*. Berichte über Landwirtschaft: Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft 86 (1), 142-161.
- Momani, B. (2009) *Assessment of the Impact of Bioplastics: Energy Usage, Fossil Fuel Usage, Pollution, Health Effects, Effects on the Food Supply, and Economic Effects Compared to Petroleum Based Plastics*. Worcester Polytechnic Institute.
- Mülhaupt, R. (2013) *Green Polymer Chemistry and Bio-based Plastics: Dreams and Reality*. Macromolecular Journals 214 (2), 159-174.

- Patel, M., Bastioli, C., Marini, L., Würdinger, E., (o.J.) Environmental assessment of bio-based polymers and natural fibres. 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam, 17-21 June 2001.
- Quade, E.S. (1968) *Introduction And Overview*. In: Goldman, T.A. (Hrsg) *Cost-Effectiveness Analysis: New Approaches in Decision-Making* 2. Auflage. Praeger: London, 1-16.
- Queiroz, A., Collares-Queiroz, F.P. (2009) *Innovation and Industrial Trends in Bioplastics*. Journal of Macromolecular Science, 49, 65-78.
- Schaltegger, S. (2000) *Studium der Umweltwissenschaften: Wirtschaftswissenschaften*. Springer Verlag: Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio.
- Schläpfer, F. (2005) *Umweltökonomie: Teil 2*. Universität Zürich: Zürich,
- Shen, L., Haufe, J., Patel, M.K. (2009) *Product overview and market projection of emerging bio-based plastic*. Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, Utrecht University Utrecht.
- Sinn, H.W. (2012) *The Green Paradoxon: A Supply Side Approach to Global Warming*. Massachusetts Institute of Technology: Massachusetts.
- Song, J.H., Murphy, R.J., Narayan, R., Davies, G.B.H. (2009) *Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics*. Philosophical Transactions of the Royal Society 364 (1526), 2127-2139.
- Schöfski, M., Graf von der Schuleburg, M. (2012) *Gesundheitsökonomische Evaluation*. 4. Aufl., Springer Verlag: Heidelberg Dordrecht London New York.
- Steen, B.A. (2006) *Abiotic Resource Depletion: Different perceptions of the problem with mineral deposits*. The International Journal Of Life Cycle Assessment 11 (1), 49-54.
- Theinsthid, P., Chandrachai, A., Sasitorn, S., Keeratipibul, S. (2010). „*Bio-based products: factors that influence their adoption*. Proceedings of the 2010 IEEE ICMIT, IEEE Xplore, 354 - 359.

Torras, M. (2000) *The total economic value of Amazonian deforestation, 1978-1993*. Ecological Economics 33 (2), 283-297.

Wiesmeth, H. (2003) *Umweltökonomie: Theorie und Praxis im Gleichgewicht*. Springer Verlag: Berlin, Heidelberg, New York.

Wilhelm, R., Reitingner, H. (2006) *Nachwachsende Biopolymere - Substitution für Massenkunststoff*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: Wien.

Internetquellen:

Bio-based News (2011) *Pro-Tech Tirol wächst mit Biokunststoffen*.

<http://bio-based.eu/nuu/pro-tech-tirol-waechst-mit-biokunststoffen/>

[Zugriff am 12. September 2013].

Biokam Co. n.d. (o.J.) *Life-Cycle Economy*.

<http://www.eurokamczech.com/Biokam/Biokam/web/Life-Cycle%20Economy.html>

[Zugriff am 28.04.2013].

Biokunststoffe.de (o.J.a) *Automobilbereich*.

<http://www.bio-plastics.org/de/informationen-fachwissen-a-markt-know-how/verwendungsbereiche/biokunststoffe-im-automobilbereich>

[Zugriff am 19.04.2013].

Biokunststoffe.de (o.J.b) *Stärkeblends und Stärkederivate*.

<http://bio-plastics.org/de/informationen-fachwissen-a-markt-know-how/biokunststoff-arten/staerke-a-staerkeblends> [Zugriff am 12.04.2013].

Biokunststoffe.de (o.J.c) *Polymilchsäure (PLA)*.

<http://www.bio-plastics.org/de/informationen-fachwissen-a-markt-know-how/biokunststoff-arten/polymilchsaeure-pla> [Zugriff am 12.04.2013].

Biokunststoffe.de (o.J.d) *Polyhydroxyalkanoate*.

<http://www.bio-plastics.org/de/informationen-fachwissen-a-markt-know-how/biokunststoff-arten/polyhydroxyalkanoate> [Zugriff am 13.04.2013].

BPIWorld. (o.J.) *Standard EN 13432: Proof of compostability of plastic products.*

<http://www.bpiworld.org/Default.aspx?pageId=190437> [Zugriff am 11.02.2013].

European Bioplastics (2008) *Ökobilanzen von Biokunststoffen.*

http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/pp/LCA_Positionspapier_de.pdf [Zugriff am 07.08.2013].

European Bioplastics (2010a) *Anaerobic Digestion - Fact Sheet.*

http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/FactSheet_Anaerobic_Digestion.pdf
[Zugriff am 18.05.2013].

European Bioplastics (2010b) *Mechanical Recycling - Fact Sheet.*

http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/FactSheet_Mechanical_Recycling.pdf
[Zugriff am 13.08.2013].

European Bioplastics (2011a) *Energy Recovery - Fact Sheet.*

http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/FactSheet_Energy_Recovery.pdf
[Zugriff am 18.05.2013].

European Bioplastics (2011b) *Labelling, Logos, Charts.*

<http://en.european-bioplastics.org/press/press-pictures/labelling-logos-charts/>
[Zugriff am 06.06.2013].

European Bioplastics (2011c) *Landfilling – Fact Sheet.*

http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/Landfill_FactSheet.pdf [Zugriff am 13.08.2013].

European Bioplastics (2012a) *About Us.*

<http://en.european-bioplastics.org/about-us/> [Zugriff am 13.08.2013].

European Bioplastics (2012b) *Accountability is key - Environmental Communications Guide*.

http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2012/publications/EuBP_Environmental_Communications_Guide_2012_final.pdf [Zugriff am 14.06.2013].

European Bioplastics (2012c) *Bioplastics*

<http://en.european-bioplastics.org/bioplastics/> [Zugriff am 11.02.2013].

European Bioplastics (2012d) *Certification*

<http://en.european-bioplastics.org/standards/certification/> [Zugriff am 29.04.2013].

European Bioplastics (2012e) *Market*.

<http://en.european-bioplastics.org/market/market/> [Zugriff am 05.08.2013].

European Bioplastics (2012f) *Market development*.

<http://en.european-bioplastics.org/market/market-development/>
[Zugriff am 05.08.2013].

European Bioplastics (2012g) *Standards, certification and labelling*.

<http://en.european-bioplastics.org/standards/> [Zugriff am 29.04.2013].

European Bioplastics (2012h) *Was sind Biokunststoffe? - Fact Sheet*.

http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/Biokunststoffe_de.pdf [Zugriff am 29.04.2013].

European Bioplastics (2013a) *Market*.

<http://en.european-bioplastics.org/market/> [Zugriff am 02.07.2013].

European Bioplastics (2013b) *Production Capacity*.

<http://en.european-bioplastics.org/market/market-development/production-capacity/> [Zugriff am 02.07.2013].

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (o.J.) *Verpackungen*.

<http://biowerkstoffe.fnr.de/biokunststoffe/produkte/> [Zugriff am 19.04.2013].

Gabler Wirtschaftslexikon (o.J.) *Cradle-to-cradle*.

<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/cradle-to-cradle.html>

[Zugriff am 19.04.2013].

Greenpeace (2009) *The Trash Vortex*.

<http://www.greenpeace.org/international/en/campaigns/oceans/pollution/trash-vortex/> [Zugriff am 11.02.2013].

IfBB (2013a) *PHB feedstock corn - feedstock requirements per t biopolymer*.

<http://ifbb.wp.hs->

[hanno-](http://ifbb.wp.hs-)

[ver.de/downloads/content/Statistics/Feedstock%20requirements/Process%20routes%20\[t%20feedstock%20--%20t%20biopolymer\]/Bio-based%20polyesters/Polyhydroxyalkanoates%20\(PHA\)/Polyhydroxybutyrate%20\(PHB\)/PHB feedstock corn - feedstock requirements per t biopolymer.png](http://ifbb.wp.hs-ver.de/downloads/content/Statistics/Feedstock%20requirements/Process%20routes%20[t%20feedstock%20--%20t%20biopolymer]/Bio-based%20polyesters/Polyhydroxyalkanoates%20(PHA)/Polyhydroxybutyrate%20(PHB)/PHB_feedstock_corn_-_feedstock_requirements_per_t_biopolymer.png)

[Zugriff am 13.06.2013].

IfBB (2013b) *PLA 100 feedstock corn - feedstock requirements per t biopolymer*.

<http://ifbb.wp.hs->

[hanno-](http://ifbb.wp.hs-)

[ver.de/downloads/content/Statistics/Feedstock%20requirements/Process%20routes%20\[t%20feedstock%20--%20t%20biopolymer\]/Bio-based%20polyesters/PLA%20and%20PLA%20blends/PLA/PLA 100 feedstock corn - feedstock requirements per t biopolymer.png](http://ifbb.wp.hs-ver.de/downloads/content/Statistics/Feedstock%20requirements/Process%20routes%20[t%20feedstock%20--%20t%20biopolymer]/Bio-based%20polyesters/PLA%20and%20PLA%20blends/PLA/PLA_100_feedstock_corn_-_feedstock_requirements_per_t_biopolymer.png) [Zugriff am 13.06.2013].

IfBB (2013c) *TPS feedstock corn - feedstock requirements per t biopolymer*.

<http://ifbb.wp.hs->

[hanno-](http://ifbb.wp.hs-)

[ver.de/downloads/content/Statistics/Feedstock%20requirements/Process%20routes%20\[t%20feedstock%20--%20t%20biopolymer\]/Starch-based%20polymers/Thermoplastic%20starch%20\(TPS\)/TPS feedstock corn - feedstock requirements per t biopolymer.png](http://ifbb.wp.hs-ver.de/downloads/content/Statistics/Feedstock%20requirements/Process%20routes%20[t%20feedstock%20--%20t%20biopolymer]/Starch-based%20polymers/Thermoplastic%20starch%20(TPS)/TPS_feedstock_corn_-_feedstock_requirements_per_t_biopolymer.png) [Zugriff am 13.06.2013].

Kunststoffweb (2011) Kunststoffmärkte: Weltweite Produktion legt 2010 auf 265 Mio t zu.

http://www.kunststoffweb.de/ki_ticker/Kunststoffmaerkte_Weltweite_Produktion_legt_2010_auf_265_Mio_t_zu_t220590 [Zugriff am 11.02.2013].

n-tv (2011) *Danone wird abgemahnt.*

<http://www.n-tv.de/ratgeber/Danone-wird-abgemahnt-article3901791.html>
[Zugriff am 30.04.2013]

Plastic Garbage Project (2013a) *Der Mythos von Abfallinseln und Müllteppichen.*

<http://www.plasticgarbageproject.org/de/themen/probleme/plastikmuellstrudel/>
[Zugriff am 28.04.2013].

Plastic Garbage Project (2013b) *Zusatzstoffe im Plastik.*

<http://www.plasticgarbageproject.org/de/themen/probleme/zusatzstoffe/>
[Zugriff am 30.04.2013].

Plastics Europe (2008a) *Amorphous PET - Eco Profiles.*

<http://www.plasticseurope.org/plasticssustainability/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r48> [Zugriff am 22.06.2013].

Plastics Europe (2008b) *HDPE Resin - Eco Profile.*

<http://www.plasticseurope.org/plasticssustainability/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r26> [Zugriff am 22.06.2013].

Plastics Europe (2008c) *PP Resin - Eco Profiles.*

<http://www.plasticseurope.org/plasticssustainability/eco-profiles/browse-by-flowchart.aspx?LCAID=r30> [Zugriff am 22.06.2013].

Plastics Europe (2012) *Plastics - the Facts 2012. An analysis of European plastics production, demand and waste data for 2011.*

http://www.plasticseurope.org/documents/document/20121120170458-final_plasticsthefacts_nov2012_en_web_resolution.pdf [Zugriff am 12.05.2013]

Polymers Environmental Comparator (o.J.).

<http://pec.materialdatacenter.com/pec/> [Zugriff am 23.07.2013].

WRAP (2007) *Consumer Attitudes to biopolymers*.

<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/Consumer%20attitude%20to%20biopolymers%20report%20final%206th%20Sep%202007.pdf> [Zugriff am 22.06.2013].

Appendix A: Abstract

Kunststoffe sind wichtige Materialien und Werkstoffe, welche aus der heutigen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken sind. Jedoch haben sich im Laufe der Zeit auch viele Probleme im Zusammenhang mit der Verwendung beziehungsweise Herstellung von Kunststoffen herauskristallisiert. Die Ressourcenknappheit fossiler Rohstoffe, erhöhte Treibhausgasemissionen, gesundheitsschädliche Risiken, sowie eine problematische Abfallbeseitigung sind nur einige der Anliegen die das Bewusstsein nach umweltfreundlicheren Alternativen fördern. In diesem Sinne werden Biokunststoffe oft als mögliche Alternative zu traditionellen Kunststoffen angesehen.

Diese Arbeit liefert eine kritische Übersicht über Biokunststoffe. Es werden die verschiedenen Arten, die Anwendungsgebiete, Vor- und Nachteile, sowie der Kunststoffmarkt erörtert. Anschließend wird der Begriff der Umweltökonomie erklärt, sowie die wichtigsten Methoden zur Bewertung der Umwelt. Abschließend werden einige Biokunststoffe mit konventionellen Kunststoffen, mit Hilfe einer Kosten-Effektivitäts-Analyse, verglichen.

Appendix B: Abstract

In today's society, plastics are crucial materials and substances which cannot be omitted. However, in the course of time, numerous issues have been established regarding the production and usage of plastics. The lack of fossil resources, increasing greenhouse gas emissions, health risks, and problematic waste disposal are only a few concerns which are responsible for a growing demand for more environment-friendly alternatives. To this effect bioplastics are seen as a possible alternative to traditional plastics.

This thesis provides a critical summary of bioplastics. The various types, their application ranges, assets, and drawbacks, as well as the plastics market are going to be disputed. Afterwards, the definition of environmental economics will be explained as well as the most important procedures of rating the environment. In the conclusion of this thesis some of the bioplastics will be compared to conventional plastics, and their cost-effectiveness analysis will be provided.

Appendix C: Lebenslauf

Persönliche Angaben

Emina Dugonjic, dipl. oec.

Geboren in Zvornik, am 13. Dezember 1983

Staatsangehörigkeit Bosnien und Herzegowina

Ausbildung

2010 – 2013	Masterstudium der Betriebswirtschaft, Universität Wien
	Spezialisierung: Innovations- und Technologiemanagement Controlling
	Masterarbeit: „Kosten-Effektivitäts-Analyse von Bioplastik“
2002 – 2008	Diplomstudium der Betriebswirtschaft, Universität Tuzla, Bosnien und Herzegowina
	Spezialisierung: Marketing
	Diplomarbeit: „Mehrkriterielle lineare Programmierung in der unternehmerischen Entscheidungsfindung“
1998 – 2002	Gymnasium „Mesa Selimovic“ in Tuzla, Bosnien und Herzegowina
1997 – 1998	Grundschule Memici, Bosnien und Herzegowina
1996 – 1997	Realschule „Sandbaenkli“, Bischofszell, Schweiz
1995 – 1996	Primarschule Hauptwil, Schweiz
1994 – 1995	Hauptschule Bogen, Deutschland
1992 – 1994	Grundschule „Theodor Eckert“ Deggendorf, Deutschland
1991 – 1992	Grundschule Memici, Bosnien und Herzegowina
1990 – 1991	Grundschule Kalesija, Bosnien und Herzegowina