

TEXTE

57/2018

Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe

TEXTE 57/2018

Projektnummer 93711

UBA-FB 002676

Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe

von

Maria Burgstaller, Alexander Potrykus,
Jakob Weißenbacher
BiPRO GmbH – Part of Ramboll, München

Dr. Stephan Kabasci, Dr. Ute Merrettig-Bruns,
Bettina Sayder
Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energie-
technik UMSICHT, Oberhausen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

BiPRO GmbH – Part of Ramboll
Grauertstraße 12
81543 München

Abschlussdatum:

Juni 2018

Redaktion:

Fachgebiet III 1.6 Produktverantwortung
Petra Weißhaupt

Publikationen als PDF:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2018

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe

In Deutschland und in Europa besteht ein kleiner, jedoch stetig wachsender Markt für biologisch abbaubare Kunststoffe. Die Produkte aus den betreffenden Materialien werden in der Landwirtschaft und im Gartenbau sowie als Sammelbeutel für Bioabfälle eingesetzt. Zusätzlich ist ein wachsender Einsatz im Verpackungs- und Bedarfsgegenständesektor zu beobachten. Der Einsatz biologisch abbaubarer Kunststoffe in Produkten und besonders der Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen werden jedoch kontrovers diskutiert. So wird die biologische Abbaubarkeit sowohl als Chance im Kampf gegen die langfristige Vermüllung der Umwelt als auch als Risiko für eine Verschärfung der Litteringproblematik und für einen potenziell verstärkten Eintrag in die Umwelt betrachtet. In der Folge gibt es europaweit unterschiedliche Ansichten über die ökologische Vorteilhaftigkeit biologisch abbaubarer Kunststoffe und abweichende Ansätze im Umgang mit entsprechenden Abfällen.

Vor diesem Hintergrund war die Zielsetzung des Vorhabens, unterschiedliche Strategien und Entsorgungskonzepte für biologisch abbaubare Kunststoffe aus den europäischen Mitgliedstaaten zu identifizieren und zu vergleichen. Der Schwerpunkt lag dabei auf den Ansätzen der Länder Deutschland, Italien, Frankreich, Niederlande und Schweden. Des Weiteren wurde das Abbauverhalten biologisch abbaubarer Kunststoffe in der Umwelt sowie Auswirkungen unterschiedlicher Entsorgungsoptionen auf die Umwelt analysiert und - darauf basierend - Empfehlungen für den Umgang mit in Deutschland besonders relevanten Produktgruppen (Mulchfolien, Bioabfallbeutel und Kunststoffverpackungen) unter aktuellen Rahmenbedingungen formuliert. Inspiriert von den Ansätzen anderer Mitgliedstaaten, wurden zusätzlich drei alternative Ansätze für den künftigen Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen und deren Abfälle in Deutschland diskutiert.

Abstract: Study on the treatment of biodegradable plastics

In Germany and Europe there is a small but growing market for biodegradable plastics. Biodegradable plastics are used in agriculture, in horticulture and as bags to collect bio-waste. In addition, there is a growing use in the packaging and consumer goods sector. However, there is controversial discussion regarding the use of biodegradable plastics in products and especially the treatment of biodegradable plastics waste. Thus, while biodegradability is seen as an opportunity to fight against long-term littering it may also risk aggravating the problem of littering further and potentially increase environmental impacts. Subsequently there are different views across Europe about the ecological benefit of biodegradable plastics and different approaches in dealing with biodegradable plastic wastes that exist. Considering this background, the aim of the project was to identify and compare different strategies and treatment approaches for biodegradable plastics within the Member States of the European Union. The focus, primarily, being on the approaches of Germany, Italy, France, the Netherlands and Sweden.

Furthermore, the degradability of biodegradable plastics in the environment, as well as the effects on the environment of different treatment options, were analysed and – based on this – recommendations were formulated for the waste treatment of relevant product groups in Germany (mulch films, bio-waste bags and plastic packaging) under current conditions. Inspired by the approaches of other Member States, three alternative approaches, for Germany's future plan for dealing with biodegradable plastic and their waste, were also discussed.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	11
Zusammenfassung	13
Summary	19
1 Hintergrund und Zielsetzung	25
2 Spektrum biologisch abbaubarer Kunststoffe	27
2.1 Abgrenzung biologisch abbaubarer Kunststoffe	27
2.2 Aktuelle Marktsituation und Abfallaufkommen biologisch abbaubarer Kunststoffe	29
2.2.1 Datenüberblick Biokunststoffe und biologisch abbaubare Kunststoffe	29
2.2.2 Aktuelle Marktsituation biologisch abbaubarer Kunststoffe weltweit	31
2.2.3 Produktionskapazität und Verbrauch biologisch abbaubarer Kunststoffe in Europa und Deutschland	36
2.2.4 Abfallaufkommen biologisch abbaubarer Kunststoffe in Europa und Deutschland	37
3 Entsorgung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle in Europa	40
3.1 Überblick möglicher Entsorgungswege in Europa	40
3.2 Aktuelle Normen und Prüfverfahren	42
3.3 Strategien und gesetzliche Regelungen innerhalb der EU	51
3.4 Detaillierte Analyse der Entsorgungskonzepte von fünf Beispielländern	55
3.4.1 Deutschland	57
3.4.2 Frankreich	63
3.4.3 Italien	67
3.4.4 Niederlande	72
3.4.5 Schweden	76
3.5 Gegenüberstellung der Entsorgungskonzepte der Beispielländer	79
4 Grundlagen der biologischen Abbaubarkeit	85
4.1 Biologischer Abbau von Kunststoffen in verschiedenen Milieus unter optimalen Umgebungsbedingungen	85
4.1.1 Testverfahren zur Prüfung der biologischen Abbaubarkeit	86
4.1.2 Kunststoffe mit nachgewiesener biologischer Abbaubarkeit	89
4.2 Zeitraum der Zersetzung in situ im Boden, Süßwasser und Meerwasser unter realen Bedingungen	96

4.2.1	Zersetzung im Boden	97
4.2.2	Zersetzung in Süßwasser	99
4.2.3	Zersetzung in Meerwasser	100
4.3	Charakterisierung abbaurelevanter mikrobieller Gemeinschaften in aquatischen und terrestrischen Ökosystemen	103
4.3.1	Terrestrisches Milieu	104
4.3.2	Aquatisches Milieu.....	105
5	Empfehlungen für eine optimale Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland.	106
5.1	Gegenüberstellung von Chancen und Herausforderungen der unterschiedlichen Verwertungswege in Deutschland	106
5.1.1	Werkstoffliches Recycling	107
5.1.2	Industrielle Kompostierung	108
5.1.3	Gartenkompostierung.....	112
5.1.4	Biologischer Abbau im Boden.....	114
5.1.5	Vergärung	114
5.1.6	Energetische Verwertung	116
5.2	Bewertung und Empfehlung zur derzeitigen Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland	117
5.2.1	Mulchfolien aus biologisch abbaubaren Kunststoffen	117
5.2.2	Bioabfallbeutel aus biologisch abbaubaren Kunststoffen	118
5.2.3	Biologisch abbaubare Kunststoffverpackungen	119
5.3	Diskussion alternativer Ansätze im Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen in Deutschland.....	120
5.3.1	Ansatz I: Verpflichtung für sämtliche leichten Kunststoffabfallbeutel kleiner 50 Mikron: Zertifizierung nach EN 13432 sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen	120
5.3.2	Ansatz II: Aufnahme von sehr leichten Obst- und Gemüsebeuteln kleiner 15 Mikron in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen	122
5.3.3	Ansatz III: Aufnahme von Lebensmittelverpackungen in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen.....	124
6	Quellenverzeichnis	128
A	Anhang	141
A.1	Fragebogen.....	141

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Abgrenzung konventionelle Kunststoffe und Biokunststoffe...28
Abbildung 2:	Prozentualer Anteil biologisch abbaubarer Kunststoffe an Biokunststoffen (IfBB 2016) (weltweit)31
Abbildung 3:	Prozentualer Anteil biologisch abbaubarer Kunststoffe an Biokunststoffen (nova-Institut/EUBP 2017) (weltweit).....32
Abbildung 4:	Prozentuale Verteilung biologisch abbaubarer Kunststoffe nach Einsatzbereichen auf Basis der weltweiten Produktionskapazitäten BAK33
Abbildung 5:	Abfallhierarchie nach der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG41
Abbildung 6:	Vereinfachte Darstellung der Entsorgungswege mengenmäßig relevanter BAK in Deutschland.....62
Abbildung 7:	Vereinfachte Darstellung der Entsorgungswege mengenmäßig relevanter BAK in Frankreich.....66
Abbildung 8:	Vereinfachte Darstellung der Entsorgungswege mengenmäßig relevanter BAK Italien.....71
Abbildung 9:	Vereinfachte Darstellung der Entsorgungswege mengenmäßig relevanter BAK in den Niederlanden.....75
Abbildung 10:	Vereinfachte Darstellung der Entsorgungswege mengenmäßig relevanter BAK in Schweden78
Abbildung 11:	Testschema zur Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit und Zersetzung im Meer101
Abbildung 12:	Schematische Darstellung des biologischen Abbauprozesses.....103
Abbildung 13:	Überblick über betroffene Produktgruppen der alternativen Ansätze120

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Marktdominante biologisch abbaubare Kunststoffe34
Tabelle 2:	Produktionskapazitäten bzw. reale Abschätzung des Verbrauchs biologisch abbaubarer Kunststoffe in t/a und %...36
Tabelle 3:	Berechnung des Abfallaufkommens biologisch abbaubarer Kunststoffe nach Einsatzbereichen in Europa in (t/a)38
Tabelle 4:	Berechnung des Abfallaufkommens biologisch abbaubarer Kunststoffe nach Einsatzbereichen in Deutschland in (t/a)39
Tabelle 5:	Normen und Prüfverfahren zum Abbauverhalten biologisch abbaubarer Kunststoffe.....44
Tabelle 6:	Regelungen zu biologisch abbaubaren Kunststoffen in ausgewählten europäischen Ländern53
Tabelle 7:	Beteiligung Befragung56

Tabelle 8:	Gegenüberstellung der Entsorgungskonzepte der Beispielländer80
Tabelle 9:	Prüfverfahren der biologischen Abbaubarkeit86
Tabelle 10:	Prüfprogramme mit Anforderungen an die biologische Abbaubarkeit87
Tabelle 11:	Prüfprogramme mit Anforderungen an die Desintegration.....89
Tabelle 12:	Biologische Abbaubarkeit (Mineralisierung) von biologisch abbaubaren Kunststoffen unter Kompostierungsbedingungen89
Tabelle 13:	Biologische Abbaubarkeit (Mineralisierung) von biologisch abbaubaren Kunststoffen im Boden.....91
Tabelle 14:	Ergebnisse der Zersetzung im Desintegrationsversuch bei OWS (Wilde et al. 2016a)92
Tabelle 15:	Biologische Abbaubarkeit (Mineralisierung) von biologisch abbaubaren Kunststoffen im wässrigen Milieu.....93
Tabelle 16:	Biologische Abbaubarkeit (Mineralisierung) von biologisch abbaubaren Kunststoffen unter anaeroben Bedingungen94
Tabelle 17:	Bei Vinçotte zertifizierte Werkstoffe mit Schichtdicken96
Tabelle 18:	Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen für das werkstoffliche Recycling von BAK in Deutschland107
Tabelle 19:	Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen für die industrielle Kompostierung von BAK (v.a. Bioabfallbeutel) in Deutschland.....109
Tabelle 20:	Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen für die Gartenkompostierung von BAK in Deutschland112
Tabelle 21:	Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen des biologischen Abbaus im Boden für BAK in Deutschland (v.a. Mulchfolien)114
Tabelle 22:	Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen einer Vergärung von BAK in Deutschland (v.a. Bioabfallbeutel)114
Tabelle 23:	Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen der energetischen Verwertung von BAK in Deutschland116
Tabelle 24:	Ansatz I: Verpflichtung für sämtliche leichten Kunststoffabfallbeutel kleiner 50 Mikron: Zertifizierung nach EN 13432 sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen120
Tabelle 25:	Ansatz II: Aufnahme von sehr leichten Obst- und Gemüsebeuteln kleiner 15 Mikron in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen123
Tabelle 26:	Ansatz III: Aufnahme von Lebensmittelverpackungen in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen.125

Abkürzungsverzeichnis

µm	Mikrometer (10 ⁻⁶ m)
AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
AS	Australian Standard (Australischer Standard)
ASTM	Internationale Standardisierungsorganisation
BAK	Biologisch abbaubarer Kunststoff
BioAbfV	Bioabfallverordnung
bzw.	Beziehungsweise
CA	Cellulose-Acetat
ca.	circa
CEN	European Committee for Standardisation (Europäisches Komitee für Normung)
CIC	Consorzio Italiano Compostatori (Italienisches Kompost Konsortium)
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN SPEC	Deutsches Institut für Normung mit Erarbeitung von Spezifikationen
DüMV	Düngemittelverordnung
EN	European Standard (Europäischer Standard)
etc.	Et cetera
EU	Europäische Union
EUBP	European Bioplastics
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
IfBB	Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
kg/EW	Kilogramm pro Einwohner
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LD	Low Density
MBT	Mechanisch-Biologische Abfallbehandlungsanlage
MS	Mitgliedstaaten
NF	Normes Françaises (Französischer Standard)
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
örE	Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger
PBAT	Polybutylenadipat-Terephthalat
PBS	Polybutylensuccinat
PCL	Polycaprolacton
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat

PHA	Polyhydroxyalkanoate
PHB	Polyhydroxybutyrat
PHBHV	Polyhydroxybutyrat-co-Hydroxyvalerat
PLA	Polylactid (Polymilchsäure)
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
RISE	Research Institut Sweden (Forschungsinstitut Schweden)
SPCR	Swedish Standard (Schwedischer Standard)
t/a	Tonne pro Jahr
TPS	Thermoplastische Stärke
u.a.	Unter anderem
u.Ä.	Und Ähnliche(s)(r)
UNI	Ente Nazionale Italiano di Unificazione (Italienisches Normungsinstitut)
VerpackV	Verpackungsverordnung
z.B.	Zum Beispiel

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung

Aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften und flexibler Verarbeitbarkeit sind Kunststoffe ein wichtiger Bestandteil unseres Alltags. Biokunststoffe werden als mögliche Alternative zu konventionellen Kunststoffen betrachtet. Aktuell tragen diese mit einem Anteil von circa 1,3 % zur globalen Kunststoffproduktion bei. Für die Zukunft wird ein weiterer Anstieg erwartet.

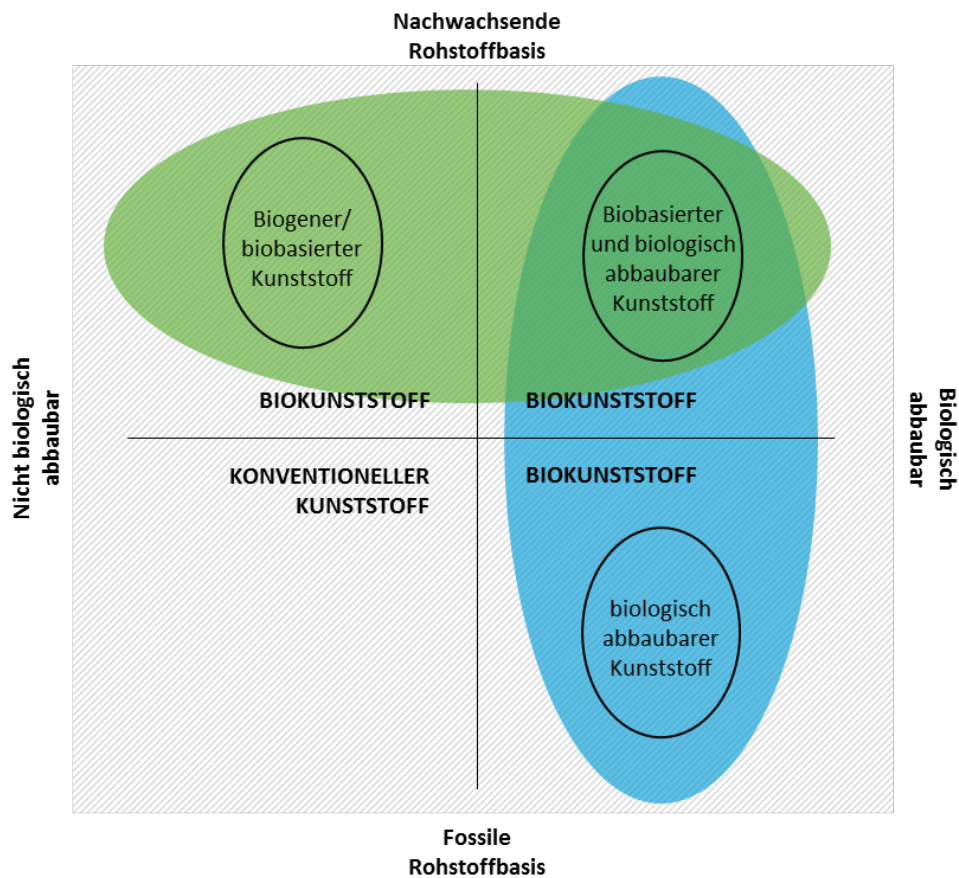
Biologisch abbaubare Kunststoffe und ihre Abfälle werden jedoch kontrovers diskutiert. So gilt die biologische Abbaubarkeit sowohl als Chance im Kampf gegen Vermüllung der Umwelt, wird aber auch als Risiko für den verstärkten Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt betrachtet. In der Folge gibt es unterschiedliche Ansichten über die ökologische Vorteilhaftigkeit biologisch abbaubarer Kunststoffe und abweichende Ansätze im Umgang mit entsprechenden Abfällen. Vor diesem Hintergrund war die Zielsetzung des Vorhabens, unterschiedliche Strategien und Entsorgungskonzepte für biologisch abbaubare Kunststoffe aus den europäischen Mitgliedstaaten zu identifizieren und zu vergleichen. Der Schwerpunkt lag dabei auf den Ansätzen der Länder Deutschland, Italien, Frankreich, Niederlande und Schweden.

Des Weiteren wurde das Abbauverhalten biologisch abbaubarer Kunststoffe in der Umwelt analysiert und - darauf basierend - Empfehlungen für den Umgang mit in Deutschland besonders relevanten Produktgruppen (Mulchfolien, Bioabfallbeutel und Kunststoffverpackungen) unter aktuellen Rahmenbedingungen formuliert. Inspiriert von den Ansätzen anderer Mitgliedstaaten wurden zusätzlich drei alternative Ansätze für den künftigen Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen und deren Abfälle in Deutschland diskutiert.

Spektrum biologisch abbaubarer Kunststoffe und Markt- und Abfallaufkommen in Europa und Deutschland

Als Biokunststoff vermarktete Produkte sind entweder zum Teil oder vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen gefertigt, oder genügen Standards der biologischen Abbaubarkeit. Letztere standen in diesem Vorhaben im Vordergrund (siehe folgende Abbildung).

Abbildung: Abgrenzung konventioneller Kunststoffe und Biokunststoffe



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von (EUBP o.J.)

Als biologisch abbaubar wird ein Kunststoff bezeichnet, sofern er durch Mikroorganismen unter Sauerstoffzufuhr in Kohlenstoffdioxid, Wasser, mineralische Salze und Biomasse bzw. ohne Sauerstoffzufuhr in Kohlenstoffdioxid, Methan, mineralische Salze und Biomasse umgewandelt werden kann. Diese Eigenschaft ist experimentell feststellbar.

Im Jahr 2015 lag die globale Produktionskapazität biologisch abbaubarer Kunststoffe nach Herstellerinformationen zwischen 737.000 t/a (IfBB 2016) und 957.000 t/a (nova-Institut/EUBP 2016). Der tatsächliche Verbrauch wurde auf etwa 290.000 t/a (narocon/nova-Institut 2016) geschätzt. In Europa lag der Verbrauch bei ca. 100.000 t/a und in Deutschland bei 13.500 t/a (narocon/nova-Institut 2016). Das Abfallaufkommen der verbrauchten Mengen wurde als nur geringfügig geringer eingeschätzt.

Eingesetzt werden biologisch abbaubare Kunststoffe weltweit vor allem als Abfallbeutel für die Sammlung von Bioabfällen, in der Landwirtschaft, im Gartenbau, in Textilien, in Verpackungen, in der Automobilbranche oder in kurzlebigen Konsumgütern. Verwendung finden vor allem biologisch abbaubare Stärke, Polylactid (PLA), Polybutylensuccinat (PBS) und Polybutylenadipat-Terephthalat (PBAT) und Polyhydroxyalkanoate (PHA).

Zertifizierungen der biologischen Abbaubarkeit

Recherchen zufolge gibt es im internationalen Kontext unterschiedliche Prüfverfahren, mit welchen biologische Abbaubarkeit beurteilt werden kann. Dabei können Werkstoffe sowie Produkte zertifiziert werden. Wichtig sind in diesem Zusammenhang die Anforderung der biologischen Abbaubarkeit sowie der Desintegration. Biologischer Abbau ist die Umsetzung der Polymere zu Kohlendioxid, Wasser und mineralischen Salzen (Mineralisierung) sowie neuer Biomasse. Bei der Desintegration handelt es sich um eine Zersetzung unter Verlust der Sichtbarkeit im Kompost. Bestimmte Zertifizierungen werden je nach Anwendungsgebiet der Produkte auch gesetzlich gefordert.

Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle in Europa

Biologisch abbaubare Kunststoffe können theoretisch allen Stufen der Abfallhierarchie entsprechend entsorgt werden. Diese bedeutet im Einzelnen:

- ▶ Vermeidung
- ▶ Vorbereitung zur Wiederverwendung
- ▶ Stoffliche Verwertung (werkstoffliches und rohstoffliches Recycling)
- ▶ Stoffliche Verwertung - Kompostierung (industriell / Garten)
- ▶ Stoffliche Verwertung / Sonstige Verwertung - Vergärung
- ▶ Sonstige Verwertung - energetische Verwertung
- ▶ Beseitigung.

Das geeignete Verwertungsverfahren ist stark vom speziellen biologisch abbaubaren Kunststoffprodukt/-typ abhängig.

Die tatsächliche Verwertung von biologisch abbaubaren Kunststoffen in unterschiedlichen Mitgliedsstaaten der EU wurde untersucht. Zu den ausgewählten Ländern zählen neben Deutschland auch Italien, Frankreich, die Niederlande und Schweden. Informationen wurden durch Literaturrecherchen sowie Stakeholderbefragungen zusammengetragen. Der umfassende Vergleich der Konzepte war jedoch nur begrenzt möglich, da nur eingeschränkt statistisch abgesicherte Daten verfügbar waren bzw. eine unsichere Datenlage bestand, oftmals subjektive Aussagen der Experten zum Ausdruck kamen und aufgrund der Komplexität der Abfallverwertungssysteme die Konzepte insgesamt nur begrenzt vergleichbar waren.

In Italien und Frankreich gibt es Regelungen, welche den Einsatz von biologisch abbaubaren Kunststoffen begünstigen. Frankreich fördert den Einsatz bestimmter biologisch abbaubarer Kunststoffprodukte durch die Regelung, dass Obst- und Gemüsebeutel, sowie ab 2020 Einwegcateringgeschirr und Wattestäbchen, gartenkompostierbar und biobasiert sein müssen. In Italien besteht die fördernde Regelung für biologisch abbaubare Kunststoffe darin, dass alle Einweg-Kunststofftüten und -beutel industriell kompostierbar und biobasiert sein müssen. Zusätzlich sind in Italien alle nach EN 13432 zertifizierten Produkte für die industrielle Kompostierung zugelassen. Zwar wird auch in den Niederlanden der Einsatz biologisch abbaubarer Kunststoffe durch finanzielle Anreize gefördert, eine klare Position gegenüber biologisch abbaubaren Kunststoffen gibt es jedoch nicht. Dies gilt ebenfalls für Deutschland und Schweden, wobei hier keine finanziellen Anreize gegeben werden.

Weiter wurde deutlich, dass - mit Ausnahme von Italien - in keinem der ausgewählten Länder ein auf biologisch abbaubare Kunststoffe spezialisiertes Verwertungskonzept vorliegt. So werden biologisch abbaubare Kunststoffe zumeist als Bestandteil der Restmüll- und Störstofffraktion energetisch verwertet oder beseitigt.

Wie sich das Verwertungskonzept für Frankreich weiterentwickeln wird ist zum jetzigen Zeitpunkt unklar. In Italien hingegen sind laut Stakeholderaussagen biologisch abbaubare Kunststoffe bereits erfolgreich in die Verwertungsstrukturen integriert und werden industriell kompostiert (regionale Unterschiede möglich).

Grundlagen der biologischen Abbaubarkeit

Bei Untersuchungen der biologischen Abbaubarkeit ist die Bestimmung der Mineralisierung entscheidend. Unter aeroben Bedingungen wird dazu die Freisetzung von Kohlendioxid oder der Verbrauch von Sauerstoff gemessen, unter anaeroben Bedingungen die Freisetzung von Methan und Kohlendioxid. Die Untersuchungen erfolgen unter standardisierten Bedingungen im Labormaßstab. Da die Abbaubarkeit von den Umgebungsbedingungen abhängt, sind für die verschiedenen Habitate, Kompost, Boden und wässriges Milieu, angepasste und standardisierte Prüfverfahren entwickelt worden. Die für die Zertifizierung von biologisch abbaubaren Kunststoffen geforderten Abbaukriterien, d.h. der Mindestabbaugrad nach einem definierten Zeitraum, ist in unterschiedlichen Prüfprogrammen geregelt. Die auf Basis einer Recherche der entsprechenden Fachliteratur ermittelten Ergebnisse zeigten, dass die Geschwindigkeit des biologischen Abbaus stark von den Umgebungsbedingungen abhängt:

- Unter Bedingungen der „**Industriellen Kompostierbarkeit**“ biologisch abbaubar (58 ± 2 °C, max. 6 Monate):

TPS, PHA, PCL:	ca. 4-6 Wochen
PLA, PBAT, PBST:	ca. 6-9 Wochen
PBS:	ca. 21 Wochen
- Biologisch abbaubar im **Boden** (20-28 °C, max. 2 Jahre):

TPS, PHA, PBSe, PBSeT, PBAT, PCL:	ca. 7-12 Monate
PLA:	kein Abbau nach 1 Jahr
- Biologisch abbaubar in **Süßwasser** (20-25 °C, max. 56 Tage)

TPS, PCL, PHA:	<56 Tage
PBS, PBSe:	ca. 3 Monate
PLA, PBAT:	>1,5 Jahre
- Biologisch abbaubar in **Meerwasser** (30 °C, max. 6 Monate)

PHA, PCL, TPS, PBSe:	<6 Monate
PLA, PBAT:	>1,5 Jahre

Ein biologischer Abbau unter anaeroben Bedingungen wird für eine Zertifizierung bisher nicht gefordert, kann aber optional festgestellt werden. TPS, PCL und PHA sind unter anaeroben Bedingungen abbaubar, PLA nur bei Temperaturen >50 °C. Co-Polyester wie PBS, PBAT und PBST sind nicht anaerob abbaubar.

Der biologische Abbau erfolgt bei Polymeren zweistufig. Der erste und geschwindigkeitslimitierende Schritt ist eine Hydrolyse der Polymerketten in kleinere Fragmente, die oftmals wasserlöslich sind und von den Zellen aufgenommen und weiter abgebaut werden können. Mikroorganismen, die entsprechende Exoenzyme freisetzen, sind ubiquitär verbreitet. Kompost und Boden enthalten eine besonders große Mikroorganismendiversität und hydrolytische Aktivität. Insbesondere Pilze spielen eine wesentliche Rolle bei der aeroben Polymerhydrolyse, während unter anaeroben Bedingungen vorwiegend Bakterien diese Aktivität aufweisen.

Zusätzlich zur biologischen Abbaubarkeit sind für eine Zertifizierung von Biokunststoffen Desintegrationstests erforderlich, wobei die Zersetzung von Biokunststoffen mit definierter Schichtdicke über den Masseverlust unter praxisähnlichen Bedingungen geprüft wird. Bei Untersuchungen des Umweltverhaltens von biologisch abbaubaren Kunststoffen unter realen Bedingungen wurde aus methodischen Gründen die Zersetzung über Masseverlust oder quantitative Bildanalyse bestimmt.

Die Recherche zur Desintegration von Kunststoffen unter naturnahen, realen Bedingungen erfolgte für die Umweltkompartimente Süßwasser, Meerwasser und Boden. Die Desintegration unter realen Bedingungen wird stark von den Umgebungsbedingungen, vor allem Temperatur, Feuchtigkeit und pH-Wert beeinflusst.

Empfehlungen für eine optimale Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland

Basierend auf den Ergebnissen vorangegangener Kapitel wurden

1. Chancen und Herausforderungen unterschiedlicher Entsorgungswege biologisch abbaubarer Kunststoffprodukte in Deutschland gegenübergestellt;
2. der derzeit praktizierte Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen in Deutschland auf ökologische Vorteilhaftigkeit, technische Umsetzbarkeit und Praktikabilität geprüft und Empfehlungen für eine optimale Verwertung unter aktuellen Gegebenheiten ausgesprochen und
3. inspiriert von der Herangehensweise anderer Mitgliedsstaaten der EU, alternative Ansätze zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle geprüft.

Aus ökobilanzieller Sicht ist im Einklang mit der Gesetzgebung stets eine Wiederverwendung oder ein Recycling (werkstofflich, rohstofflich) von Kunststoffen anzustreben. Grundsätzlich ist der biologische Abbau von Kunststoffen erst dann vorteilhaft, wenn durch die Eigenschaft der biologischen Abbaubarkeit ein Zusatznutzen entsteht. Dies ist nur bei bestimmten Produktanwendungen gegeben. Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der produktspezifischen Entsorgungswege wurde der derzeit praktizierte Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen in Deutschland geprüft.

Das Ergebnis sind die folgenden Empfehlungen:

Mulchfolien aus biologisch abbaubaren Kunststoffen

Sofern der biologische Abbau der Mulchfolien im gewünschten Zeitraum eintritt, kann das Belassen entsprechend zertifizierter Folien im Boden in begrenztem Umfang toleriert werden.

Als Alternative wäre zunächst das Recycling anzustreben, was aufgrund der bisweilen hohen Verschmutzung und geringer Mengen biologisch abbaubarer Mulchfolien jedoch mit einem hohen technischen Aufwand verbunden ist und somit derzeit kaum praktiziert wird. Folglich kann als weitere Alternative die energetische Verwertung in Betracht gezogen werden, da das Material in der industriellen Kompostierung keinen zusätzlichen Nutzen birgt.

Bioabfallbeutel aus biologisch abbaubaren Kunststoffen

Biologisch abbaubare Sammelbeutel können die Bioabfallsammlung sinnvoll unterstützen. Zum jetzigen Zeitpunkt führt dies zur industriellen Kompostierung der mit Bioabfall gefüllten Beutel oder auch zur energetischen Verwertung, sofern eine Kunststoffseparation erfolgt.

In jedem Fall sollten Sammlung und Verwertung von Bioabfällen aufeinander abgestimmt sein, so dass Kommunen und Anlagenbetreibern ein Ermessensspielraum hinsichtlich des Beuteleinsatzes offenbleibt. Falls eine Umstellung auf biologisch abbaubare Kunststoffbeutel erwogen wird, sollte

dies Bürgerinnen und Bürgern klar und nachvollziehbar mitgeteilt werden. Es empfiehlt sich dabei, Hinweise auf geeignete Bioabfallsammelbeutel zu geben oder geeignete Beutel bereitzustellen.

Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen

Da für Verpackungen die erweiterte Herstellerverantwortung gilt, muss in Deutschland eine Verwertung entsprechend der Verpackungsverordnung und zukünftig entsprechend des Verpackungsgesetzes erfolgen.

Alternative Konzepte für bioabbaubare Produkte

Das Vorhaben schließt mit drei alternativen Ansätzen im Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen, welche Chancen und Herausforderungen sie mit sich bringen würden und mit welchen Maßnahmen die Einführung verbunden wäre. Diese Ansätze lauten dabei wie folgt:

- ▶ Ansatz I: Verpflichtung für sämtliche leichten Kunststoffabfallbeutel kleiner 50 Mikron: Zertifizierung nach EN 13432 sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen.
- ▶ Ansatz II: Aufnahme von sehr leichten Obst- und Gemüsebeuteln kleiner 15 Mikron in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen.
- ▶ Ansatz III: Aufnahme von Lebensmittelverpackungen in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen.

Ansatz I würde die Sammlung von Bioabfällen fördern und wird grundsätzlich als interessanter Ansatz erachtet. Ansatz II wäre die Umsetzung einer Kaskadennutzung von Obst- und Gemüsebeuteln und wird grundsätzlich als interessanter Ansatz erachtet. Die Herausforderung von Ansatz II besteht jedoch in der Verwechslungsgefahr mit Obst- und Gemüsebeuteln aus konventionellen Kunststoffen und entsprechend vielen Fehlwürfen. Bei Ansatz III wird ein ökologischer Vorteil vermisst, weshalb dieser Ansatz nicht empfohlen wird.

Summary

Background and objective

Due to their excellent properties and flexible processing ability, plastics are an important part of our everyday lives. Bioplastics are considered as a possible alternative to conventional plastics. Currently, they account for approximately 1.3 % of the global plastic production. For the future, a greater increase is expected.

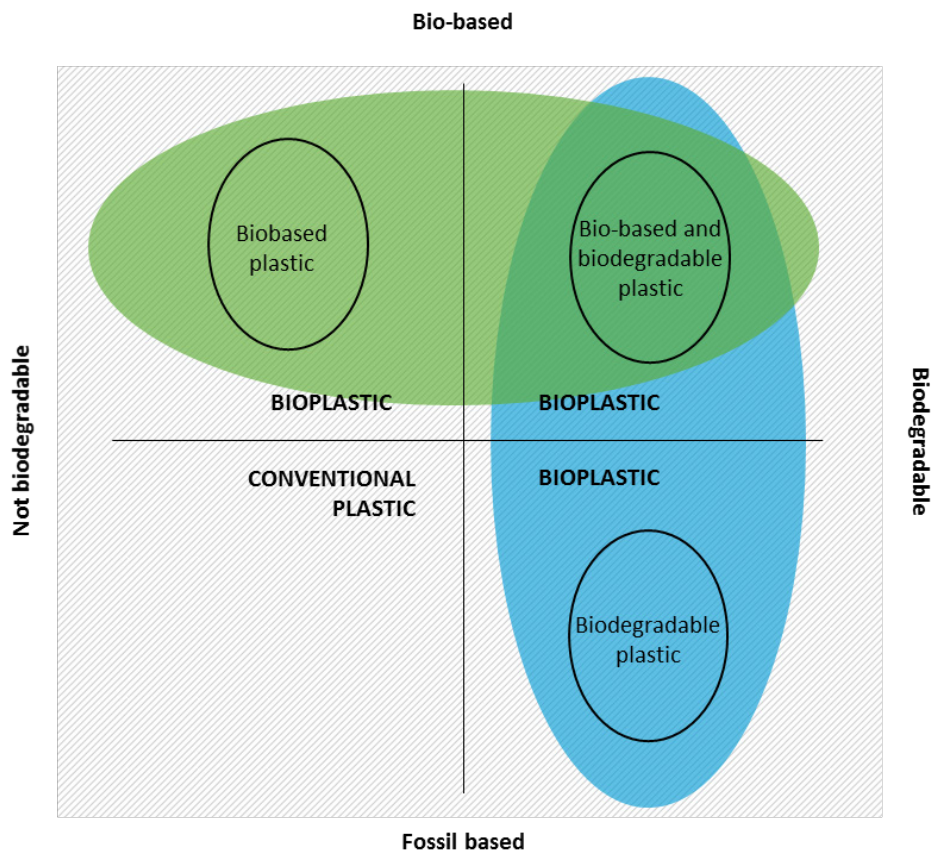
However, there is controversial discussion regarding the use of biodegradable plastics in products and especially the treatment of biodegradable plastics waste. As biodegradability is seen as a chance to fight against long-term littering there also is the risk for increased input of plastics into the environment. Subsequently there are different views across Europe about the ecological benefit of biodegradable plastics and different approaches in dealing with biodegradable plastic waste exist. Against this background, the objective of the project was to identify and compare different strategies and treatment approaches for biodegradable plastics from the European Member States. The focus was on the approaches of Germany, Italy, France, the Netherlands and Sweden.

Furthermore, the degradability of biodegradable plastics in the environment as well as the effects on the environment of different treatment options were analysed and – based on this – recommendations were formulated for the waste treatment of relevant product groups in Germany (mulch films, bio-waste bags and plastic packaging) under current conditions. Inspired by the approaches of other Member States, three alternative approaches for the future dealing with biodegradable plastic and their waste in Germany were also discussed.

Scope of biodegradable plastics and their market and waste generation in Europe and Germany

A plastic is defined as bioplastic if it is partly or entirely made from renewable raw materials, but also if the plastic material meets standards for biodegradability. The latter type of plastics were the focus of this project (see figure below).

Figure: Differentiation of conventional plastics and bioplastics



Source: own figure based on (EUBP o.J.)

Biodegradable plastics can be converted by microorganisms in the presence of oxygen to carbon dioxide, water, mineral salts and biomass or without the presence of oxygen to carbon dioxide, methane, mineral salts and biomass. This property can be determined experimentally.

According to manufacturer information, the global production capacity of biodegradable plastics in 2015 was between 737,000 t/a (IfBB 2016) and 957,000 t/a (nova-Institut/EUBP 2016). The actual consumption was estimated at about 290,000 t/a (narocon/nova-Institut 2016). In Europe around 100,000 t/a, and in Germany 13,500 t/a, have been consumed (narocon/nova-Institut 2016). The amount of wastes from the consumed biodegradable plastics was estimated to be slightly lower.

Worldwide biodegradable plastics are mainly used as bags for the collection of bio-waste, as well as in agriculture, horticulture, textiles, packaging, the automotive industry or in short-lived consumer goods. Above all, biodegradable starch, polylactic (PLA), Polybutylene succinate (PBS), Polybutylenadipatterephthalate (PBAT) and Polyhydroxyalkanoates (PHA) are used.

Certification of biodegradation

According to research results, in an international context, different test methods exist for assessing biodegradability. Materials and products can be certified. Within this context, requirements for the biodegradability and disintegration are of special importance. Biodegradation

means the conversion of organic compounds into carbon dioxide, water and minerals (mineralisation) as well as new biomass. Disintegration refers to a decomposition of the plastic and the loss of its visibility in the final compost. Certain certifications are also required by law, depending on the area of application for the products.

Treatment of biodegradable plastic waste in Europe

Biodegradable plastics can theoretically be treated according to all stages of the waste hierarchy. This means in detail:

- ▶ Prevention
- ▶ Preparing for re-use
- ▶ Recycling (mechanical and feedstock recycling)
- ▶ Recycling – composting (industrial / home)
- ▶ Recycling / other recovery – digestion
- ▶ Other recovery – energy recovery
- ▶ Disposal.

The appropriate treatment option is highly dependent on the specific biodegradable plastic product/type.

The actual treatment of biodegradable plastics in different Member States of the EU has been investigated. In addition to Germany, the selected countries include Italy, France, the Netherlands and Sweden. Information was collected through literature research and stakeholder surveys. However, a comprehensive comparison of the different approaches was only possible to a certain extent due to limited statistical data or the uncertain availability of data., the often-subjective statements of the experts consulted and the complexity of the waste treatment systems.

In Italy and France, regulations exist which favour the use of biodegradable plastics. France promotes the use of certain biodegradable plastic products by regulating that fruit and vegetable bags, as well as from 2020 disposable tableware and cotton sticks, must be home compostable and bio-based. In Italy, disposable plastic bags must be industrially compostable and bio-based. In addition, all products certified according to EN 13432 are approved for industrial composting. Although the use of biodegradable plastics in the Netherlands is promoted by financial incentives, the Netherlands has not taken a clear position on biodegradable plastics. This also applies to Germany and Sweden, where financial incentives do not exist.

It also became clear, with the exception of Italy, none of the selected countries has a special waste management concept for biodegradable plastics. In most cases biodegradable plastic waste is energetically recovered, incinerated or disposed of as part of the residual waste or as impurities.

At present, it is unclear how the waste management for biodegradable plastics in France will evolve. On the other hand, according to stakeholder statements in Italy, biodegradable plastic waste is already successfully integrated into the waste management concept and is industrially composted (regional differences are possible).

Basics of biodegradation

When testing the biodegradation, the determination of mineralisation is crucial. Under aerobic conditions the production of carbon dioxide, or the consumption of oxygen is measured, while under anaerobic conditions the production of methane and carbon dioxide is measured. Tests are carried out under standardised conditions on a laboratory scale. Since the degradability depends on the environmental conditions, adapted and standardised test methods have been developed for the different habitats such as compost, soil and aqueous environment. The degradation criteria required for the certification of biodegradable plastics (minimum degree of degradation after a defined time period) is set out in different test programs. The results obtained by researching the corresponding technical literature showed that the time of biodegradation strongly depends on the environmental conditions:

- Biodegradable under conditions of “**industrial compostability**” (58 ± 2 °C, max. 6 month):

TPS, PHA, PCL:	ca. 4-6 weeks
PLA, PBAT, PBST:	ca. 6-9 weeks
PBS:	ca. 21 weeks
- Biodegradable in **soil** (20-28 °C, max. 2 years):

TPS, PHA, PBSe, PBSeT, PBAT, PCL:	ca. 7-12 month
PLA:	no degradation after 1 year
- Biodegradable in **fresh water** (20-25 °C, max. 56 days)

TPS, PCL, PHA:	<56 days
PBS, PBSA:	ca. 3 month
PLA, PBAT:	>1,5 years
- Biodegradable in **seawater** (30 °C, max. 6 month)

PHA, PCL, TPS, PBSe:	<6 month
PLA, PBAT:	>1,5 years

Biodegradation under anaerobic conditions is not yet required for certification, but can optionally be determined. TPS, PCL and PHA are degradable under anaerobic conditions, PLA only at temperatures >50 °C. Co-polyesters such as PBS, PBAT and PBST are not anaerobically degradable.

Biodegradation occurs in two stages in polymers. The first and limiting step, is the hydrolysis of the polymer chain into smaller fragments, which are often water-soluble and are absorbed by the cells and then further degraded. Microorganisms releasing the corresponding exoenzymes are ubiquitous. Thus, compost and soil contain a particularly large microorganism diversity and hydrolytic activity. In particular, fungi play an essential role in aerobic polymer hydrolysis, while under anaerobic conditions bacteria predominantly play the essential role in aerobic polymer hydrolysis.

Along with biodegradability, disintegration tests are required for the certification of biodegradable plastics, whereas the disintegration of the plastic with a defined layer thickness is tested under practical conditions for a reduction in mass. During the investigations of the environmental behaviour of biodegradable plastics, under real conditions, for methodological reasons disintegration was determined via mass loss or quantitative image analysis.

The research on the disintegration of plastics under natural, real conditions was carried out for the environmental compartments freshwater, seawater and soil. Disintegration under real conditions is strongly influenced by the environmental conditions, especially temperature, humidity and pH-level.

Recommendations for an optimal waste treatment of biodegradable plastics in Germany

Based on preceding chapters the following tasks have been carried out:

1. Identification of opportunities and challenges of different waste treatment options for biodegradable plastic products in Germany.
2. Assessment of the current waste treatment of biodegradable plastic products in Germany on its ecological sustainability, technical feasibility and practicability. As well, the formulation of recommendations in regard to the optimal treatment of waste for biodegradable plastics in Germany under current conditions.
3. Assessment of alternative approaches dealing with biodegradable plastics, inspired by the approaches of other EU Member States.

In regard to life cycle assessment, and in accordance with the legislation, the primary aim is to reuse or recycle (mechanical/feedstock) plastic. In summary, biodegradability of plastics is only advantageous if the characteristics of biodegradability generate an additional benefit. This is only given for certain product applications. Against this background and taking into account the product-specific waste treatment routes, the current treatment of biodegradable plastic waste in Germany was examined.

This resulted in the following recommendations:

Mulch films made of biodegradable plastics

If the certified biodegradable plastic mulch film biodegrades within the desired period of time, leaving the mulch film in soil can be tolerated to a limited extent.

Alternatively, recycling would be desirable. However, this requires high technical efforts due to the potentially high content of dirt and small overall amounts of biodegradable mulch films. Thus, recycling is currently not practiced. As a further alternative energy recovery can be considered, since the material has no added value in industrial composting.

Bio-waste bags made of biodegradable plastics

Biodegradable collection bags can be useful for supporting the collection of bio-waste. At the moment, bags made of biodegradable plastics filled with bio-waste are industrial composted or energetic recovered, provided that a plastic separation takes place.

In any case, the collection and recovery of bio-waste should be coordinated so that municipalities and plant operators have a discretionary leeway regarding the use of the bio-waste bags. If a transition to biodegradable plastic bags is considered, this should clearly and comprehensibly be communicated to the citizens. In this context it is recommended to provide information about suitable bio-waste bags or to make these bags available to the citizens.

Packaging made of biodegradable plastics

As in Germany packaging is subject to extended producer responsibility, waste must be treated in accordance with the German Packaging Ordinance and in the future in accordance with the German Packaging Act.

Alternative approaches for biodegradable plastic products:

At the end of the project three alternative approaches for the future management of biodegradable plastic and their waste in Germany their opportunities and challenges, as well as the

measures required for the introduction of these approaches were discussed. These approaches are as follows:

- ▶ Approach I: Obligation for all light plastic waste bags smaller than 50 microns: Certification according to EN 13432 and production from predominantly renewable raw materials.
- ▶ Approach II: Inclusion of very light fruit and vegetable bags smaller than 15 microns in Annex I of the BioAbfV, if certified according to EN 13432 and production from predominantly renewable raw materials.
- ▶ Approach III: Inclusion of food packaging in Annex I of the BioAbfV, if certified according to EN 13432 and production from predominantly renewable raw materials.

Approach I would encourage the collection of bio-waste and is generally considered as an interesting approach. Approach II would represent the implementation of a cascade use of fruit and vegetable bags and is as well generally considered as an interesting approach. The challenge of approach II, however, is the likelihood of confusion with fruit and vegetable bags made of conventional plastics and correspondingly a lot of misthrows. Approach III has no environmental advantage and therefore this approach is not recommended.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften und flexibler Verarbeitbarkeit sind Kunststoffe ein wichtiger Bestandteil unseres Alltags. Rund 322 Mio. t wurden 2015 weltweit hergestellt, der Großteil davon aus Erdöl.

Als mögliche Alternative zu konventionellen Kunststoffen werden Biokunststoffe betrachtet. Diese können zum Teil oder vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen und/oder biologisch abbaubar sein. Aktuell tragen Biokunststoffe mit einem Anteil von circa 1,3 % zur globalen Kunststoffproduktion bei. Für die Zukunft wird jedoch ein weiterer Anstieg erwartet (Endres/Siebert-Raths 2009) (nova-Institut/EUBP 2017) (IfBB 2016).

Ein steigender Einsatz biologisch abbaubarer Kunststoffe (BAK) wird dabei kontrovers diskutiert. Bei dieser Diskussion steht insbesondere der Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen im Mittelpunkt. Die Diskussion reicht dabei von der Frage nach dem ökologisch verträglichsten bis hin zum technisch sinnvollsten Entsorgungsverfahren. So können nach Aussagen einiger Kompostieranlagenbetreiber biologisch abbaubare Kunststoffe den Kompostiervorgang stören oder die Kompostqualität herabsetzen. Weiter besteht die Befürchtung, dass eine Kennzeichnung von Produkten als „biologisch abbaubar“ zur vermehrten Entsorgung biologisch abbaubarer Produkte in der Umwelt führen kann. Erschwert wird die Diskussion durch die Tatsache, dass sich hinter der Begrifflichkeit „biologisch abbaubare Kunststoffe“ eine Vielzahl verschiedener Kunststofftypen verbirgt und unterschiedliche Produktgruppen unterschiedlichen Regelungen unterliegen. Dies erschwert allgemeingültige Aussagen zur ökologischen Vorteilhaftigkeit, der Praktikabilität oder zur Qualität biologisch abbaubarer Kunststoffe (Detzel et al. 2012; Kreindl 2013).

Trotz kontroverser Diskussionen und den Unsicherheiten in Bezug auf die Vorteilhaftigkeit von biologisch abbaubaren Kunststoffen, begünstigen Länder wie Italien oder Frankreich durch ihre Gesetzgebung den Einsatz ausgewählter biologisch abbaubarer Kunststoffe. Die Gesetzgebung in Deutschland lässt die Kompostierung biologisch abbaubarer Kunststoffprodukte hingegen nur in wenigen Ausnahmefällen zu.

Gegenstand dieses Forschungsvorhabens ist es, unterschiedliche Entsorgungskonzepte für biologisch abbaubare Kunststoffe innerhalb der Europäischen Union (EU) zu identifizieren und gleichzeitig deren Umfang und Effektivität zu bewerten. Dabei werden neben der aktuellen Gesetzeslage in europäischen Ländern und Zertifizierungsstandards vor allem aktuelle Forschungsergebnisse bzw. laufende Forschungsvorhaben zum Abbauverhalten biologisch abbaubarer Kunststoffe miteinbezogen.

Basierend auf diesen Ergebnissen lautet das Ziel des Projektes, Empfehlungen für den optimalen Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen und Kunststoffabfällen in Deutschland auszusprechen. Unter Berücksichtigung der aktuellen Abfallverwertungsstruktur in Deutschland wird der derzeit praktizierte Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen vor dem Hintergrund der ökologischen Sinnhaftigkeit, der technischen Umsetzbarkeit und der Praktikabilität bewertet.

In Kapitel 2 werden relevante Begrifflichkeiten eingeführt sowie voneinander abgegrenzt. Zusätzlich wird ein Überblick über das derzeit verfügbare Spektrum an biologisch abbaubaren Kunststoffen und Produkten gegeben. Darüber hinaus werden Marktvolumen und Abfallaufkommen biologisch abbaubarer Kunststoffe abgeschätzt.

Kapitel 3 enthält einen Überblick über aktuelle gesetzliche Regelungen, Normen und Prüfverfahren für biologisch abbaubare Kunststoffe in den europäischen Ländern.

Kapitel 4 behandelt Grundlagen des biologischen Abbaus mit Einschätzungen zum Abbauverhalten biologisch abbaubarer Kunststoffe in der Umwelt.

In Kapitel 5 werden die Verwertungskonzepte fünf ausgewählter Mitgliedstaaten, darunter Deutschland, Italien, Frankreich, die Niederlande und Schweden, dargestellt, verglichen und bewertet. Basierend auf diesen Ergebnissen wird in Kapitel 5 außerdem die Frage beantwortet, ob der derzeit praktizierte Umgang in Deutschland mit biologisch abbaubaren Kunststoffen technisch und ökologisch sinnvoll und praktikabel ist. Weiterhin werden Empfehlungen für den optimalen Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen und Kunststoffabfällen in Deutschland ausgesprochen. Betrachtet werden dabei vorrangig biologisch abbaubare Kunststoffe, für welche eine bestimmte Form der Verwertung stattfindet. Umweltoffene Anwendungen werden nur begrenzt betrachtet.

2 Spektrum biologisch abbaubarer Kunststoffe

2.1 Abgrenzung biologisch abbaubarer Kunststoffe

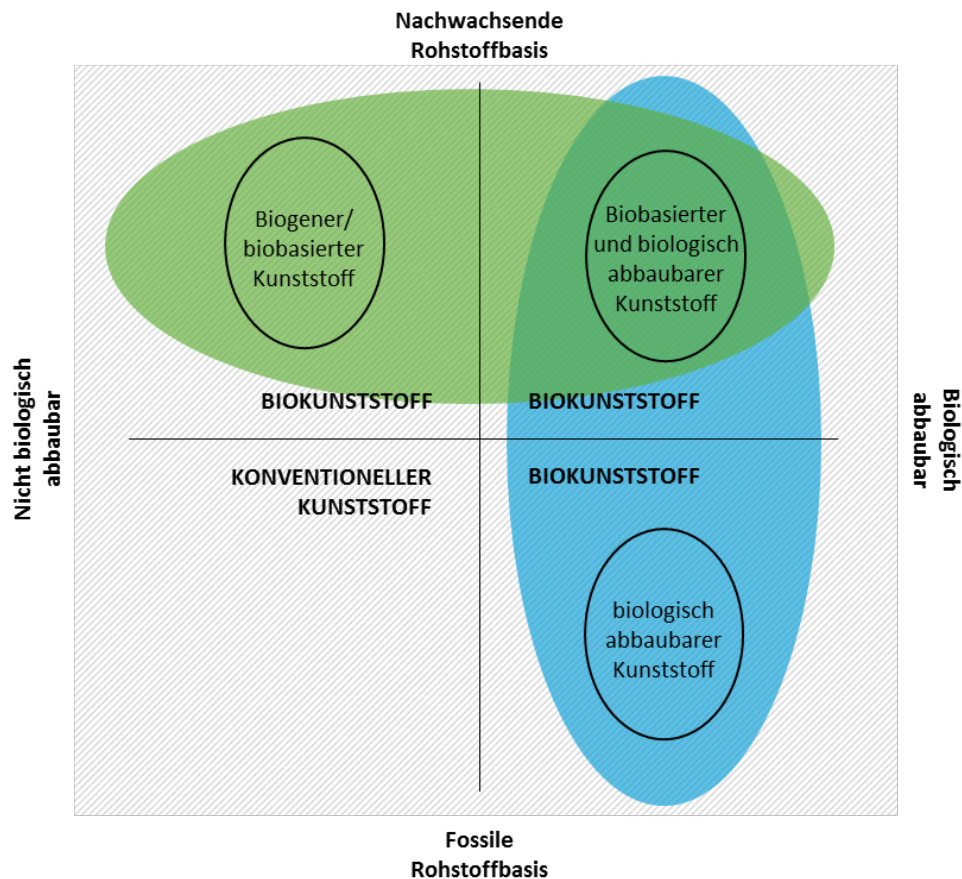
Begriff Biokunststoff

Der Begriff „Biokunststoff“ bezeichnet unterschiedliche Materialien und kann wie folgt ausgelegt werden:

1. Empfehlung der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR):
„Biokunststoffe bestehen zu einem wesentlichen Anteil oder ausschließlich aus nachwachsenden Rohstoffen. Biokunststoffe sind also biobasierte/biogene Kunststoffe.“ (FNR 2013)
2. Empfehlung von European Bioplastics (EUBP) und des Instituts für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (IfBB):
 - sobald ein Kunststoff zum Teil oder vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen besteht (biogener/biobasierter Kunststoff), aber auch,
 - wenn eine biologische Abbaubarkeit (biologisch abbaubarer Kunststoff) gegeben ist (IfBB 2017) (EUBP o.J.).

Im Folgenden bezieht sich der Begriff „Biokunststoff“ auf letztere Definition. Demnach kann ein Biokunststoff biobasiert und gleichzeitig biologisch abbaubar, biobasiert und nicht biologisch abbaubar oder aber erdölbasiert und biologisch abbaubar sein. Diese Einteilung wird in nachfolgender Abbildung verdeutlicht.

Abbildung 1: Abgrenzung konventionelle Kunststoffe und Biokunststoffe



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von (EUBP o.J.)

Biobasierter/ Biogener Kunststoff

Ein biobasierter/biogenes Produkt besteht laut EN 16575¹ vollständig oder teilweise aus Biomasse. Die Feststellung des biobasierten Anteils erfolgt meist über die Ermittlung des biobasierten Kohlenstoffs (Radiocarbonmethode), z. B. gemäß EN 16785-1:2015² oder anderen Verfahren nach CEN/TR 16721:2014³ (EUBP 2015a).

Biologisch abbaubarer Kunststoff

Als biologisch abbaubar wird ein Kunststoff bezeichnet, sofern er durch Mikroorganismen unter Sauerstoffzufuhr in Kohlenstoffdioxid, Wasser, mineralische Salze und Biomasse bzw. ohne Sauerstoffzufuhr in Kohlenstoffdioxid, Methan, mineralische Salze und Biomasse umgewandelt werden kann. Dieser Vorgang hängt stark von dem Umgebungsmilieu ab. Um als biologisch abbaubar zu gelten, muss der Kunststoff/das Kunststoffprodukt entsprechend geprüft und zertifiziert werden (siehe dazu Kapitel 3.2). Kompostierbar sind biologisch abbaubare Produkte, „wenn der

¹ DIN EN 16575:2014-10: Biobasierte Produkte - Terminologie

² DIN EN 16785-1:2016-03: Biobasierte Produkte - Biobasierter Gehalt - Teil 1: Bestimmung des biobasierten Gehalts unter Verwendung der Radiocarbon- und Elementaranalyse

³ DIN CEN/TR 16721:2014-12; DIN SPEC 35802:2014-12: Biobasierte Produkte - Überblick über Verfahren zur Bestimmung des biobasierten Gehalts

vollständige Abbau im Kompost in vergleichsweise kurzer Zeit stattfindet“ (Thielen 2012). Biologisch abbaubarer Kunststoff kann eine biogene Rohstoffbasis oder aber eine erdölbasierte Rohstoffbasis besitzen.

Oxo-fragmentierbarer Kunststoff

Oxo-fragmentierbare Kunststoffe können eine fossile aber auch biologische Rohstoffbasis besitzen. Ihnen werden bestimmte Additive zugesetzt, welche den Zerfallsprozess in der Umwelt durch Licht, Wärme oder mechanische Belastung katalysieren und beschleunigen. Gelegentlich werden diese Kunststoffe folglich als „oxo-abbaubar“ bzw. „oxo-bioabbaubar“ bezeichnet. Der oxo-fragmentierbare Kunststoff wird jedoch nicht vollständig abgebaut, sondern zerfällt in kleine Fragmente. Eine international anerkannte Norm, welche oxo-fragmentierbare Kunststoffe als biologisch abbaubar einstuft, existiert nicht. Folglich zählen oxo-fragmentierbare Kunststoffe nicht in die Kategorie der biologisch abbaubaren Kunststoffe (SFEP 2011) (EUBP 2015b) und werden in diesem Forschungsvorhaben nicht weiter berücksichtigt.

Weitere Unterscheidungen

Als Blend oder Compound wird ein Biokunststoff bezeichnet, welcher aus einer Mischung unterschiedlicher Kunststoffe besteht. Blends können folglich biogen und/oder biologisch abbaubar sein. Sie können aber auch erhebliche Anteile konventioneller Kunststoffe enthalten.

Ein Drop-In-Biokunststoff zeichnet sich durch eine zu konventionellen Kunststoffen identische chemische Struktur aus, unterscheidet sich jedoch hinsichtlich der Rohstoffbasis. Meist sind Drop-In-Biokunststoffe, vorwiegend Bio-PE und Bio-PET, nicht biologisch abbaubar, jedoch werkstofflich rezyklierbar (bioplastics MAGAZINE 2016).

2.2 Aktuelle Marktsituation und Abfallaufkommen biologisch abbaubarer Kunststoffe

Im Fokus dieses Gutachtens stehen biologisch abbaubare Kunststoffe (siehe blaue Hervorhebung in Abbildung 1). In nachfolgenden Kapiteln wird ein kurzer Überblick über deren aktuelle Marktsituation (auf globaler, europäischer und deutscher Ebene) sowie das Abfallaufkommen (auf europäischer und deutscher Ebene) gegeben.

2.2.1 Datenüberblick Biokunststoffe und biologisch abbaubare Kunststoffe

Da die Datenlage zur aktuellen Marktsituation sowie dem Abfallaufkommen von Biokunststoffen im Allgemeinen und biologisch abbaubaren Kunststoffen im Speziellen nicht eindeutig ist, werden zunächst unterschiedliche Datenquellen einschließlich ihrer Herangehensweise zur Datenerhebung beschrieben. Dies erleichtert die Nachvollziehbarkeit und Interpretation der Ergebnisse der nachfolgenden Unterkapitel.

Folgende Institute und Verbände veröffentlichen regelmäßig Marktdaten zu Biokunststoffen bzw. biologisch abbaubaren Kunststoffen:

- ▶ Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (IfBB) der Hochschule Hannover
 - Erhebung von Marktdaten zu Produktionskapazitäten für Biokunststoffe bzw. biologisch abbaubaren Kunststoffen: weltweit gesamt, Verteilung nach Kontinenten sowie nach Einsatzbereichen und Materialtypen
 - Verfügbare Daten bis einschließlich 2016

- Im Bericht verwendete Daten: Jahr 2015 (IfBB 2016)⁴
- nova-Institut unter dem „Bio-based Economy“-Service
 - Erhebung von Marktdaten zu Produktionskapazitäten für Biokunststoffe bzw. biologisch abbaubaren Kunststoffen weltweit gesamt, Verteilung nach Kontinenten sowie nach Einsatzbereichen und Materialtypen
 - Verfügbare Daten bis einschließlich 2017 veröffentlicht durch EUBP
 - Im Bericht verwendete Daten: Jahr 2015 (nova-Institut/EUBP 2016) und 2016 (nova-Institut/EUBP 2017)⁵
- Europäischer Verband European Bioplastics (EUBP)
 - Veröffentlicht Marktdaten zu Produktionskapazitäten für Biokunststoffe bzw. biologisch abbaubaren Kunststoffen weltweit gesamt, Verteilung nach Kontinenten sowie nach Einsatzbereichen und Materialtypen
 - Ab 2015 Veröffentlichung der Daten des nova-Instituts⁶
 - Veröffentlichte Daten bis einschließlich 2017
 - Im Bericht verwendete Daten: Jahr 2016 (nova-Institut/EUBP 2017)
- Beratungsunternehmen narocon zusammen mit nova-Institut
 - Erhebung von Marktdaten zum tatsächlichen Verbrauch biologisch abbaubarer Kunststoffprodukte; Veröffentlichung der Ergebnisse unter der Studie „Consumption of biodegradable and compostable plastic products in Europe“
 - Marktdaten liegen weltweit, für Europa und die einzelnen europäischen Länder vor
 - Im Bericht verwendete Daten: Jahr 2015 (narocon/nova-Institut 2016)

Die für 2016 veröffentlichten Daten des IfBBs unterscheiden sich deutlich von den Daten des nova-Instituts/EUBP. Hauptgrund für diese Abweichungen sind unterschiedliche Erhebungsmethoden der beiden Institute. So schließen das nova-Institut/EUBP beispielsweise erweiterte Produkttypen wie Duroplasten, Polyurethane (thermoplastisch oder duromere Form) oder Celluloseacetat in ihre Erhebungen mit ein (FNR 2013).

Beide Datenquellen stellen, im Gegensatz zu (narocon/nova-Institut 2016), die gesamten weltweiten Produktionskapazitäten dar und spiegeln folglich nicht die tatsächliche Produktion von Biokunststoffen bzw. biologisch abbaubaren Kunststoffen wider. Die aktuelle Studie (narocon/nova-Institut 2016) „Consumption of biodegradable and compostable plastic products in Europe“ stellt hingegen das Marktvolumen durch den tatsächlichen Verbrauch biologisch abbaubarer Kunststoffe im Jahr 2015 dar. Da laut (narocon/nova-Institut 2016) bei der Erhebung von Produktionskapazitäten zum einen Blends doppelt erfasst und zum anderen nur circa 50 %

⁴ Während der Erstellung des Berichts stellen Daten des Jahres 2015 des IfBBs die aktuellste Veröffentlichung dar. Aus diesem Grund wird in vorliegendem Bericht mit den Daten des Jahres 2015 gearbeitet. Zudem zeigt ein Vergleich der Daten von 2015 und 2016 nur sehr geringe Abweichungen der absoluten Zahlen biologisch abbaubarer Kunststoffe.

⁵ Während der Erstellung des Berichts stellen Daten des Jahres 2016 des nova-Instituts/EUBP die aktuellste Veröffentlichung dar. Aus diesem Grund wird in vorliegendem Bericht mit den Daten des Jahres 2016 gearbeitet. Zudem zeigt ein Vergleich der Daten von 2016 und 2017 nur sehr geringe Abweichungen der absoluten Zahlen biologisch abbaubarer Kunststoffe.

⁶ Während der Erstellung des Berichts stellen Daten des Jahres 2016 des nova-Instituts/EUBP die aktuellste Veröffentlichung dar. Aus diesem Grund wird in vorliegendem Bericht mit den Daten des Jahres 2016 gearbeitet. Zudem zeigt ein Vergleich der Daten von 2016 und 2017 nur sehr geringe Abweichungen der absoluten Zahlen biologisch abbaubarer Kunststoffe.

der Kapazitäten tatsächlich genutzt werden, liegen die tatsächlichen Produktions-mengen deutlich unter den Angaben zur Produktionskapazität.

2.2.2 Aktuelle Marktsituation biologisch abbaubarer Kunststoffe weltweit

Im Folgenden wird auf Grundlage der zuvor beschriebenen Datenquellen ein Überblick zur globalen Marktsituation biologisch abbaubarer Kunststoffe gegeben. Informationen zu weltweit marktdominanten biologisch abbaubaren Kunststoffen sowie Haupteinsatzbereichen werden anschließend zur Abschätzung von Marktvolumen sowie Abfallaufkommen in Europa und Deutschland in den Unterkapiteln 2.2.3 sowie 2.2.4 herangezogen. Entsprechende Datenerhebungen hierzu liegen nicht vor.

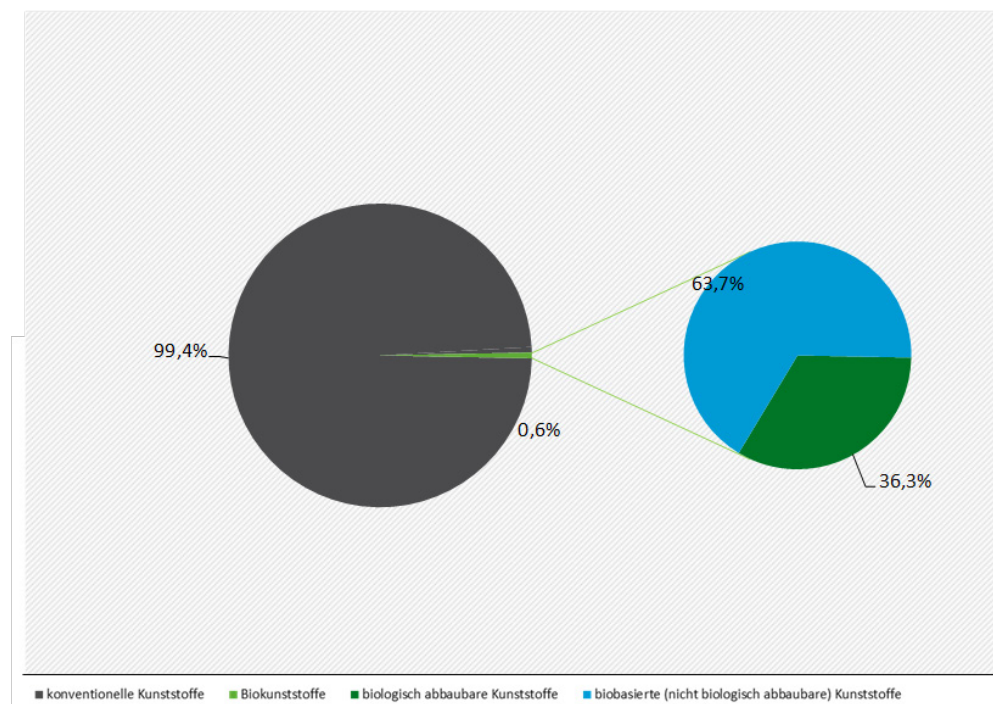
Anteile Biokunststoffe an globaler Kunststoffproduktionskapazität

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen, dass der Anteil von Biokunststoffen an der globalen Kunststoffproduktionskapazität sehr gering ist. Mit rund 99,4 % (IfBB 2016) bzw. 98,7 % (nova-Institut/EUBP 2017) sind konventionelle Kunststoffe stark dominierend.

Innerhalb der Biokunststoffe ist der Anteil biologisch abbaubarer Kunststoffe geringer als der Anteil biobasierter (nicht biologisch abbaubarer) Kunststoffe. Für 2015 berechnet das (IfBB 2016) einen Anteil von 36 % biologisch abbaubarer Kunststoffe, (nova-Institut/EUBP 2016) hingegen 24 % an Biokunststoffen gesamt weltweit. Für 2016 gibt das nova-Institut/EUBP einen Anteil biologisch abbaubarer Kunststoffe von 23 % an den gesamten Produktionskapazitäten der Biokunststoffe an.

Abbildung 2: Prozentaler Anteil biologisch abbaubarer Kunststoffe an Biokunststoffen (IfBB 2016) (weltweit)

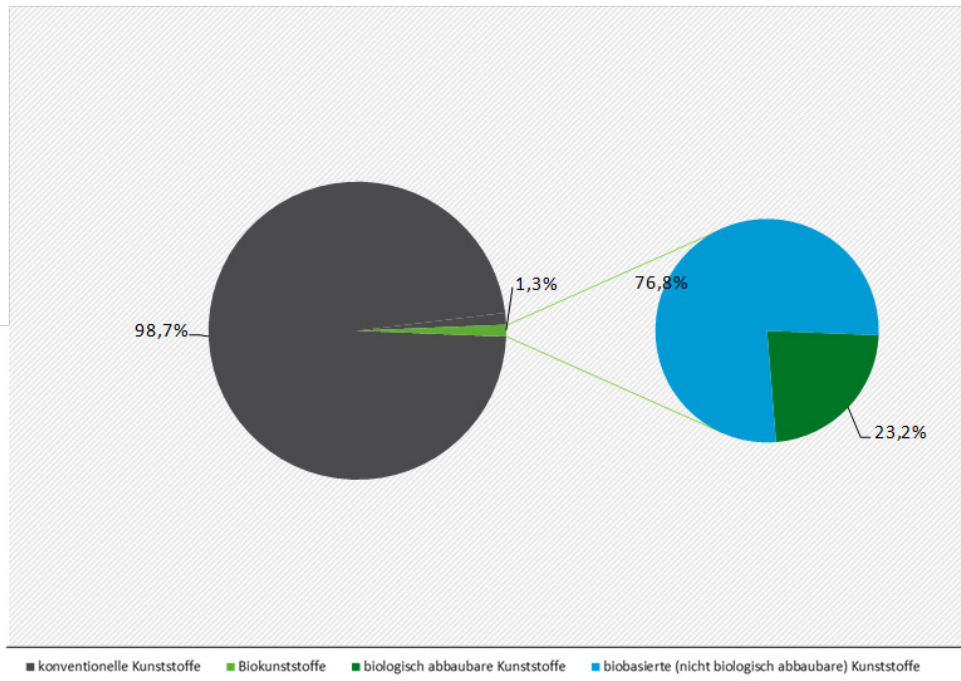
Anteil biologisch abbaubarer Kunststoffe an Biokunststoffen nach IfBB im Jahr 2015



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von (IfBB 2016)

Abbildung 3: Prozentualer Anteil biologisch abbaubarer Kunststoffe an Biokunststoffen (nova-Institut/EUBP 2017) (weltweit)

Anteil biologisch abbaubarer Kunststoffe an Biokunststoffen nach nova-Institut/EUBP im Jahr 2016



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von (nova-Institut/EUBP 2017)

Produktionskapazität und Verbrauch

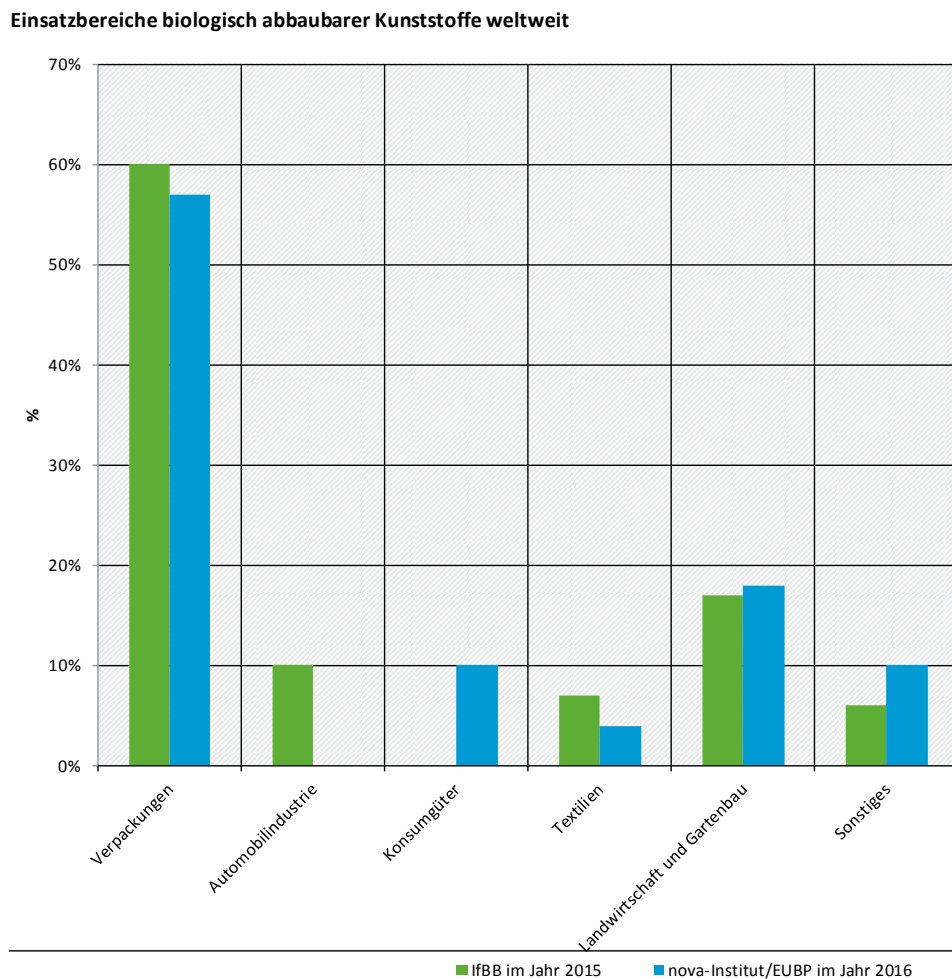
Geht das (IfBB 2016) von einer globalen Produktionskapazität biologisch abbaubarer Kunststoffe von 737.000 t/a im Jahr 2015 aus, gibt das (nova-Institut/EUBP 2016) eine globale Produktionskapazität von 957.000 t/a an (für 2016: 964.000 t/a). Der tatsächliche Verbrauch wird von (narocon/nova-Institut 2016) für das Jahr 2015 auf 290.000 t/a geschätzt (siehe Tabelle 2).

Einsatzbereiche biologisch abbaubarer Kunststoffe

Allgemeingültige Aussagen über Eigenschaften von biologisch abbaubaren Kunststoffen sind aufgrund der Produktvielfalt schwer zu treffen (was jedoch ebenso auf biobasierte und konventionelle Kunststoffe zutrifft) (EUBP 2016). Eingesetzt werden biologisch abbaubare Kunststoffe weltweit vor allem in der Verpackungsbranche⁷. Das Prinzip der biologischen Abbaubarkeit ist ebenfalls für den Gartenbau und in der Landwirtschaft interessant und wird von Herstellern mit der Möglichkeit des Unterpflügens beworben (EUBP 2016) (Thielen 2012) (gesetzliche Regelungen in Deutschland siehe auch Kapitel 3.4.1). Neben der Verpackungsbranche, der Landwirtschaft, dem Gartenbau und der Textilbranche geben das IfBB als Einsatzbereich biologisch abbaubarer Kunststoffe weiter die Automobilindustrie und das nova-Institut/EUBP Konsumgüter an. Die prozentuale Verteilung biologisch abbaubarer Kunststoffe auf ihre Einsatzbereiche wird in Abbildung 4 dargestellt (Schätzung auf Basis von Abbildungen).

⁷ Zu Verpackungen zählt (Consultic 2018) u.a. auch Kunststoffbeutel zum hygienischen Transport von Obst und Gemüse, Kunststofftragetaschen und Bioabfallbeutel

Abbildung 4: Prozentuale Verteilung biologisch abbaubarer Kunststoffe nach Einsatzbereichen auf Basis der weltweiten Produktionskapazitäten BAK⁸



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von (nova-Institut/EUBP 2017) (IfBB 2016)

Marktdominante biologisch abbaubare Kunststoffe

Weltweit finden vor allem biologisch abbaubare Stärke, Polylactid (PLA), Polybutylensuccinat (PBS) und Polybutylenadipat-Terephthalat (PBAT) Verwendung. Ein Überblick zu den Eigenschaften und Marktanteilen dieser biologisch abbaubaren Kunststoffe findet sich in Tabelle 1.

⁸ Weltweite Produktionskapazität nach (IfBB 2016) im Jahr 2015: 737.000 t/a; nach (nova-Institut/EUBP 2017) im Jahr 2016: 964.000 t/a.

Tabelle 1: Marktdominante biologisch abbaubare Kunststoffe

Kunststofftyp	Anteil an Biokunststoffkapazitäten weltweit für 2015 (IfBB 2016) (%) (Grundgesamtheit: 737.000 t/a)	Anteil an Biokunststoffkapazitäten weltweit für 2016 (nova-Institut/ EUBP 2017) (%) (Grundgesamtheit: 964.000 t/a)	Rohstoffbasis	Vorrangiger Einsatzbereich	Produzenten (Auszug)
Biologisch abbaubare Stärke-Blends	9,4 %	10,3 %	Native Stärke (25–100 % biobasiert)	Gartenbau und Landwirtschaft Verpackungen (z.B. Becher) Konsumgüter (z.B. Tragetaschen, Besteck)	Biotec GmbH & Co. KG, KINGFA Science & Technology Co. Ltd., Novamont, Rodenburg Biopolymers, Roquette
Polylactid (PLA) bzw. Polylactid-Blends	10,9 %	5,1 %	Milchsäure aus z.B. Maisstärke (100 % biobasiert)	Verpackungen (z.B. Folien, Flaschen) Textilien Gartenbau und Landwirtschaft Potenzial für langlebige Produkte (Schreibutensilien; Medizinischer und Pharmazeutischer Bereich)	NatureWorks LLC, BASF SE, Corbion, Galactic, JinHui Zhao Long High Technology Co. Ltd, Shanxi Jinhui Energy Group Ltd, Zhejiang Hisun Biomaterials Co., Ltd und Teijin
Polybutylensuccinat (PBS)	10,8 %	2,8 %	1,4-Butandiol und Bernsteinsäure aus z.B. Mais und Zuckerrohr (0-100 % biobasiert)	Verpackungen Gartenbau und Landwirtschaft	Anqing Hexing Chemical, China New Materials, Kingfa, PTT MCC Biochem, Biotech
Polybutylenadipat-Terephthalat (PBAT)		2,5 %	aus 1,4-Butandiol, Terephthalsäure oder Adipinsäure (100 % erdölbasiert - auch zum Teil biobasiert möglich)	Verpackungen (z.B. Folien und Beutel) Gartenbau und Landwirtschaft	BASF, Jinhui Zhaolong
Polyhydroxyalkanoat (PHA)	3,6 %	1,6 %	u.a. aus Stärke und andere Kohlenstofflieferanten durch Fermentierung und unter	Verpackungen Folien- und Spritzgießtypen; Extrusion- und Blasformen	Tianjin GreenBio, Meridian

Kunststofftyp	Anteil an Biokunststoffkapazitäten weltweit für 2015 (IfBB 2016) (%) (Grundgesamtheit: 737.000 t/a)	Anteil an Biokunststoffkapazitäten weltweit für 2016 (nova-Institut/ EUBP 2017) (%) (Grundgesamtheit: 964.000 t/a)	Rohstoffbasis	Vorrangiger Einsatzbereich	Produzenten (Auszug)
			Einwirkung von Mikroorganismen (100 % biobasiert)		

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von (nova-Institut/EUBP 2017) (IfBB 2016) (Thielen 2012) (AÖL 2015)

2.2.3 Produktionskapazität und Verbrauch biologisch abbaubarer Kunststoffe in Europa und Deutschland

Ausgehend von den in Kapitel 2.2.2 beschriebenen globalen Daten werden im Folgenden die Produktionskapazität und der Verbrauch biologisch abbaubarer Kunststoffe für Europa und Deutschland abgeschätzt. Hierfür werden globale Produktionskapazitäten den Angaben zum europäischen sowie deutschen Verbrauch der Studie (narocon/nova-Institut 2016) gegenübergestellt. Tabelle 2 gibt einen Überblick über vorhandene Daten sowie die berechneten Anteile für Europa und Deutschland, deren Ermittlung weiter unten näher erläutert wird:

Tabelle 2: Produktionskapazitäten bzw. reale Abschätzung des Verbrauchs biologisch abbaubarer Kunststoffe in t/a und %

	(IfBB 2016) für 2015	Produktionskapazitäten		Verbrauch (narocon/nova-Institut 2016) für 2015
		(nova-Institut/EUBP 2016) für 2015	(nova-Institut/EUBP 2017) für 2016/9	
Global				
Biologisch abbaubare Kunststoffe weltweit (t/a)	737.000	957.000	964.000	290.000
Europa				
Anteil Biokunststoffproduktion Europa (%)	13	18,3	27,1	34,5
Biologisch abbaubare Kunststoffe Europa - berechnet (t/a)	95.810	175.131	261.244	100.000
Deutschland				
Anteil Deutschland an globaler Kunststoffproduktion (konventionell + Biokunststoffe) (%)		5,75 (Consultic 2016)		5
Biologisch abbaubare Kunststoffe Deutschland - berechnet (t/a)	42.343	54.983	55.385	13.500

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von (nova-Institut/EUBP 2017) (nova-Institut/EUBP 2016) (IfBB 2016) (Consultic 2016) (narocon/nova-Institut 2016)

Europa

Zur Berechnung der europäischen Produktionskapazitäten biologisch abbaubarer Kunststoffe werden

- Angaben zu globalen Produktionskapazitäten von biologisch abbaubaren Kunststoffen und
- Anteile der Produktionskapazität von biologisch abbaubaren Kunststoffen in Europa

des IfBB bzw. des nova-Instituts/EUBP herangezogen. Gibt das (IfBB 2016) für Europa einen Anteil von 13 % an der globalen Biokunststoffproduktion für 2015 an (Gesamt global: 737.000 t/a), errechnet das (nova-Institut/EUBP 2016) einen europäischen Anteil von 18 % in 2015 (gesamt global: 957.000 t/a). Unter Berücksichtigung dieser Anteile ergibt sich für Europa für 2015 eine

⁹ Beinhaltet u.a. PUR (Anteil von 41 % an der weltweiten Produktionskapazität von Biokunststoffen)

Produktionskapazität biologisch abbaubarer Kunststoffe zwischen rund 96.000 t/a und 175.000 t/a (für 2016: 261.244 t/a basierend auf (nova-Institut/EUBP 2017)).

Mit einem tatsächlichen Verbrauch von circa 100.000 t biologisch abbaubarer Kunststoffe in Europa im Jahr 2015 liegen die Angaben von (narocon/nova-Institut 2016) zwischen den beiden berechneten Werten von 96.000 t/a und 175.000 t/a. Die Studie zählt besonders Einkaufstüten, Bioabfallbeutel sowie Verpackungen zu den Haupteinsatzprodukten biologisch abbaubarer Kunststoffe in Europa, und PLA, PLA-Blends sowie Stärke-Copolymere-Blends zu den Kunststoffsorten mit den größten Masseanteilen.

Deutschland

Weder das IfBB noch das nova-Institut/EUBP weisen Produktionskapazitäten für biologisch abbaubare Kunststoffe in Deutschland aus oder geben einen entsprechenden Anteil der deutschen Produktionskapazitäten an den Gesamtproduktionskapazitäten an.

Zur Abschätzung des deutschen Marktes werden deshalb

- Angaben zu globalen Produktionskapazitäten für biologisch abbaubare Kunststoffe und
- Produktionskapazitäten aller Kunststoffe in Deutschland

herangezogen. Neben den Daten von (nova-Institut/EUBP 2017) und (IfBB 2016) werden Informationen der Studie der Consultic GmbH „Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015“ verwendet. Demnach lag die Kunststoffgesamtproduktion in Deutschland 2015 bei 18,5 Mio. t/a und machte damit einen geschätzten Anteil von 5,75 % an der globalen Kunststoffproduktion von 322 Mio. t/a aus (Consultic 2016). Unter Verwendung dieses Anteils wird die Produktion biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland auf zwischen circa 42.000 t/a und 55.000 t/a für 2015 geschätzt (für 2016: 55.385 t/a).

Der Verbrauch biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland wird dabei in der Studie (narocon/nova-Institut 2016) auf 12.000-15.000 t/a im Jahr 2015 beziffert und liegt damit weit unter den Annahmewerten der Produktionskapazität für Deutschland. Bioabfallbeutel sowie PLA-Joghurtbecher (beispielweise von Danone) werden dabei als Haupteinsatzproduktgruppen und, wie auch in Europa, PLA, PLA-Blends und Stärke-Copolymere-Blends als Hauptkunststofftypen angegeben.

2.2.4 Abfallaufkommen biologisch abbaubarer Kunststoffe in Europa und Deutschland

Bislang sind keine Daten zum Abfallaufkommen biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland oder Europa bekannt, weshalb eine Abschätzung vorgenommen wird. Zur Ermittlung des Abfallaufkommens spielen der tatsächliche Verbrauch sowie die Lebensdauer der Produkte eine entscheidende Rolle.

Daten zum tatsächlichen Verbrauch biologisch abbaubarer Kunststoffe und die Verteilung auf einzelne Einsatzbereiche (z.B. Verbrauch von Verpackungen, im Bausektor etc.) sind in (narocon/nova-Institut 2016) für Europa und Deutschland enthalten.

Notwendige Daten zur Lebensdauer bzw. Dauer der Nutzung von Kunststoffen (BAKs miteingeschlossen) wurden für eine Abschätzung des Abfallaufkommens der Studie (Consultic 2016) entnommen. Hier wird der Kunststoffverbrauch einzelner Einsatzbereiche dem Abfallaufkommen in Deutschland in einem Jahr gegenübergestellt. Diese Prozentsätze werden verwendet, um das Abfallaufkommen der im gleichen Jahr verbrauchten biologisch abbaubaren Kunststoffe entsprechend ihrer Einsatzbereiche zu berechnen. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Lebensdauer bzw. Dauer der Nutzung von Kunststoffen innerhalb Europas kaum unterscheidet,

weshalb diese Daten nicht nur für die Abschätzung des Abfallaufkommens in Deutschland, sondern ebenfalls für Europa verwendet werden. Aufgrund unzureichender Datenlage werden Importe und Exporte biologisch abbaubarer Kunststoffe vernachlässigt.

Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen die Vorgehensweise der Berechnung. Spalten A und B beinhalten die Gegenüberstellung von Kunststoffaufkommen und Abfallaufkommen im Jahr 2015 (Consultic 2016). In Spalte C ist der aus A und B errechnete prozentuale Anteil des Kunststoffabfalls am Kunststoffverbrauch dargestellt, welcher zur Berechnung des Abfallaufkommens biologisch abbaubarer Kunststoffe verwendet wird (Spalte E; mit Daten von (narocon/nova-Institut 2016), die in Spalte D stehen).

Abschätzung Abfallaufkommen biologisch abbaubarer Kunststoffe in Europa

Tabelle 3: Berechnung des Abfallaufkommens biologisch abbaubarer Kunststoffe nach Einsatzbereichen in Europa in (t/a)

Einsatzbereich	Auszug ¹⁰ Kunststoffverbrauch gesamt Deutschland im Jahr 2015 (Consultic 2016) (t/a) A	Auszug Kunst- stoffabfallauf- kommen Deutschland im Jahr 2015 (Consultic 2016) (t/a) B	(A x B) Anteil Kunst- stoffabfall an Kunststoffver- brauch im Jahr 2015 (Consultic 2016) (%) C	Verbrauch BAK im Jahr 2015 (narocon/ nova-Institut 2016) (t/a) D	(C x D) Abfallaufkom- men BAK nach (narocon/ nova-Institut 2016) (t/a) E
Verpackung ¹¹	3.250.000	3.015.000	92,8 %	81.500	75.607
Haushalts-wa- ren/ Konsumgü- ter ¹²	460.000	150.000	32,6 %	10.000	3.261
Landwirtschaft und Gartenbau	415.000	260.000	62,7 %	4.000	2.506
Sonstiges (z.B. Textilien)	2.270.000	625.000	27,5 %	4.500	1.239
Gesamt				100.000	82.613

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von (Consultic 2016) (narocon/nova-Institut 2016)

Die Berechnung ergibt dabei ein Abfallaufkommen der im gleichen Jahr verbrauchten biologisch abbaubaren Kunststoffe in Europa von 82.600 t/a im Jahr 2015.

¹⁰ Kunststoffverbrauch für den Bausektor, die Automobilindustrie und Elektroaltgeräte hier nicht abgebildet.

¹¹ Inklusive Bioabfallbeutel und Kunststofftragetaschen

¹² Inklusive Einmal-Cateringartikel

Tabelle 4: Berechnung des Abfallaufkommens biologisch abbaubarer Kunststoffe nach Einsatzbereichen in Deutschland in (t/a)

Einsatzbereich	Auszug ¹³ Kunststoff-ver- brauch gesamt Deutschland im Jahr 2015 (Consultic 2016) (t/a) A	Auszug Kunst- stoff-abfall- aufkommen Deutschland im Jahr 2015 (Consultic 2016) (t/a) B	(A x B) Anteil Kunst- stoff-abfall an Kunststoffver- brauch im Jahr 2015 (Consul- tic 2016) (%) C	Verbrauch BAK im Jahr 2015 (narocon/ nova-Institut 2016) (t/a) D	(C x D) Abfallaufkom- men BAK nach (narocon/ nova-Institut 2016) (t/a) E
Verpackung ¹⁴	3.250.000	3.015.000	92,8 %	10.125	9.393
Haushalts-wa- ren/ Konsumgü- ter ¹⁵	460.000	150.000	32,6 %	2.025	660
Landwirtschaft und Gartenbau	415.000	260.000	62,7 %	675	423
Sonstiges (z.B. Textilien)	2.270.000	625.000	27,5 %	675	186
Gesamt				13.500	10.662

Quelle: Eigene Darstellung nach (Consultic 2016) (narocon/nova-Institut 2016)

Die Berechnung ergibt dabei ein Abfallaufkommen der im gleichen Jahr verbrauchten biologisch abbaubaren Kunststoffe in Deutschland von 10.660 t/a im Jahr 2015 (zum Vergleich: Abfallaufkommen aller Kunststoffe in Deutschland 2015: 5.005.000 t/a).

¹³ Kunststoffverbrauch für den Bausektor, die Automobilindustrie und Elektroaltgeräte hier nicht abgebildet.

¹⁴ Inklusiv Bioabfallbeutel und Kunststofftragetaschen

¹⁵ Inklusiv Einmal-Cateringartikel

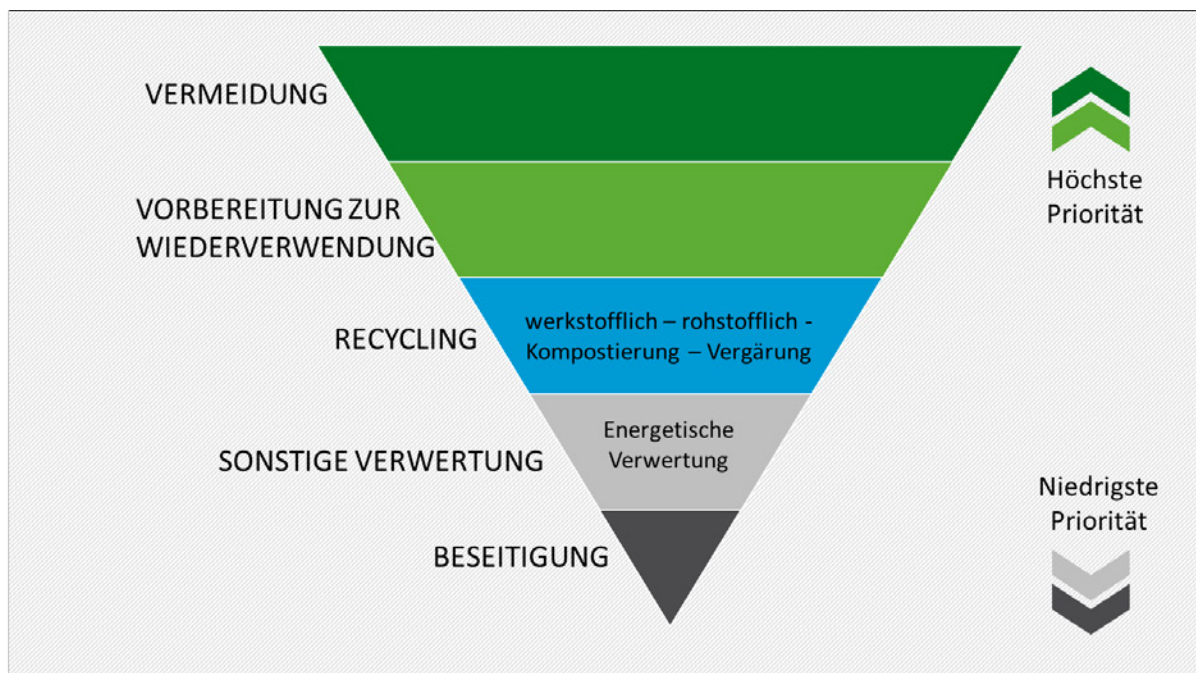
3 Entsorgung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle in Europa

Wie die einzelnen Länder der EU mit Abfällen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen umgehen, ist Gegenstand dieses Kapitels. In einem ersten Schritt werden dazu ein Überblick über mögliche Entsorgungswege gegeben sowie Normen und Standards beschrieben, welche die Eignung biologisch abbaubarer Kunststoffe für einen bestimmten Verwertungsweg zertifizieren. Zudem werden gesetzliche Regelungen bzw. die strategische Ausrichtung zum Thema biologisch abbaubare Kunststoffe identifiziert und unterschiedliche Regelungen innerhalb ausgewählter Mitgliedstaaten der EU dargestellt. Darauf basierend werden die Entsorgungskonzepte fünf ausgewählter EU-MS (Deutschland, Frankreich, Italien, Niederlande, Schweden) vergleichend gegenübergestellt.

3.1 Überblick möglicher Entsorgungswege in Europa

Die Verwertung von Abfällen wird in der EU durch die Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG (AbfRRL) geregelt, welche in den MS in nationales Recht überführt wird. Nach der AbfRRL wird Abfall definiert als „jede[r] Stoff oder Gegenstand, dessen sich sein Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss“ (Artikel 3 (1) AbfRRL). Einen zentralen Bestandteil der AbfRRL stellt die Festlegung der fünfstufigen Abfallhierarchie dar (Artikel 4 (1) AbfRRL) (siehe Abbildung 5). Dabei wird die Abfallvermeidung priorisiert. Ist dies nicht möglich, soll eine Vorbereitung zur Wiederverwertung angestrebt werden. Gemeint ist damit „jedes Verwertungsverfahren der Prüfung, Reinigung oder Reparatur, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile von Erzeugnissen, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere Vorbehandlung wiederverwendet werden können“ (Artikel 3 (16) AbfRRL). Auf dritter Stufe der Abfall-hierarchie wird das Recycling empfohlen. Laut AbfRRL wird von Recycling gesprochen, sobald Abfall zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen aufbereitet wird und damit entweder seinen ursprünglichen Zweck oder einen anderen Zweck erfüllt. Zum Recycling zählt demnach auch die Aufbereitung organischer Materialien. Ausgeschlossen wird auf Stufe des Recyclings jedoch eine energetische Verwertung (Artikel 3 (17) AbfRRL). Dieser wird eine geringere Priorität zugesprochen. Eine Beseitigung von Abfällen sollte vollständig vermieden werden. Nach AbfRRL werden unter Beseitigung Verfahren verstanden, die keine Verwertung darstellen, z.B. Ablagerung, Einleitung in Gewässer/Meere, Verbrennung ohne Energierückgewinnung (Artikel 3 (19) AbfRRL).

Abbildung 5: Abfallhierarchie nach der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG



Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Artikel 4 der AbfRRL 2008/98/EG

Biologisch abbaubare Kunststoffe können theoretisch nach allen Stufen der Abfallhierarchie entsorgt werden. Diese bedeutet im Einzelnen:

► **Vermeidung**

An erster Stelle ist die Materialeinsparung durch Anpassung des Produktdesigns zu prüfen.

► **Vorbereitung zur Wiederverwendung**

Die Wiederverwendung von biologisch abbaubaren Produkten ist unter bestimmten Voraussetzungen (Art der Nutzung; Art des Produktes) möglich.

► **Stoffliche Verwertung - werkstoffliches und rohstoffliches Recycling**

Testverfahren sowie Projekte haben die Durchführbarkeit von werkstofflichem¹⁶ wie auch rohstofflichem¹⁷ Recycling von bestimmten Biokunststoffen und auch einigen biologisch abbaubaren Kunststoffen bewiesen. Eine flächendeckende Umsetzung erfolgt bislang jedoch nicht (Castro-Aguirre et al. 2016; Kreindl 2013).

► **Stoffliche Verwertung - industrielle Kompostierung**

Eine industrielle Kompostierung verläuft grundsätzlich in drei Schritten: der Aufbereitung, der Intensivrotte sowie der Nachrotte. In der Aufbereitung wird das Input-Material zerkleinert und homogenisiert. Daraufhin folgt die Intensivrotte. Unter geregelter Sauerstoff- und Feuchtigkeitzufuhr werden die Bio- und Grünabfälle abgebaut, wodurch Frischekompost entsteht. In der sich anschließenden Nachrotte wird der Frischekompost stabilisiert und zu Fertigungskompost umgewandelt (LUBW 2018a). Es existieren unterschiedliche Regelungen in

¹⁶ Werkstoffliches Recycling: mechanische Aufbereitung von gebrauchten Kunststoffen zu verarbeitungsfähigen Mahlgütern bzw. Rezyklaten. Die chemische Struktur bleibt dabei nahezu unverändert (Arbeitsgemeinschaft Deutsche Kunststoffindustrie 2014).

¹⁷ Rohstoffliches Recycling (bzw. chemisches Recycling): Spaltung der Kunststoffe mittels Wärme oder chemischer Reaktion in kleinere Bruchstücke (Arbeitsgemeinschaft Deutsche Kunststoffindustrie 2014).

Bezug auf die Kompostierung biologisch abbaubarer Kunststoffe in den einzelnen EU-MS (siehe Kapitel 3.3 und 3.4).

► **Stoffliche Verwertung - Gartenkompostierung**

Die Kompostierung biologisch abbaubarer Kunststoffe auf dem eigenen Kompost im Garten ist grundsätzlich möglich, sofern die Produkte als „home compostable“ bzw. „Garten-kompostierbar“ zertifiziert sind und biologisch abbaubare Kunststoffabfälle laut der entsprechenden Abfallsatzung zur Eigenkompostierung erlaubt sind.

► **Stoffliche Verwertung / Sonstige Verwertung - Vergärung**

Durch die Vergärung von Bio- und Grünabfällen entsteht im Gegensatz zur industriellen Kompostierung neben Kompost auch Biogas. Auch hier werden die Abfälle vor der biologischen Behandlung aufbereitet. Der tatsächliche Abbauprozess findet im Gegensatz zur belüfteten Kompostierung unter Sauerstoffausschluss in einem geschlossenen Behälter statt, bei entweder mesophilen (35-40 °C) oder thermophilen (50-55 °C) Temperaturen (Kreindl 2013; EUBP 2015). Dabei bildet sich Biogas, welches für energetische Zwecke genutzt werden kann. Die verbleibenden Gärreste werden meist erst nach einer nachgeschalteten aeroben Behandlung als Dünger verwertet. Das Endprodukt hierbei ist Kompost (Kreindl 2013; LUBW 2018b). Bisher gibt es wenig Erfahrungen mit der Vergärung biologisch abbaubarer Kunststoffe in der tatsächlich praktizierten Abfallwirtschaft.

► **Sonstige Verwertung - Energetische Verwertung**

Die Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle in Mitverbrennungs- oder Müllverbrennungsanlagen entweder in einem Abfallgemisch oder über eine gezielte Herstellung von Ersatzbrennstoffen mit hohem Kunststoffanteil wird bisher großflächig und ohne Einschränkungen praktiziert. Dabei entstehende Energie kann zur Gewinnung von thermischer und elektrischer Energie genutzt werden (Kreindl 2013).

► **Beseitigung**

Anhang 1 der AbfRRL enthält eine nicht abschließende Liste von Beseitigungsverfahren für Abfälle, welche jedoch nach dem Prinzip der hochwertigen Verwertung nicht beschränkt werden sollten. Trotzdem werden in vielen EU-MS große Mengen an Abfällen auf diese Weise entsorgt (darunter auch Anteile biologisch abbaubarer Kunststoffe).

Die Bewertung zur ökologischen Verträglichkeit sowie zur Effektivität der unterschiedlichen Entsorgungswege ist Bestandteil von Kapitel 5.

3.2 Aktuelle Normen und Prüfverfahren

Das geeignete Entsorgungsverfahren ist stark vom speziellen biologisch abbaubaren Kunststoffprodukt abhängig. Zertifizierungsverfahren stellen diese Eignung fest. Die dafür zugrunde gelegten Normen und wichtigsten Anforderungen werden in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

Dabei wird unterschieden zwischen

- Norm: „beschreibt ein anerkanntes und dokumentiertes Regelwerk, nach welchem vorgegangen wird, um Aussagen und Schlussfolgerungen über z.B. das Verhalten von BAW Produkten zu erlangen“ (ZHAW 2016).
- Zertifizierung: „beschreibt das Vorgehen zum Nachweis und zur Dokumentation einer angestrebten oder einzuhaltenden Norm“ (ZHAW 2016).

- Prüfverfahren: beschreibt Vorgehen, Analyseparameter und Bedingungen sowie zu erfassende Messparameter zur Bestimmung der in der Norm festgelegten Aussagen und Schlussfolgerungen“ (ZHAW 2016). Prüfverfahren unterliegen selbst auch Normen bzw. Prüfgrundlagen, nach denen die Prüfung durchzuführen ist (z.B. unter EN 13432 stellen EN ISO 14855-1; EN 14046 Präzisierungen der Prüfverfahren des biologischen Abbaus dar). Eine Auflistung der Prüfverfahren findet sich in den einzelnen Zertifizierungsprogrammen wieder (über Hyperlinks der Labels zu erreichen).

Die Prüfung der Einhaltung der Normen wird dabei von Zertifizierungsgesellschaften durchgeführt. Werden alle Vorgaben erfüllt, dürfen die Produkte einen entsprechenden Nachweis führen (Label). Zu den anerkannten europäischen Zertifizierungsgesellschaften, welche Normen und Standards zum Abbauverhalten biologisch abbaubarer Kunststoffe prüfen, gehören

- DIN CERTCO - Deutschland
 - AfOR - Vereintes Königreich; kooperiert mit DIN CERTCO
 - Keurmerkinstytut - Niederlande; kooperiert mit DIN CERTCO bei Vergabe des Keimlingslogos (Keimlingslogo entwickelt von EUBP zur Zertifizierung EN 13432)
 - COBRO - Polen; kooperiert mit DIN CERTCO bei Vergabe des Keimlingslogos (Keimlingslogo entwickelt von EUBP zur Zertifizierung EN 13432)
- Vinçotte - Belgien, seit Dezember 2017 integriert in TÜV Austria Group (OK Compost Labels)
- Certiquality/Italian Composting Association CIC - Italien.

Weiter gibt es nationale bzw. lokale Institute oder Gesellschaften, welche Zertifizierungen anbieten bzw. eigene Standards entwickeln (z.B.: The Swedish Research Institut RISE).

Bisher kann die biologische Abbaubarkeit für folgende Verfahren bzw. Umgebungsbedingungen zertifiziert werden: Industrielle Kompostierung, Gartenkompostierung, biologisch abbaubar bei Raumtemperatur, im Boden, in mariner Umwelt (ohne klare pass/fail-Kriterien) und natürlicher Süßwasserumgebung.

Zertifiziert werden können Werkstoffe sowie Produkte. Um eine entsprechende Zertifizierung zu erhalten, müssen alle Anforderungen der entsprechenden Zertifizierungsprogramme und zugehörigen Normen erfüllt werden. Wichtig sind in diesem Zusammenhang die Anforderung der biologischen Abbaubarkeit sowie der Desintegration. Biologischer Abbau bedeutet dabei die Umsetzung der organischen Verbindungen zu Kohlendioxid, Wasser und mineralischer Salze (Mineralisierung) sowie neuer Biomasse. Bei der Desintegration handelt es sich um eine Zersetzung der Kunststoffe¹⁸, die bei den quantitativen Desintegrationsprüfungen über den Masseverlust des Kunststoffs bestimmt wird. Während bei den biologischen Abbauprüfungen die grundsätzliche und vollständige biologische Abbaubarkeit eines Materials unter kontrollierten Laborbedingungen ermittelt wird, erfolgt die Desintegrationsprüfung im halbtechnischen bis großtechnischen Maßstab unter realitätsnahen Bedingungen.

¹⁸ So werden die Begriffe „Desintegration“ und „Zersetzung“ oftmals synonym verwendet.

Tabelle 5: Normen und Prüfverfahren zum Abbauverhalten biologisch abbaubarer Kunststoffe

Bezeichnung	Norm/ Prüfverfahren	Zertifizierungsgesellschaft	Label	Verwendung (Auswahl)	Wichtigste Anforderungen des Zertifizierungsprogramms ¹⁹
Biologisch abbaubar	SPCR 141 - Certification rules for Classification for treatment of polymeric waste	RISE - Research Institutes Sweden		Schweden	• Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) • Vollständige biologische Abbaubarkeit; Anforderung: 90 % Abbau (bezogen auf Referenzsubstrat) innerhalb max. 6 Monate
Industriell kompostierbar	EN 13432 - Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau - Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen	DIN CERTCO (Kooperation mit A-for, COBRO, Keurmerk-instituut) Vinçotte bzw. TÜV Austria		Europäische Union, Schweiz, Norwegen, Serbien, Bosnien und Herzegowina, Moldawien, Mazedonien, Liechtenstein, Monaco, China, Thailand, Sri Lanka, Israel, Indien, Neuseeland...	• Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) • Vollständige biologische Abbaubarkeit; Anforderung: 90 % Abbau (absolut oder bezogen auf Referenzsubstrat) innerhalb max. 6 Monate (bei 58 ± 2 °C) • Zersetzung im Bioabfall nach höchstens 3 Monate (Desintegrationstest); Anforderung: max. 10 % Restpartikel des Prüfmaterials > 2 mm • Ökotoxizitätstest mit Pflanzen
		DIN CERTCO		Deutschland, UK, China, Malaysia, Polen, Italien, Dänemark, USA, Hong Kong, Schweden, Taiwan, Niederlande, Neuseeland, Irland, Spanien, Rumänien, Finnland, Bosnien und Herzegowina	

¹⁹ Zertifizierungsprogramm der einzelnen Zertifizierungsgesellschaften definiert Anforderungen auf Basis der in Spalte 2 genannten Norm(en) / Prüfverfahren

Bezeichnung	Norm/ Prüfverfahren	Zertifizierungsgesellschaft	Label	Verwendung (Auswahl)	Wichtigste Anforderungen des Zertifizierungsprogramms ¹⁹
		Italian Composting Association (CIC) together with Certiquality		Italien, Deutschland	• Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) • Vollständige biologische Abbaubarkeit; Anforderung: 90 % Abbau (bezogen auf Referenzsubstrat) innerhalb max. 6 Monate • Zersetzung im Bioabfall innerhalb höchstens 3 Monate oder 6 Monaten (abhängig von gewählter Methode) (Desintegrationstest); Anforderung: max. 10 % Restpartikel des Prüfmateri als > 2 mm • Ökotoxizitätstest mit Pflanzen • Funktionalität
		Vinçotte bzw. TÜV Austria		Europa, China, Korea, Taiwan, Malaysia, Israel, Japan, USA, Hong Kong, Bosnien, Herzegowina, Australien, Schweiz, Norwegen	
	SPCR 141 - Certification rules for Classification for treatment of polymeric waste	RISE - Research Institutes Sweden		Schweden	
Gartenkompostierbar	AS 5810 - Biodegradable plastics—Biodegradable plastics suitable for home composting	DIN CERTCO		Deutschland, China, Portugal	• Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) • Vollständige biologische Abbaubarkeit; Anforderung: 90 %

Bezeichnung	Norm/ Prüfverfahren	Zertifizierungsgesellschaft	Label	Verwendung (Auswahl)	Wichtigste Anforderungen des Zertifizierungsprogramms ¹⁹
Small Scale Composting	NF T 51-800 - Plastics — Specifications for plastics suitable for home composting				Abbau (absolut oder bezogen auf Referenzsubstrat) innerhalb max. 12 Monaten unter 30 °C • Zersetzung im Bioabfall nach höchstens 180 Tagen (Desintegrationstest); Anforderung: max. 10 % Restpartikel des Prüfmateri als > 2 mm bei 25 ± 5 °C • Ökotoxizitätstest mit Pflanzen • Regenwurmtest
	Modifiziert / Prüfnorm: EN 13432 - Verpackung - Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau - Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen EN 14995 - Kunststoffe - Bewertung der Kompostierbarkeit - Prüfschema und Spezifikation	Vinçotte bzw. TÜV Austria		Deutschland, Australien, USA, Frankreich, Italien, China, Japan, Thailand, UK, Österreich, Belgien, Sri Lanka, Israel, Luxemburg, Spanien, Niederlande, Rumänien, Schweiz, Bosnien und Herzegowina, Griechenland, Polen, Finnland	• Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) • Vollständige biologische Abbaubarkeit; Anforderung: 90 % Abbau (absolut oder bezogen auf Referenzsubstrat) innerhalb max. 12 Monaten unter zwischen 20 und 30 °C • Zersetzung im Bioabfall nach höchstens 6 Monaten (Desintegrationstest); Anforderung: max. 10% Restpartikel des Prüfmateri als > 2 mm zwischen 20 und 30 °C • Ökotoxizitätstest mit Pflanzen
	SPCR 141 - Certification rules for Classification for treatment of polymeric waste	RISE - Research Institutes Sweden		Schweden	• Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) • Vollständige biologische Abbaubarkeit; Anforderung: 90 %

Bezeichnung	Norm/ Prüfverfahren	Zertifizierungsgesellschaft	Label	Verwendung (Auswahl)	Wichtigste Anforderungen des Zertifizierungsprogramms ¹⁹
					Abbau (bezogen auf Referenzsubstrat) innerhalb max. 6 Monaten • Zersetzung im Bioabfall nach höchstens 6 Monaten (Desintegrationstest); Anforderung: max. 10 % Restpartikel des Prüfmaterials > 2 mm • Ökotoxizitätstest mit Pflanzen • Funktionalität
Biologisch abbaubare Kunststoffe bei Raumtemperatur - Anforderungen und Prüfverfahren	UNI 11183: 2006: Biologisch abbaubare Kunststoffe bei Raumtemperatur - Anforderungen und Prüfverfahren		<u>Weitere Informationen</u>	Italien	• Aerober biologischer Abbau bei Raumtemperatur zwischen 21 °C und 28 °C
Zertifizierungsprogramm für den Kompostierungsprozess unbedenkliche Zusatzstoffe	EN 13432 - Verpackung - Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau - Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen	DIN CERTCO		Deutschland, Niederlande, China, Spanien, Österreich	• Entsprechend den Anforderungen der DIN EN 13432: Nachweis der Unbedenklichkeit für den Kompostierungsprozess
Biologisch abbaubar im Boden	DIN SPEC 1165 - Kunststoffe - Bioabbaubare Kunststoffe in oder auf Böden - Verwertung, Entsorgung und verwandte Umweltthemen	Vinçotte bzw. TÜV Austria		Deutschland, Frankreich, USA, Thailand, Italien, Japan, China, Österreich, Belgien, Niederlande, Norwegen, Portugal	• Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) • Vollständige biologische Abbaubarkeit; Anforderung: 90 % Abbau (absolut oder bezogen auf Referenzsubstrat) innerhalb max. 2 Jahre (bei aquatischen Test bei 25 ± 5 °C)

Bezeichnung	Norm/ Prüfverfahren	Zertifizierungsgesellschaft	Label	Verwendung (Auswahl)	Wichtigste Anforderungen des Zertifizierungsprogramms ¹⁹
					- Keine Voraussetzungen für Desintegration - Ökotoxizitätstest mit Pflanzen
	UNI 11462 - Biologisch abbaubare Kunststoffe im Boden - Typen, Anforderungen und Prüfverfahren (Testmethode)			Italien	
Biologisch abbaubar im Boden (für Mulchprodukte)	EN 17033 - Biologisch abbaubare Mulchfolien für den Einsatz in Landwirtschaft und Gartenbau - Anforderungen und Prüfverfahren	DIN CERTCO			- Vollständige biologische Abbaubarkeit; Anforderung: 90 % Abbau nach 24 Monaten bei 20 - 28 °C (± 2°C) (möglichst 25 °C) - Keine Voraussetzungen für Desintegration - Ökotoxizitätstest - Chemische Zusammensetzung - Einhaltung dimensionaler, mechanischer und optischer Eigenschaften
Biologisch abbaubar im Boden	ASTM D5988 - Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in Soil (Testmethode)				
Biologisch abbaubar in der marinen Umwelt	ASTM D7081 - Standard Specification for Non-Floating Biodegradable Plastics in the Marine Environment	Vinçotte bzw. TÜV Austria		Japan, USA, Deutschland, Österreich	- Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung) - Vollständige biologische Abbaubarkeit; Anforderung: 90%

Bezeichnung	Norm/ Prüfverfahren	Zertifizierungsgesellschaft	Label	Verwendung (Auswahl)	Wichtigste Anforderungen des Zertifizierungsprogramms ¹⁹
	Adapted for degradation in seawater (pelagic zone only) (Zurückgezogen 2014)				Abbau (absolut oder bezogen auf Referenzsubstrat) nach 6 Monaten. • Desintegrations-Anforderungen unter TS-OK-15 • Ökotoxizitätstest mit Pflanzen mit 3 Monaten Inkubation des Testmaterials vor Testdurchführung
	Prüfmethoden zum biologischen Abbau ohne Pass/Fail-Kriterien u.a. ASTM D6691- Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in the Marine Environment by a Defined Microbial Consortium or Natural Sea Water Inoculum ASTM D7473 - Standard Test Method for Weight Attrition of Plastic Materials in the Marine Environment by Open System Aquarium Incubations OECD 306 - Biodegradability in sea water ISO 16221 - Water quality - Guidance for determination of biodegradability in the marine environment				
Biologisch abbaubar in natürlicher Süßwasserumgebung	Angepasst für den Abbau in Süßwasser:	Vinçotte bzw. TÜV Austria		Italien, USA, Australien, Deutschland	• Einhaltung geforderter max. Konzentrationen (chemische Charakterisierung)

Bezeichnung	Norm/ Prüfverfahren	Zertifizierungsge- sellschaft	Label	Verwendung (Auswahl)	Wichtigste Anforderungen des Zertifi- zierungsprogramms ¹⁹
	EN 13432 - Packaging - Re- quirements for packaging re- coverable through compost- ing and biodegradation - Test scheme and evaluation crite- ria for the final acceptance of packaging" EN 14995 - Plastics — Evalua- tion of compostability — Testscheme and specifica- tions" "Adapted for degradation in fresh water"				• Vollständige biologische Ab- baubarkeit; Anforderung: 90 % Abbau (absolut oder bezogen auf Referenzsubstrat) nach 56 Tagen zwischen 20 und 25 °C
Entsorgbarkeit in Klär- anlagen	DIN EN 14987 - Kunststoffe - Bewertung der Entsorgbarkeit in Kläranlagen - Prüfplan für Endabnahme und Spezifikati- onen				

Quelle: siehe Hyperlinks der Labels

3.3 Strategien und gesetzliche Regelungen innerhalb der EU

Gegenstand dieses Kapitels ist es, zum einen die strategische Ausrichtung der EU zum Thema biologisch abbaubare Kunststoffe zu identifizieren und zum anderen unterschiedliche gesetzliche Grundlagen auf EU-Ebene und in ausgewählten MS herauszuarbeiten. Es wurden Länder betrachtet, welche bereits in Kapitel 3.2 durch die Einführung oder Verwendung von Zertifizierungsstandards zur biologischen Abbaubarkeit von Kunststoffen aufgeführt sind. Abgeglichen und gegebenenfalls ergänzt wurde diese Auswahl mit Ländern, deren Gesetzgebung in (narocon/nova-Institut 2016) dargestellt ist und in denen auf biologisch abbaubare Kunststoffe Bezug genommen wird. Relevante Gesetze zu biologisch abbaubaren Kunststoffen werden dabei tabellarisch aufgelistet und deren Inhalte kurz erläutert. Die Ergebnisse einer ergänzenden Literaturrecherche (Quellen) werden ebenfalls aufgeführt.

Basierend auf diesen Ergebnissen werden anschließend neben Deutschland weitere vier MS ausgewählt, um deren Entsorgungskonzepte im nächsten Arbeitsschritt detaillierter zu untersuchen und vergleichend gegenüberzustellen.

a) **Umweltpolitische Strategien der Europäischen Union**

Mit unterschiedlichen Strategien wie „Europa 2020“ (2010) oder dem „Circular Economy Package“ (2015) fördert die EU nachhaltiges und grünes Wirtschaften.

Europa 2020 Strategie:

Die Strategie Europa 2020 dient als Referenzrahmen für die Förderung von Beschäftigung und intelligentem und nachhaltigem Wachstum. Unter diesem Aspekt sollen Treibhausgas-emissionen gesenkt und gleichzeitig der Anteil an erneuerbaren Energien sowie die Energie-effizienz erhöht werden (Europäische Kommission o.J.). Das 7. Allgemeine Umweltaktions-programm der Union listet dabei neun Zielvorgaben bzw. Maßnahmen, welche notwendig sind, um die Europa 2020 Strategie auf Umweltebene zu erreichen (Europäische Kommission 2013).

Circular Economy Package

Das Circular Economy Package verfolgt das Ziel, den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft in Europa zu fördern. Die darin beinhalteten Gesetzesvorschläge zielen unter anderem darauf ab, Abfallwirtschaft in Übereinstimmung mit der Abfallhierarchie zu betreiben und Material-kreisläufe auf allen anderen Stufen der Wertschöpfungskette zu schließen. Ein Kernthema ist dabei Kunststoff, welches in der ‚Plastic Strategy‘ separat aufgearbeitet wird (Europäische Kommission 2017a).

Plastic Strategy 2018

In der „europäischen Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft“ werden biologisch abbaubare Kunststoffe als Chance aber auch als Risiko gesehen, der aktuellen Kunststoff-problematik (Vermüllung; Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen; CO₂-Ausstoß) entgegen-zuwirken. Auch wird das Risiko von steigenden Marktanteilen biologisch abbaubarer Kunststoffe adressiert. Deshalb wird eine klare Etikettierung und Kennzeichnungen sowie angemessene Abfallsammlung und -behandlung empfohlen. „Andererseits können biologisch abbaubare Kunststoffe mit Sicherheit bei einigen Anwendungen eine Rolle spielen, und die innovativen Anstrengungen in diesem Bereich werden begrüßt“. Die Verwendung von oxo-fragmentierbaren Kunststoffen will die Kommission beschränken (Europäische Kommission 2018).

Eine gesetzliche Regelung zum Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen gibt es auf EU Ebene nicht. So werden diese auch gesetzlich nicht gegenüber konventionellen Kunststoffen bevorzugt. Dennoch gibt es zwei EU-weite Richtlinien, deren Ziele in einigen EU-MS mit der Förderung von biologisch abbaubaren Kunststoffen verwirklicht werden sollen.

b) Bestehende Richtlinien der Europäischen Union hinsichtlich Bioabfälle und Kunststofftragetaschen

Richtlinie 2008/98/EG - Abfallrahmenrichtlinie

Ein zentrales Ziel der Abfallrahmenrichtlinie ist wie folgt formuliert: „Es ist wichtig, im Einklang mit der Abfallhierarchie und zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen, die durch die Abfallbeseitigung auf Abfalldeponien entstehen, die getrennte Sammlung und die ordnungsgemäße Behandlung von Bioabfällen zu fördern, um umweltverträgliche Komposte und andere Materialien aus Bioabfällen zu erzeugen“ (AbfRRL Erwägungsgrund (35); sowie Artikel 22).

Richtlinie (EU) 2015/720 - Verpackungsrichtlinie zur Verringerung des Verbrauchs von leichten Kunststofftragetaschen

Kunststofftragetaschen führen laut der EU zu einer starken Vermüllung der Umwelt und bedingen eine ineffiziente Ressourcennutzung. Aus diesem Grund legt die EU Vorgaben für die dauerhafte Verringerung leichter Kunststofftragetaschen (unter 50 Mikrometer) fest. Diese beinhalten, dass alle MS

- ▶ Maßnahmen ergreifen, „dass der jährliche Verbrauch an leichten Kunststofftragetaschen pro Person bis 31. Dezember 2019 höchstens 90 und bis 31. Dezember 2025 höchstens 40 beträgt (oder gleichwertige Zielvorgaben in Gewicht ausgedrückt nicht überschreitet)“ UND/ODER
- ▶ „der Erlass von Instrumenten, durch die sichergestellt wird, dass leichte Kunststofftragetaschen in Verkaufsstellen von Waren oder Produkten spätestens bis 31. Dezember 2018 nicht unentgeltlich zur Verfügung gestellt werden, sofern keine gleichermaßen wirksamen Instrumente eingesetzt werden“ ((EU) 2015/720).

Ein weiteres Ziel ist die unionsweite Anerkennung von Etiketten oder Kennzeichnungen für biologisch abbaubare und kompostierbare Kunststofftragetaschen sowie die richtige Verwendung des Begriffs „biologisch abbaubar“.

Einige MS haben im Zusammenhang mit der Richtlinie (EU) 2015/720 Sonderregelungen für biologisch abbaubare Kunststofftüten/beutel erlassen. Auch diese sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

c) Regelungen in EU-Mitgliedstaaten zu biologisch abbaubaren Kunststoffen

Nur in wenigen europäischen Ländern begünstigt die Gesetzgebung den Einsatz von biologisch abbaubaren Kunststoffen. Zu diesen Ländern zählen aktuell Belgien, Frankreich, Italien, Niederlande und Rumänien. Weitere Entwicklungen in diese Richtung gibt es beispielsweise in Spanien oder Österreich. Oft werden durch die Gesetze oder die Gebührenstruktur nur einzelne Produktgruppen gefördert bzw. bevorzugt (z.B. Einweg-Kunststofftüten; Bioabfallbeutel). Ein Überblick über Regelungen zu biologisch abbaubaren Kunststoffen in ausgewählten europäischen Ländern wird in nachfolgender Tabelle gegeben.

Tabelle 6: Regelungen zu biologisch abbaubaren Kunststoffen in ausgewählten europäischen Ländern

Land	Relevante Regelung	Erklärung	Quelle
Belgien	Pic-nic tax 2007	Steuer auf Einweg-Kunststofftüten (3 €/kg) Ausnahme: kompostierbare Kunststofftüten	(narocon/nova-Institut 2016)
	Moniteur Belge 11.08.2017	Wallonien: Verbot von Einweg-Kunststofftragetaschen, Ausnahme bis 1. März 2020: 40 % biobasierter Anteil und Gartenkompostierbarkeit für Obst- und Gemüsebeutel	Moniteur Belge Artikel 2
	Moniteur Belge 27.09.2017	Brüssel: Verbot von Einweg-Kunststofftüten Ausnahme bis 29. Februar 2020: 40 % biobasierter Anteil und Gartenkompostierbarkeit für Obst- und Gemüsebeutel	Moniteur Belge Artikel 2
Dänemark	Gebühren für Kunststofftragetaschen bereits 1994	Konsument zahlt Gebühr für Einweg-Kunststofftragetaschen bereits seit 1994 Keine Ausnahme für biologisch abbaubare Kunststofftragetaschen	Fact Sheet - The Danish Ecological Council
Deutschland	Verpackungsverordnung	2008: zertifiziert kompostierbare Kunststoffverpackungen von Lizenzgebühren ausgenommen 2013: Freistellung wieder zurückgenommen	<u>FNR 2013</u>
	Umsetzung EU-Richtlinie Nr. 2015/720	Umsetzung einer Vereinbarung des Handels mit dem Bundesumweltministerium (Selbstverpflichtungserklärung) zwischen BMU und HDE Keine Ausnahme für biologisch abbaubare Kunststofftragetaschen	<u>Vereinbarung BMU und HDE</u>
	Bioabfallverordnung (BioAbfV)	Kunststoffe, welche für die Verwertung auf Flächen geeignet sind, müssen Voraussetzungen gemäß Anhang I erfüllen, i.e. zertifizierte Sammelbeutel sowie Landwirtschaftsfolien	<u>BioAbfV</u>
	Düngemittelverordnung (DüMV)	Zertifizierte BAW sind als Nebenbestandteile zulässig	<u>DüMV</u>

Land	Relevante Regelung	Erklärung	Quelle
Frankreich	Umsetzung EU-Richtlinie Nr. 2015/720 Loi de transition énergétique pour la croissance verte	Ab 2020 müssen alle Plastikbecher, -teller und -besteck (garten-) kompostierbar sein und eine biologische Rohstoffbasis besitzen.	<u>Gesetz Artikel 73</u>
		2016 Verbot von Einweg-Kunststofftüten am Verkaufsort; Ausnahme für Obst- und Gemüsebeutel), welche biobasiert und (garten-) kompostierbar sind	<u>Gesetz Artikel 75</u>
Irland	Waste Management (Amendment) Act Plastic Bag Levy	2002 keine unentgeltliche Ausgabe von Kunststofftragetaschen (Kosten 0,15 €) 2004 Erhöhung auf 0,22 € Keine Ausnahme für biologisch abbaubare Kunststofftüten	<u>Amendment</u> Waste management Act; (narocon/nova-Institut 2016)
Italien	Plastic Bag Ban	Verkauf nur erlaubt für: Biologisch abbaubare und kompostierbare Kunststofftüten nach EN 13432 Wiederverwendbare Tüten Gilt seit 2017 zusätzlich auch für Obst- und Gemüsebeutel aus Kunststoff	(narocon/nova-Institut 2016)
Niederlande	Umsetzung EU-Richtlinie Nr. 2015/720	2016 Verbot der unentgeltlichen Ausgabe von Einweg-Kunststofftüten (Preis ca. 0,25 €) Keine Ausnahme für biologisch abbaubare Kunststofftüten	<u>Bekanntgabe Regierung</u> <u>Gesetz Artikel 3</u>
	Packaging Decree	2008 Steuer auf Verpackungen; Biologisch abbaubare Kunststoffverpackungen begünstigt (Kunststoffverpackung: 0,64 €/kg; biologisch abbaubarer Kunststoff 0,02 €/kg)	(narocon/nova-Institut 2016); Afvalfonds 2018 - <u>Kostenüberblick</u>
Österreich	Umsetzung EU-Richtlinie Nr. 2015/720	Verbot der unentgeltlichen Ausgabe von leichten Kunststofftragetaschen nach der EU Plastic Bag Directive geplant im Jahr 2018	<u>Gesetzesentwurf</u> Tragetaschenverordnung
Rumänien		2006 Gebühren für Einweg-Kunststofftüten Ausnahme: biologisch abbaubare Kunststofftüten	(narocon/nova-Institut 2016)
Schweden	BioEconomy Strategy	Fokus auf biobasierte Rohstoffe - weniger auf biologisch abbaubare	<u>BioEconomy Strategy</u>
	Umsetzung EU-Richtlinie Nr. 2015/720	Überprüfung von Optionen wie Verboten, Steuern oder Abgaben für Kunststoffabfälle	Medienbericht <u>The Local 2017</u>
Spanien	Plastic Bag Ban	2011 Verbot des Verkaufs von nicht-biologisch abbaubaren Einweg-Kunststofftragetaschen Verbot 2014 abgeschafft	(narocon/nova-Institut 2016)
	Umsetzung EU-Richtlinie Nr. 2015/720	Entwurf des Ministeriums für Landwirtschaft, Fischerei, Lebensmittel und Umwelt: Ab Januar 2020 Verbot für den Verkauf von nicht-biologisch abbaubaren Einweg-Kunststofftaschen /tüten	<u>Notification</u> - Teil II - Artikel 4

Land	Relevante Regelung	Erklärung	Quelle
UK	Umsetzung EU-Richtlinie Nr. 2015/720	2014/2015: Verbot der unentgeltlichen Ausgabe von Einweg-Kunststofftragetaschen: Kosten 0,05 € (Minimum) pro Kunststofftüten Keine Ausnahme für biologisch abbaubare Kunststofftüten	Environmental Protection: England Wales Scotland Carrier Bags Act Northern Ireland

3.4 Detaillierte Analyse der Entsorgungskonzepte von fünf Beispielländern

Da die Gesetzgebung oft als Schlüsselfaktor für die Marktentwicklung gesehen wird, wird im Folgenden dieser Zusammenhang in fünf EU-MS für biologisch abbaubare Kunststoffe genauer untersucht. Dabei wird auch die nationale Entsorgungsstruktur biologisch abbaubarer Kunststoffe beschrieben, um diese anschließend auf Effektivität und Umfang zu prüfen.

Zu den ausgewählten Ländern zählen neben Deutschland auch Italien, Frankreich, die Niederlande und Schweden. Die Wahl fällt auf Italien, Frankreich und die Niederlande, da diese biologisch abbaubare Kunststoffe im Rahmen der Gesetzgebung auf unterschiedliche Weise begünstigen (siehe Tabelle 6). Schweden ist bekannt für seine „grünen Konsumenten“ und für seine Vorreiterrolle zu Themen der Nachhaltigkeit. Trotzdem gibt es keine offensichtliche Förderung oder Begünstigung biologisch abbaubarer Kunststoffe. Um auch mögliche Gründe gegen diese Förderung oder Begünstigung in die anschließende Bewertung miteinzubeziehen, wird Schweden als fünftes Beispielland ausgewählt.

Es wird untersucht, welche Vorgaben für die Herstellung und Entsorgung von biologisch abbaubarer Kunststoffe und deren Entsorgung von Bedeutung sind. Weiter ist von Interesse, spezifische Gegebenheiten und Erfahrungen im Umgang sowie der Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffen der ausgewählten Länder aufzuzeigen. Es wurde dabei eine Auswahl an nationalen Experten, Instituten, Behörden, Verbänden, Herstellern und Entsorgern mit einem professionellen Bezug zu biologisch abbaubaren Kunststoffen in den ausgewählten Beispielländern befragt (Fragebogen siehe Anhang). In Deutschland wurden 31 Stakeholder kontaktiert, in Italien 14, in Frankreich elf und in den Niederlanden sowie Schweden jeweils neun. Folgende Stakeholder haben dabei zur Befragung beigetragen:

Tabelle 7: Beteiligung Befragung

Land	Verband/Unternehmen/Behörde
Deutschland	Reterra Service GmbH
Deutschland	bioplastics MAGAZINE Polymedia Publisher GmbH
Deutschland	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
Deutschland	narocon - Innovation Consulting
Deutschland	Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH
Deutschland	VHE - Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e.V.
Deutschland	European Bioplastics
Deutschland	Lobbe Entsorgung West GmbH & Co KG
Deutschland	C.A.R.M.E.N. e.V. Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V.
Deutschland	Biotec
Deutschland	TOMRA Sorting GmbH
Deutschland	Verbund kompostierbare Produkte e.V.
Deutschland	Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (offizielle Stellungnahme)
Frankreich	Ministry for the Ecological and Inclusive Transition
Frankreich	ADEME (Agentur für Umwelt- und Energie) - Direction Productions et Energies Durables
Frankreich	Club Bio-Plastiques
Italien	Italian Composting and Biogas Association (C.I.C.)
Italien	Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development
Italien	Assobioplastiche
Niederlande	Holland Bioplastics
Niederlande	Institute for Sustainable Packaging (KIDV) mit Verenigingafvalbedrijven und Dutch Association of Biowaste Processors (BVOR)
Niederlande	Elsinga Beleidsplanning en Innovatie BV (Beratungsunternehmen)
Schweden	IVL Swedish Environmental Research Institute
Schweden	Nordisk Bioplastförening (Biokunststoff Verein)
Schweden	Naturvårdsverket (Swedish Environmental Agency)

Die Beiträge reichten dabei von der Beantwortung des Fragebogens per Email oder per Telefon, über das Versenden offizieller Stellungnahmen bis zu Hinweisen auf aktuelle Studien oder Berichte.

Gewonnene Informationen wurden anonymisiert in sogenannten Factsheets zusammengetragen. Da verschiedene Stakeholder innerhalb eines Landes oftmals einen unterschiedlichen Kenntnisstand, unterschiedliche Erfahrungen, Meinungen und Interessen haben, konnten nicht für alle Punkte eindeutige Aussagen abgeleitet werden. Hier wurde versucht, Unklarheiten durch gezieltes Nachfragen oder durch eine weiterführende Literaturrecherche zu beseitigen. Trotzdem sind eindeutige Positionen nicht immer möglich. Zudem muss beachtet werden, dass sich die zusammengetragenen Informationen darauf beschränken, was durch Stakeholder oder das Internet verfügbar gemacht wurde.

3.4.1 Deutschland

GESETZGEBUNG	
Entscheidungsebene:	• Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) wird ergänzt und konkretisiert durch Abfallgesetze der Länder • Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger (örE) (Gemeinden, Kreise oder kreisfreie Städte) gestalten bestimmte Regelungen und Vorgaben zur Sammlung und Aufbereitung haushaltsnaher Abfälle in den entsprechenden Abfallsatzungen (kommunales Abfallrecht) • Zuständig für Entsorgung: örE sowie die Hersteller im Rahmen der Produktverantwortung für Verpackungen, Fahrzeuge, Elektroaltgeräte, Altöl sowie Batterien.
Verpackungsverordnung (VerpackV)	• Die Recyclingquote von Kunststoffverpackungen liegt bei 65 Prozent (Anhang I, 1.) • Hersteller und Vertreiber von Verkaufsverpackungen müssen sich an einem oder mehreren Systemen beteiligen, welche die flächendeckenden Rücknahme dieser Verkaufsverpackungen gewährleisten. Die Verpackungsverordnung wird 2019 durch das Verpackungsgesetz abgelöst: • Kunststoffe sind zu mindestens 90 Masseprozent einer Verwertung zuzuführen. • Dabei sind mindestens 65 Prozent und ab dem 1. Januar 2022 70 Prozent dieser Verwertungsquote durch werkstoffliche Verwertung sicherzustellen.
Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	• Seit 2015 Pflicht zur getrennten Sammlung von Bioabfällen (§ 11)
Bioabfallverordnung (BioAbfV)	Laut Anhang 1 fallen unter Bioabfälle die keiner Zustimmung nach § 9a zur Verwertung bedürfen, Kunststoffabfälle, die • Keine Verpackungen darstellen und • Überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen (d.h. > 50 %) und • Nach EN 13432 und DIN EN 14995 zertifiziert sind und • Abfälle aus der Landwirtschaft, dem Gartenbau, der Teichwirtschaft, der Forstwirtschaft, der Jagd und Fischerei darstellen • oder • Getrennt gesammelte Abfälle der Fraktion der Siedlungsabfälle darstellen (beispielsweise der Abfallbeutel zur Sammlung biologisch abbaubarer Abfälle)
Düngemittelverordnung (DüMV):	Biologisch abbaubare Werkstoffe weisen laut DüMV keinen düngemittelrechtlichen Nutzen auf und können daher nur unter Einschränkungen verwendet werden (Anlage 2, Tabelle 8): • Zertifiziert nach EN 13432 und DIN EN 14995 • Zu nur unvermeidlichen Anteilen • Nur bei aerober Aufbereitung des gesamten organischen Materials auch nach einer vorhergehenden Vergärung.

MARKT BIOLOGISCH ABBAUBARER KUNSTSTOFFE

Verbrauch 2015 (Zahlen von (narocon/nova-Institut 2016)):	Total 12.000-15.000 t/a (0,159 kg/EW) • Bioabfallbeutel: 5.000-8.000 t/a • Verpackungen, v.a. PLA-Joghurtbecher: 5.000 t/a • Sonstiges: Kompostierbare Mulchfolien; Cateringprodukte; Kaffeekapseln; Spielzeug; Kugelschreiber; Blumentöpfe/Eierbecher • Geringe Nachfrage nach biologisch abbaubaren Kunststoffeinkaufsstützen
Angewandte Standards	• EN 13432 Zertifizierung vor allem mit Logo von DIN CERTCO, Vinçotte oder Keimling Logo vorrangig auf Bioabfallbeutel • DIN CERTCO (Bioabbaubar im Boden) DIN SPEC 1165 (CEN/TR 15822), Vinçotte (OK Compost Soil): Mulchfolien • Kaum Zertifizierung für Gartenkompostierung

DARSTELLUNG MÖGLICHER ENTSORGUNGSWEGE BAK

a. KOMPOSTIERUNG

Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukt:	Produkte, die in Biotonne gesammelt werden: • Hauptsächlich Bioabfallbeutel zertifiziert nach EN 13432 • In geringen Mengen auch Obst- und Gemüseaufkleber, Blumentöpfe/Eierbecher, Becher, Einwegbesteck, obschon es gemäß Anhang 1 der BioAbfV nicht zulässig ist
Kompostierzyklus der industriellen Kompostieranlagen:	• BioAbfV gibt als minimale Zeit zur aeroben hygienisierenden Behandlung an: bei 50 °C zwei Wochen; bei 60 °C sechs Tage; bei 65 °C drei Tage • Tatsächlicher Kompostierzyklus abhängig von ○ Größe der Anlage ○ Wirtschaftlicher Perspektive (umso kürzer - umso geringer die Kosten) ○ Nachfrage des Endproduktes (Frischekompost - kurze Hauptrotte; Fertigungskompost - längere Hauptrotte und/oder längere Nachrotte) • Allgemeine Annahme nach (UBA 2012): „Handbuch Bioabfallbehandlung“: ○ Hauptrotte bei mittleren und größeren Anlagen in der Regel unter drei bis sechs Wochen ○ Hauptrotte bei kleinen Anlagen in der Regel über 15 Wochen ○ Über 70 % aller Kompostieranlagen betreiben Nachrotte ○ Nachrotte bei mittleren und größeren Anlagen in der Regel unter drei bis sechs Wochen ○ Nachrotte bei kleinen Anlagen in der Regel zwischen sechs und neun Wochen

	→ Spezielle Philosophie für Deutschland geht in Richtung kürzerer Kompostierzyklen → Bei Haupt- und Nachrotte von jeweils unter drei Wochen besteht eine Diskrepanz zu den Anforderungen von EN 13432: Desintegration nach drei Monate
Vorgang der industriellen Kompostierung biologisch abbaubare Kunststoffe	• Um eine Verwechslung auszuschließen, müssen Produkte, die nach BioAbfV zugelassen sind, mit einem entsprechenden Label gekennzeichnet sein • Zusätzliche Kennzeichnung durch Einfärbung oder bestimmte Struktur möglich - in Deutschland jedoch nicht einheitlich geregelt • Industrielle Kompostierung mit zwei unterschiedlichen Verfahren möglich (oder einer Kombination aus beiden): 1. Mit Vorsortierung (laut (UBA 2012)) 65-70 % der Anlagen): ○ Durch Störstoffabtrennung, Siebung, Windsichtung, manuelle Sortierung ○ Bislang wird keine Technik verwendet, welche biologisch abbaubare Kunststoffe von konventionellen Kunststoffen unterscheidet (Technisch möglich, aber teuer, aufwendig, Effizienz fraglich) ○ Folge: Meist Aussortierung von biologisch abbaubaren zusammen mit konventionellen Kunststoffen und anderen Störstoffen zur thermischen Verwertung (Verschmutzungsgrad für hochwertiges Recycling zu groß) oder in einzelnen Fällen Wiedereingliederung in nächsten Kompostierzyklus ○ Findet keine Vorsortierung statt, oder sind die Folien so dünn, dass diese nicht abgetrennt werden können, werden biologisch abbaubare Kunststoffe industriell kompostiert 2. Mit Nachsortierung (laut (UBA 2012)) 99 % der Anlagen): ○ Durch Störstoffabtrennung und Siebung des fertigen Komposts ○ Falls keine Vorsortierung stattgefunden hat und biologisch abbaubare Kunststoffe mitkompostiert wurden, können mögliche Rückstände hier aussortiert werden ○ Rückstände werden entweder thermisch verwertet (Verschmutzungsgrad für hochwertiges Recycling zu groß) oder in einzelnen Fällen den nächsten Kompostierzyklus zugeführt
Gartenkompostierung sowie Abbau im Boden	• Unter DIN CERTCO kaum Produkte die als „gartenkompostierbar“ zertifiziert sind → daher Art der Verwertung untergeordnete Rolle (v.a. in Städten) • Technische und wirtschaftliche Vorteile werden durch Anwendung biologisch abbaubare Mulchfolien in der Landwirtschaft gesehen: aufgrund des Abbaus im Boden werden Folien nach Verwendung untergepflügt
b. VERGÄRUNG	
Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukt:	Produkte, die in Biotonne gesammelt werden (vorrangig Bioabfallbeutel als Siedlungsabfall) • Hauptsächlich Bioabfallbeutel zertifiziert nach EN 13432 • In geringen Mengen auch Obst- und Gemüseaufkleber, Blumentöpfe/Eierbecher, Becher, Einwegbesteck, obschon es gemäß Anhang 1 der BioAbfV nicht zulässig ist

Vorgang der industriellen Vergärung biologisch abbaubare Kunststoffe	• Typische Verhältnisse in deutschen Vergärungsanlagen: bis drei Wochen anaerobe Vergärung im Trockenverfahren unter mesophilen Bedingungen (30-35 °C) • Bislang existiert keine Prüfnorm für die Vergärung biologisch abbaubarer Kunststoffe • Laut DüMV müssen biologisch abbaubare Werkstoffe aerob aufbereitet werden, da Abbau erst während der Nachrotte stattfindet; eine Nachrotte findet laut UBA 2012 bei ca. der Hälfte der Vergärungsanlagen in Deutschland statt • Bei Großteil deutscher Vergärungsanlagen Aussortierung biologisch abbaubarer Kunststoffe als Störstoffe vor Vergärungsprozess • Bioabfälle der Haushalte werden 2015 in 1.000 Kompostierungs- und 100 reinen Bioabfallvergärungsanlagen verwertet → Folglich hat die Vergärung von Bioabfällen der Haushalte eine geringe Bedeutung in Deutschland (UBA 2016b) und damit auch die Vergärung als Verwertungsoption für biologisch abbaubare Kunststoffe → Wenig Erfahrung mit der Vergärung biologisch abbaubarer Kunststoffe in der praktizierten Abfallwirtschaft → Wenig Erkenntnisse über Studien und Pilotprojekte z.B. (Bauhaus Universität Weimar 2013) und (Kern et al. 2017)
c. RECYCLING	
Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukt:	• Pre-Consumer Abfälle (Anfall bei internen Produktionsprozessen): z.B. PLA-Stanzabfälle bei der Becherproduktion • Post-Consumer Abfälle aus Gelben Sack/Kunststofffraktion (z.B. Beutel, Becher, Blumentöpfe, Einwegbesteck)
Vorgang des Recyclings biologisch abbaubare Kunststoffe	• Werkstoffliches und rohstoffliches Recycling biologisch abbaubarer Kunststoffe grundsätzlich möglich, sofern diese getrennt erfasst werden (Blends ausgeschlossen) • Post-Consumer Verpackungen (z.B. PLA-Becher) werden typischerweise nicht recycelt (Ausnahme: Pilotprojekte), sondern thermisch verwertet • Vorgang vor tatsächlichen Recycling (Kreindl 2013): ○ Post-Consumer Abfälle werden in Deutschland automatisch getrennt und sortiert: Leichtverpackungen z.B. mittels einer Nahinfrarot (NIR)-Hohlkörpersortieranlage (detektiert unterschiedlichen Materialien anhand ihres spektralen Verlaufs im IR-Bereich) ○ Biologisch abbaubare Kunststoffe, deren Spektralbereich nicht in den IR-Sortern gespeichert worden ist, werden mit anderen Störstoffen ausgewiesen und thermisch verwertet ○ Die Detektion biologisch abbaubarer Kunststoffe durch NIR-Anlagen ist technisch möglich aber aufgrund zu geringer Mengen wirtschaftlich nicht rentabel ○ Aussortierung der Störstoffe nicht immer zu 100 % möglich → Ob und ab wann biologisch abbaubare Kunststoffreste das Recycling konventioneller Stoffe stören, ist noch Gegenstand von Diskussionen → Bsp. Studie (UMSICHT et al. 2017) ergibt: keine Störung des PP-Recyclings bis 3 % PLA bzw. 10 % PLA bei PS-Recycling
d. THERMISCHE VERWERTUNG	

Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukte:	• Biologisch abbaubare Kunststoffabfälle im Restmüll • Biologisch abbaubare Kunststoffabfälle, die vor oder nach der Kompostierung/Vergärung aussortiert werden • Biologisch abbaubare Kunststoffabfälle aus den Verpackungsabfällen, die vor dem Recyclingprozess aussortiert werden
Vorgang der thermischen Verwertung biologisch abbaubare Kunststoffe	• Thermische Verwertung durch Müllverbrennungsanlage zur Gewinnung von thermischer oder elektrischer Energie • Thermische Verwertung in Zementwerk/Hochofen zur Substitution von fossilen Brennstoffen (z.B. Steinkohle) • Thermische Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffe zusammen mit anderen Stoffen ohne Einschränkungen möglich

VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER ENTSORGUNGSWEGE MENGENMÄSSIG RELEVANTER BIOLOGISCH ABBAUBARER PRODUKTE

Bioabfallbeutel aus BAK: sofern nach EN 13432 zertifiziert Sammlung über die Biotonne zur Verwertung in der industriellen Kompostieranlage (seltener über Vergärungsanlage); bei Vielzahl von Anlagen Störstoffabtrennung/Aussiebung vor der eigentlichen Kompostierung; falls keine Aussortierung stattfindet, wird Beutel mitkompostiert; fast allen Anlagen ist eine weitere Siebung nachgeschaltet; falls Beutel nicht weitgehend zersetzt/abgebaut ist, wird dieser aussortiert. Aussortierte Beutel/Reste werden energetisch verwertet. Die Entsorgung über den Eigenkompost findet kaum statt.

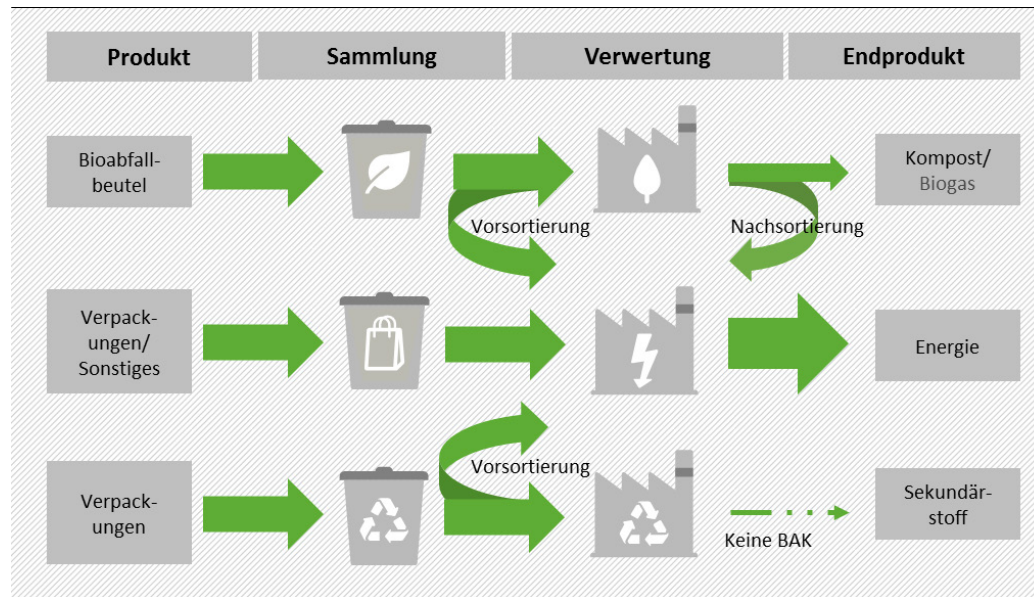
Gegenstände aus BAK: biologisch abbaubare Joghurtbecher, Tüten und sonstige Dinge, welche über den Restmüll entsorgt und gesammelt werden, werden vorrangig thermisch verwertet.

Verpackungen aus BAK: biologisch abbaubare Verpackungen, welche zusammen mit anderen Kunststoffverpackungen entsorgt und gesammelt werden, werden vorrangig zu Recyclinganlagen geliefert. Während konventionelle Kunststoffe zum Teil stoffspezifisch aussortiert und aufbereitet werden, werden biologisch abbaubare Kunststoffe mit vielen anderen Kunststoffteilen als Sortierreste ausgeschleust und energetisch verwertet.

Nur zu PLA-Verpackungen (Joghurtbecher) gab es Versuche und Projekte, in denen die separate Sammlung und das Recycling dieses Stoffs erprobt wurde.

Mulchfolien aus BAK: Entsprechend zertifizierte Mulchfolien werden nach der Anwendung auf dem Feld untergepflügt.

Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung der Entsorgungswege mengenmäßig relevanter BAK in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung

ZUSAMMENFASSUNG ENTSORGUNGSPRAXIS

Auf Grundlage verfügbarer Informationen lassen sich keine belastbaren Aussagen treffen, welcher Entsorgungsweg in Deutschland der Hauptentsorgungsweg für BAK ist. Dieser ist stark vom BAK-Produkt, der vorhandenen Infrastruktur sowie lokalen Regelungen abhängig.

Tendenz: Energetische Verwertung

Quelle: Befragung per Fragebogen und Austausch mit Länderexperten per E-Mail (Fragebogen siehe Anhang); (narocon/nova-Institut 2016) (UBA 2016a) (UBA 2016) (UBA 2012) (Kreindl 2013) (Bauhaus Universität Weimar 2013) (Kern et al 2017) (Kauertz et al. 2011) (IAP 2017)

3.4.2 Frankreich

GESETZGEBUNG

Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte
(Gesetz der Energiewende für grünes Wachstum)

Décret n° 2016-379 du 30 mars 2016 festgelegt in Artikel 75:

Ab 2016 sind Einweg-Kunststofftüten (< 50 µm Dicke), die den Verkaufsort verlassen, verboten.

Eine Ausnahme gilt für Obst- und Gemüsebeutel sofern diese

- einen biobasierten Anteil von bis zu 30 % ab 2017 / 40 % ab 2018 / 50 % ab 2020 / 60 % ab 2025 (nachgewiesen durch einen entsprechenden Standard) besitzen UND
- als gartenkompostierbar (z.B. nach NF T 51-800) zertifiziert sind.

Die Pflicht zur Gartenkompostierbarkeit gilt ebenfalls für Versandverpackungen.

Dies muss auf dem Produkt kenntlich gemacht werden

Artikel 73:

Ab 2020 müssen Einwegkunststoffgeschirr (Becher, Teller, Besteck) sowie Wattestäbchen gartenkompostierbar sein und eine biologische Rohstoffbasis besitzen.

Es bestehen keine weiteren Spezifikationen oder finanzielle Anreize für biologisch abbaubare Kunststoffe

MARKT BIOLOGISCH ABBAUBARER KUNSTSTOFFE

Verbrauch 2015 / 2017 (Zahlen von 2015 über narocon/nova-Institut 2016; Zahlen von 2017 Expertenschätzung):

Total 2015 (vor Einführung des Artikel 75): 6.000-8.000 t/a (0,105 kg/EW)

- Bioabfallbeutel 3.000-5.000 t/a
- Einkaufstüten 1.000-2.000 t/a
- Verpackungen 2.000 t/a
- Mulchfolien 2.000 t/a

Total 2017 (nach Einführung des Artikel 75 und 73): 30.000-40.000 t/a (geschätzt) (0,524 kg/EW)

- Vor allem Obst- und Gemüsebeutel - ca. 20.000 t/a
- Bioabfallbeutel (werden von einem Teil der Gemeinden an die Haushalte verteilt, um die getrennte Sammlung zu erhöhen)
- Verpackungen
- Cateringartikel
- Kaffeekapseln
- Versandtaschen
- Mulchfolien

Angewandte Standards

- NFT 51800 (home compostable) für Obst- und Gemüsebeutel; Bioabfalltüten, Versandtaschen
- EN 13432 (industriell kompostierbar) für Bioabfalltüten
- NF U52-001 für Mulchfolien

DARSTELLUNG MÖGLICHER ENTSORGUNGSWEGE BAK

a. KOMPOSTIERUNG

Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukte:	• Tragetaschen • Bioabfallbeutel (abhängig von Region - meist nicht mehr als drei bis vier Abfallbeutel in einer Bioabfalltonne) • Kunststoffbecher
Kompostierzyklus der industriellen Kompostieranlagen:	Drei bis sechs Monate
Vorgang der industriellen Kompostierung biologisch abbaubare Kunststoffe	Sammlung: • Getrennte Sammlung von Bioabfall noch nicht flächendeckend vorhanden (nur neun Millionen Menschen angeschlossen) → wird sich aber verbessern • Biologisch abbaubare Bioabfallbeutel werden von einem Teil der Gemeinden verteilt • Laut Gesetz müssen biologisch abbaubare Kunststoffe entsprechend gekennzeichnet sein (kompostierbar oder gartenkompostierbar) Kompostierung • Biologisch abbaubare Kunststoffe werden grundsätzlich von Kompostieranlagenbetreibern akzeptiert und nicht zuvor aussortiert (falls doch werden die Störstoffe thermisch verwertet/beseitigt); dies ist jedoch der Entsorgungsweg weniger BAK • Folglich wird der Großteil tatsächlich kompostiert. Aufgrund langer Kompostierzyklen werden keine Probleme über eventuelle Rückstände der biologisch abbaubaren Kunststoffe im Kompost berichtet • Biologische Abbaubarkeit der Beutel wird als Vorteil gesehen, der den Prozess der Trennung von Sammelbeutel und Bioabfall vermeidet • Sofern biologisch abbaubare Kunststoffe in die Mechanisch-Biologische Abfallbehandlungsanlage (MBT) gelangen, werden diese vorher aussortiert und thermisch verwertet/beseitigt • Aussage nationaler Experten: gartenkompostierbare Obst- und Gemüsebeutel bauen aufgrund der höheren Temperaturen dieser Anlagen in den industriellen Kompostieranlagen vollständig ab. Somit werden keine Probleme durch die weitere Zunahme dieser Produkte erwartet Grundsätzlich Ausbau der Kompostierinfrastruktur mangelhaft; Bioabfall auch oft über MBT entsorgt
Gartenkompostierung sowie Abbau im Boden	• Obwohl „Gartenkompostierbarkeit“ von Kunststoffbeutel gefordert wird, findet diese Art der Entsorgung kaum statt (Grund: neues Gesetz braucht Anpassungszeit) • Technische und wirtschaftliche Vorteile werden durch Anwendung biologisch abbaubarer Mulchfolien in der Landwirtschaft gesehen: aufgrund Abbau im Boden werden Folien nach Verwendung untergepflügt → geringer Aufwand und keine Entsorgungskosten → Seit 15 Jahren ohne negative Auswirkungen praktiziert

b. VERGÄRUNG

- Vergärung als Verwertungsoption in Frankreich von untergeordneter Rolle
- Unklare Informationen zum Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen bei der Vergärung

c. RECYCLING

Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukte:

- Biologisch abbaubare Kunststoffe gelangen kaum zu Recyclinganlagen, da BAK vorrangig über Restmüll/Biotonne entsorgt

Vorgang des Recyclings biologisch abbaubarer Kunststoffe:

- Recycling wird im Moment nicht als Lösung für biologisch abbaubare Produkte gesehen
- Falls biologisch abbaubare Kunststoffe Recyclinganlagen erreichen, werden diese vor dem tatsächlichen Recyclingprozess aussortiert und thermisch verwertet oder beseitigt
- Bisher sind keine Probleme mit Rückständen biologisch abbaubarer Kunststoffe im Recyclingprozess konventioneller Kunststoffe bekannt

d. THERMISCHE VERWERTUNG / BESEITIGUNG

- Bisher werden fast alle biologisch abbaubaren Kunststoffprodukte thermisch verwertet oder beseitigt
- Quellen (abhängig von Abfallsammlung):
 - o Aussortierte Stoffe vor industrieller Kompostierung (gering)
 - o Biologisch abbaubare Kunststoffe im Restmüll (viel)
 - o Biologisch abbaubare Kunststoffe in Kunststoff/LVP-Fraktion zur thermischen Verwertung/Deponierung
 - o Aussortierte Stoffe vor Recyclingprozess
 - o Aussortierte Stoffe aus MBT

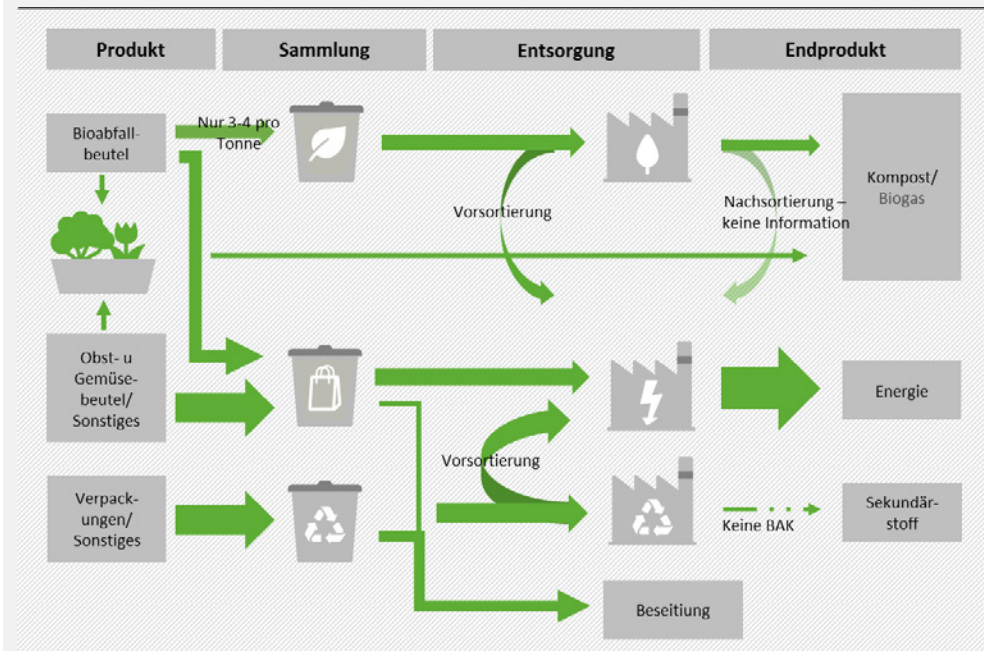
VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER ENTSORGUNGSWEGE MENGENMÄSSIG RELEVANTER BIOLOGISCH ABBAUBARER PRODUKTE

Bioabfallbeutel aus BAK: wenige finden den Weg in die Biotonne (3-4 Beutel pro Tonne) und gelangen zu reinen Kompostieranlagen oder zu MBT (weniger zu Vergärungsanlagen). Eine Vorsortierung findet in wenigen Fällen statt; einige sehr wenige Bioabfallbeutel werden im eigenen Garten kompostiert. Der Großteil der Bioabfallbeutel wird über die Restmülltonne entsorgt und zusammen mit dem Inhalt energetisch verwertet oder beseitigt.

Obst- und Gemüsebeutel aus BAK: Großteil Entsorgung über Restmülltonne; Inhalt wird entweder energetisch verwertet oder beseitigt. Sehr wenige Beutel werden im eigenen Garten kompostiert.

Kunststoffverpackungen aus BAK: hauptsächlich zusammen mit der Kunststofffraktion gesammelt; vor dem Recyclingprozess werden biologisch abbaubare Kunststoffverpackungen aussortiert und thermisch verwertet oder beseitigt.

Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung der Entsorgungswege mengenmäßig relevanter BAK in Frankreich



Quelle: Eigene Darstellung

ZUSAMMENFASSUNG ENTSORGUNGSPRAXIS

Auf Grundlage verfügbarer Informationen lassen sich keine belastbaren Aussagen treffen, welcher Entsorgungsweg in Frankreich der Hauptentsorgungsweg biologisch abbaubarer Kunststoffe ist.

Tendenz: Energetische Verwertung/Beseitigung aufgrund fehlender flächendeckender Infrastruktur für die separate Erfassung von Bioabfällen; zukünftig ist stärkerer Ausbau der biologischen Abfallbehandlung geplant, so dass dieser Entsorgungsweg für BAW bedeutender werden könnte.

Quelle: Befragung per Fragebogen und Austausch mit Länderexperten per E-Mail (Fragebogen siehe Anhang) (narocon/nova-Institut 2016) (ADEME 2016)

3.4.3 Italien

GESETZGEBUNG	
Entscheidungsebene:	Nationale Gesetzgebung entscheidet über Zulassung von BAK zur industriellen Kompostierung (siehe unten)
DECRETO LEGISLATIVO 3 dicembre 2010, n. 205	<u>Abfallbeutel</u> Getrennte Sammlung von organischen Abfällen mittels wiederverwendbaren Containern oder kompostierbaren Beuteln (zertifiziert nach UNI EN 13432-2002)
Decreto 25 luglio 2011	<u>Öffentliches Auftragswesen</u> Auf Produkte und Dienstleistungen müssen Umweltkriterien angewandt werden. Z.B. sofern Mehrweggeschirr nicht möglich ist, muss Einweggeschirr kompostierbar sein (zertifiziert nach UNI EN 13432-2002)
Decreto Legge 25 gennaio 2012, n. 2	<u>Einwegeinkaufstüten</u> Verbot des Verkaufs von Einwegeinkaufstüten (< 1.000 µm) aus konventionellen Kunststoffen. Um zugelassen zu werden, müssen Einwegeinkaufstüten kompostierbar sein (zertifiziert nach UNI EN 13432-2002) <u>Decreto del 18 marzo 2013</u> spezifiziert technische Vorgaben der betroffenen Tüten (z.B. Dicke) <u>Legge 11 agosto 2014, n. 116</u> spezifiziert die Höhe der Strafe bei Nicht-Einhaltung des Gesetzes
Decreto Legge 2017 20 giugno, n. 91	<u>Kunststofftüten/beutel</u> - Erweitert das Verbot auf alle sehr leichten Kunststofftüten/beutel (< 15 µm) z.B. auf Obst- und Gemüsebeutel sofern diese nicht als kompostierbar zertifiziert sind (nach UNI EN 13432-2002). - Zusätzliche Voraussetzung: biobasierte Basis: 40 % im Jahr 2018, 50 % im Jahr 2020; 60 % im Jahr 2021
Decreto Legislativo 29 aprile 2010, n. 75	<u>Mulchfolien in der Landwirtschaft</u> Düngemittelgesetz lässt Mulchfolien aus biologisch abbaubaren thermoplastischen Materialien für den Gartenbau und in der Landwirtschaft zu, sofern diese nach UNI 11495:2013 zertifiziert sind
Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 7 dicembre 2016	<u>Definition organischer Abfall</u> - Alle Produkte, die nach EN 13432 zertifiziert sind, gelten gesetzlich als organischer Abfall definiert und sind im organischen Abfallstrom erlaubt. - Folglich müssen alle biologisch abbaubaren Kunststoffe zusammen mit der organischen Abfallfraktion gesammelt werden. Diese muss in industriellen Kompostieranlagen verwertet werden.
MARKT BIOLOGISCH ABBAUBARER KUNSTSTOFFE	

Verbrauch 2015 /2017 (Zahlen von 2015 über narocon/nova-Institut 2016; Zahlen von 2017 Expertenschätzung):	Total: 45.000-50.000 t/a (0,791 kg/EW) • Hauptsächlich Einkaufstüten: 30.000-35.000 t/a • Bioabfallbeutel: 7.000 t/a • PLA Flaschen 1.000-2.000 t/a • Weniger: Besteck, flexible Verpackungen, Mulchfolien Total 2017: > 54.500 t/a (0,90 kg/EW)
Angewandte Standards	Vorrangig Standard EN 13432 über Compostabile CIC, OK Compost (Vinçotte; TÜV Austria), DIN CERTCO
DARSTELLUNG MÖGLICHER ENTSORGUNGSWEGE BAK	
a. KOMPOSTIERUNG	
Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukte	• Grundsätzlich sind alle Produkte, die nach EN 13432 zertifiziert sind, auch zur industriellen Kompostierung zugelassen • Vor allem Bioabfallbeutel oder Einkaufstüten/Tragetaschen (ab 2018 vermutlich vermehrt auch Obst- und Gemüsebeutel)
Kompostierzyklus der industriellen Kompostieranlagen	Inklusive Nachrotte: ca. 90 Tage
Vorgang der industriellen Kompostierung biologisch abbaubare Kunststoffe	• Kompostierbare Tüten werden bereits seit 25 Jahren ohne größere Einschränkungen von industriellen Kompostieranlagen akzeptiert • Ziel in Italien: nachhaltige Verwertung von Bioabfällen zu erhöhen (damit biologisch abbaubare Kunststoffe eingeschlossen) Vor/Nachsortierung: • Aufgrund der Fokussierung auf biologisch abbaubare Tüten/Beutel geringe Störstoffe in Form von nicht-abbaubaren Kunststoffen in Bioabfällen → Generell: sofern gesammelter Bioabfall akzeptable Zusammensetzung hat, wird gesamter Bioabfall (mit BAK) kompostiert • Art der Vorsortierung/Vorbehandlung abhängig von Anlagen - o Öffnen der Säcke und Vermischung - o Aussortierte Stoffe werden (nach Zerkleinerung) kompostiert, um die zu deponierenden Mengen zu reduzieren (Ausnahme bei Platzmangel: Verzicht auf aerobe Vorbehandlung und thermische Verwertung/Beseitigung aussortierter Stoffe) - o Befinden sich nach der Kompostierung größere Kunststoffrückstände im Kompost, werden diese in den nächsten Kompostierzyklus integriert Ergebnis:

	• Keine großen Probleme bekannt bei der Kompostierung von Kunststoffen zertifiziert nach EN 13432 • Keine negativen Auswirkungen auf den Kompost bekannt (keine Rückstände BAK zu finden) • ABER nur, sofern angemessene Kompostierzyklen sowie Temperaturen vorherrschen
b. VERGÄRUNG	
Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukte	• Grundsätzlich sind alle Produkte, die nach EN 13432 zertifiziert sind (Sammlung von Haushalten und Gewerben), auch zur Vergärung zugelassen • Vor allem Bioabfallbeutel oder Einkaufstüten/Tragetaschen (ab 2018 vermutlich auch vermehrt Obst- und Gemüsebeutel)
Vorgang der Vergärung biologisch abbaubarer Kunststoffe	• Vergärung von biologisch abbaubaren Produkten nur, sofern aerobe Behandlung (Nachrotte) der Vergärung nachgeschaltet ist (in den meisten italienischen Anlagen der Fall) Vergärung auf drei verschiedene Methoden möglich: 1. Nassvergärung mit Nachrotte ○ Trennung des biologischen Abfalls in Fest- und Flüssigfraktion ○ Festfraktion (mit biologisch abbaubaren Kunststoffen): nur aerobe Behandlung ○ Flüssigfraktion: Vergärung mit anschließender aerober Behandlung zusammen mit Festfraktion ○ Biologisch abbaubare Kunststoffe werden in diesem Verfahren mitkompostiert 2. Nassvergärung ohne Nachrotte ○ Vorsortierung und Aussortierung von Störstoffen ○ Biologisch abbaubare Kunststoffe werden mit anderen Störstoffen aussortiert und thermisch verwertet oder beseitigt 3. Trockenvergärung mit Nachrotte ○ Trennung des biologischen Abfalls in Fest- und Flüssigfraktion ○ Störstoffe/zu großes Material wird am Ende aussortiert und einem neuen Zyklus zugeführt Ergebnis: • Grundsätzlich keine Probleme bei der Vergärung biologisch abbaubarer Kunststoffe sofern aerobe Behandlung vorhanden • Abbaubare Kunststoffe im Gegensatz zu konventionellen Kunststoffen für die Vergärung stark bevorzugt
c. RECYCLING	
Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukte	Eine italienische <u>Studie</u> (Dicheplsatica6 2017) ergibt, dass sich nur 0,85 % biologisch abbaubarer Kunststoffe in dem Recyclingstrom befinden. Damit spielt mechanisches Recycling biologisch abbaubarer Kunststoffe in Italien keine Rolle

Vorgang des Recyclings biologisch abbaubarer Kunststoffe

Erfahrungen mit Recycling bisher durch Forschungsprojekte:

z.B. von CONAI (Italian National Packaging Recycling Consortium) und COREPLA (Italian Plastic Packaging Recycling Consortium):

- Ergebnis: 1-2 % von PLA in recyceltem PET hat keinen Einfluss auf Recyclingablauf
- Werden bis zu 10 % von Mater-Bi Biopolymeren (Stärke-Blends) zusammen mit konventionellen Kunststoffen recycelt, findet keine Beeinträchtigung der Qualität des Rezyklates statt

Recycling von Pre-Konsumerabfälle (in der Produktion) wird bereits für alle Typen ohne Probleme angewandt.

d. THERMISCHE VERWERTUNG / BESEITIGUNG

Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukte

- Thermisch verwertet, verbrannt oder abgelagert werden Abfälle der Restmüllfraktion
- In selten Fällen werden Abfälle thermisch verwertet/verbrannt/abgelagert sofern sie während der Vorsortierung zur Kompostierung oder Vergärung aussortiert werden (diese Tatsache kann regional stark abweichen)

VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER ENTSORGUNGSWEGE MENGENMÄSSIG RELEVANTER BIOLOGISCH ABBAUBARER PRODUKTE

Getrennte Sammlung von Bioabfällen: 100 kg/EW 2015 (CIC 2017)

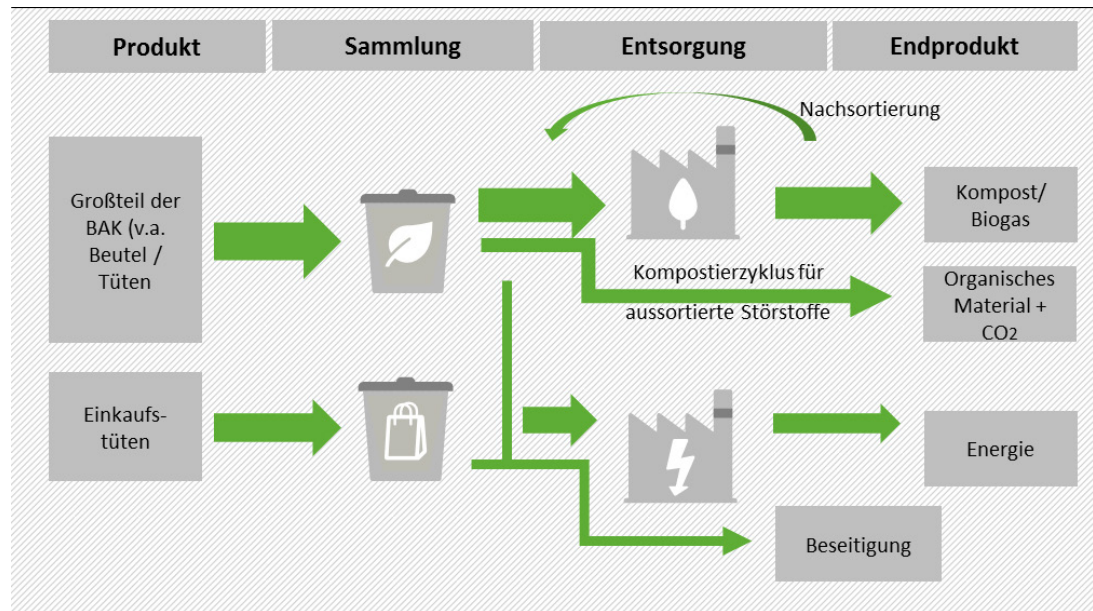
Biologisch abbaubare Kunststoffprodukte zertifiziert nach EN 13432 (v.a. Bioabfallbeutel; Tüten): werden über die Bioabfalltonne entsorgt und gelangen entweder in die industrielle Kompostierung (vorrangig), Nassvergärung mit Kompostierung oder Trockenvergärung mit Kompostierung. Falls eine Vorsortierung stattfindet, werden die Bestandteile in einem vorgeschalteten Kompostierprozess abgebaut oder aussortiert und beseitigt. Werden größere Bestandteile bei der Nachsortierung aussortiert, werden die erneut dem Kompostierprozess zugeführt.

Konventionelle (PE) sowie oxo-fragmentierbare Tüten/Beutel sind nicht erlaubt. Aufgrund dieses Ausschlusses sind die Störstoffmengen gering.

Einkaufstüten aus BAK: einige Einweg-Einkaufstüten werden von Bürgern zur Sammlung von Restmüll verwendet. Zusammen mit dem Restmüll werden diese thermisch verwertet oder beseitigt.

Einmal-Cateringprodukte aus BAK: bei großen Mengen findet getrennte Sammlung statt.

Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Entsorgungswege mengenmäßig relevanter BAK Italien



Quelle: Eigene Darstellung

ZUSAMMENFASSUNG ENTSORGUNGSPRAXIS

Auf Grundlage verfügbarer Informationen lassen sich keine belastbaren Aussagen treffen, welcher Entsorgungsweg in Italien der Hauptentsorgungsweg biologisch abbaubarer Kunststoffe ist.

Tendenz: Kompostierung in industriellen Kompostieranlagen oder im nachgeschalteten aeroben Schritt beim Vergärungsverfahren für BAK (regionale Abweichungen möglich).

Quelle: Befragung per Fragebogen und Austausch mit Länderexperten per E-Mail (Fragebogen siehe Anhang) (narocon/nova-Institut 2016) (CIC 2017) (Dicheplsatica6 2017)

3.4.4 Niederlande

GESETZGEBUNG	
Entscheidungsebene	<u>Besluit omgevingsrecht</u> (Umweltrechtliche Entscheidungen) und <u>wet algemene bepalingen omgevingsrecht</u> (allgemeines Umweltrecht) • Gesetzgebung zu Abfallmanagement auf nationaler Ebene gültig • Gemeinden und Provinzen führen Gesetzgebung aus sind in für Abfallmanagement verantwortlich (Bestimmung über Vergabe sogenannter „Environmental permits“ für Anlagen, Durchführung von Kontrollen etc.)
Landelijk afvalbeheerplan 2017-2029 - nationaler Abfallwirtschaftsplan	• Im Abfallwirtschaftsplan 2017-2029 (<u>Landelijk afvalbeheerplan 2017-2029</u>) heißt es: Während der Erstellung des Plans gab es noch keinen eindeutigen politischen Standpunkt zu biologisch abbaubaren Kunststoffen, aus diesem Grund gibt es auch keine spezifischen Gesetze in Bezug auf den Umgang mit diesen. • Im getrennt gesammelten Bioabfall sollen keine Kunststofffolien, -taschen oder -müllbeutel entsorgt werden (auch wenn sie mit dem Keimlingslogo zertifiziert wurden). Eine Ausnahme gilt für biologisch abbaubare Bioabfallbeutel, sofern sie nach EN 13432 zertifiziert sind. • Die Umwandlung von organischen Material in Kompost wird in den Niederlanden als werkstoffliches Recycling gesehen.
Packaging Decree	<u>Packaging Decree</u> - 18 December 2015, no. IENM / BSK-2015/242582: Für Kunststofftragetaschen muss eine Gebühr verlangt werden (keine Ausnahme für biologisch abbaubare oder biobasierte Tüten)
Packaging Waste Fund	„Dutch Packaging Tax“: verlangt geringere <u>Abfallgebühren</u> für EN 13432-zertifizierte Produkte (EPR-System) • Kunststoffverpackung: 0,64 €/kg; biologisch abbaubarer Kunststoff 0,02 €/kg • Über die Sinnhaftigkeit dieser Bevorzugung wird jedoch gerade diskutiert
Wet Milieubeheer - Umweltgesetz	<u>Artikel 10.21</u>: Festlegung, dass Gemeinden dafür Sorge zu tragen haben, dass Obst-, Gemüse- und Gartenabfälle separat gesammelt werden <u>Artikel 10.26</u>: Im Interesse einer effektiven Entsorgung können die Gemeinden jedoch (Abweichend von 10.21) selbst entscheiden können, ob Obst-, Gemüse- und Gartenabfälle separat oder mit anderen Haushaltsabfallströmen gesammelt werden
MARKT BIOLOGISCH ABBAUBARER KUNSTSTOFFE	
Verbrauch 2015 (Zahlen über narocon/nova-Institut 2016):	Total: 7.000-9.000 t/a (0,471 kg/EW) • Bioabfallbeutel: 3.000-5.000 t/a • Kompostierbare Verpackungen z.B. Obst- und Gemüsebeutel: 1.000-3.000 t/a • Kompostierbares Geschirr: 1.000-3.000 t/a

	• Einkaufstüten: Geringe Mengen (Akzeptanz eher gering) • Sonstiges: Mulchfolien, Blumentöpfe, Versandverpackungen Genauere Aufstellung: (Molenveld et al. 2015): Biobased Packaging Catalogue
Angewandte Standards	• Standard für industrielle Kompostierung (EN 13432): Keimlingslogo, DIN VERTCO, Vinçotte bzw. TÜV Austria • Standard für Gartenkompostierung kaum angewandt
DARSTELLUNG MÖGLICHER ENTSORGUNGSWEGE BAK	
a. KOMPOSTIERUNG UND VERGÄRUNG	
Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukte	• Laut Abfallwirtschaftsplan sind nur Bioabfallbeutel erlaubt, welche nach EN 13432 zertifiziert sind (machen nur 1 % des Bioabfalls aus) • Über die Zulassung biologisch abbaubarer Kunststoffe haben einige Anlagenbetreiber grundsätzlich Zweifel
Kompostier-Vergärungszyklus der industriellen Kompostieranlagen	• Zyklus abhängig von Typ der Anlage • Vergärung: Dauer der Vergärung ca. 20 Tage exkl. nachgeschalteter Kompostierung (ca. drei Wochen) • Kompostierung: Im Durchschnitt zwischen zwei und sechs Wochen (max. acht Wochen)
Vorgang der industriellen Kompostierung/Vergärung biologisch abbaubare Kunststoffe	Oftmals Vergärung vor eigentlicher Kompostierung Abbaueigenschaften der nach EN 13432 zertifizierten Produkte entsprechen nicht den Kompostierzyklen der meisten Anlagen. Aus diesem Grund verschiedene Techniken, um mit biologisch abbaubare Kunststoffen (vorrangig Bioabfallbeutel) umzugehen: 1. Vorsortierung: ○ Aussortierung von biologisch abbaubaren Kunststoffen vor Kompostierung/Vergärung ○ Keine Unterscheidung zwischen konventionellen Kunststoffen, anderen Störstoffen und biologisch abbaubaren Kunststoffen (vor allem, da Keimlingslogo kaum sichtbar ist) ○ Aussortierte Stoffe werden thermisch verwertet 2. Nachsortierung ○ Variante 1: Aussiebung und thermische Verwertung von zu großen Partikeln ○ Variante 2: (vorrangig angewandt): noch nicht vollständig zersetzte/abgebaute Materialien werden einem erneuten Kompostierzyklus zugeführt
b. RECYCLING	
Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukte	• Biologisch abbaubare Kunststoffe erreichen kaum Recyclinganlagen (werden vorrangig über Restmüll entsorgt)

Vorgang des Recyclings biologisch abbaubarer Kunststoffe	• Ausnahme: Bei einigen Großveranstaltungen werden beispielsweise PLA Becher separat gesammelt und in einem eigenen Recyclingstrom verwertet. • Falls biologisch abbaubarer Kunststoffe zusammen mit der Kunststofffraktion zu Recyclinganlagen gelangen, werden diese während der Vorsortierung mit anderen Störstoffen aussortiert. • Störstoffe werden wegen hoher Verunreinigung oder geringer Mengenanteile thermisch verwertet • Da auch Störstoffe nicht zu 100 % aussortiert werden können, gibt es Fälle der Verunreinigungen des Kunststoffrecyclings → biologisch abbaubare Kunststoffe wegen ihrer geringen Mengen hier kaum relevant → Eher Fälle bekannt von PVC (Polyvinylchlorid) oder PVOH (Polyvinylalkohol) → Versuche zeigen: PLA kann Eigenschaften des Rezyklates sogar verbessern → Siehe dazu (WFBR 2017): Biobased and biodegradable plastics - Facts and Figures Falls Mengen an biologisch abbaubaren Kunststoffen steigen werden, wird mechanisches Recycling v.a. für PLA als End-of-Life Option gesehen
---	---

c. THERMISCH VERWERTUNG

Relevante Produkte:

- Produkte aus Restmüll
- Aussortierte Produkte vor bzw. nach Kompostierung/Vergärung oder Recycling
- Kaum relevant: Aussortierte BAK aus Kunststofffraktion

VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER ENTSORGUNGSWEGE MENGENMÄSSIG RELEVANTER BIOLOGISCH ABBAUBARER PRODUKTE

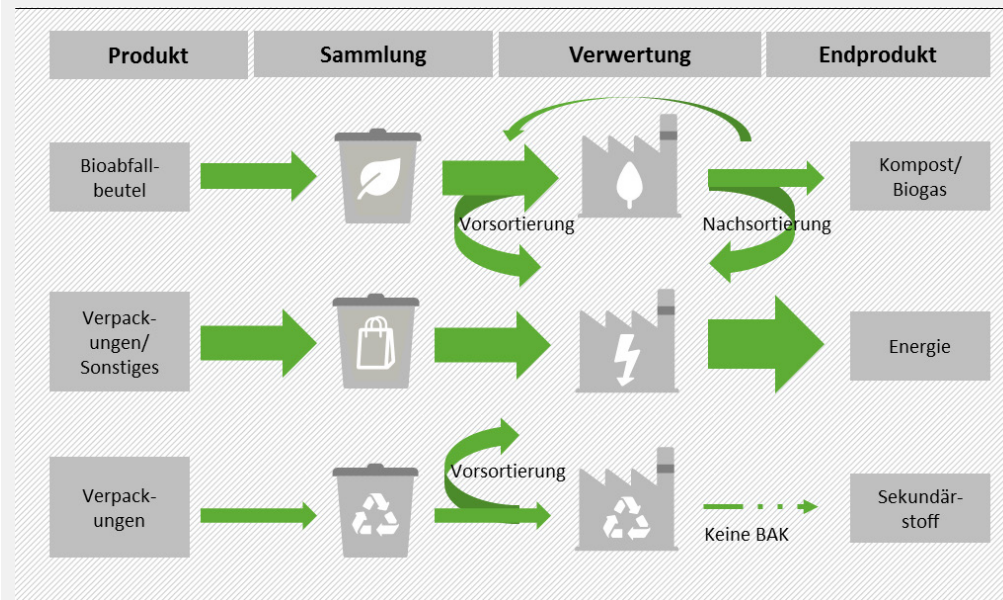
Bioabfallbeutel aus BAK: nur wenige werden über die Bioabfalltonne entsorgt. Bioabfall wird entweder industriell kompostiert oder vergoren. Die Anlagen haben unterschiedliche Ansätze: einige sortieren vor, einige nur nach. Aussortierte Stoffe werden entweder energetisch verwertet oder einem erneuten Kompostierzyklus zugeführt.

Verpackungen/Sonstiges aus BAK: werden zum Großteil über die Restmülltonne entsorgt und zusammen mit dem Inhalt energetisch verwertet.

Es gibt kaum biologisch abbaubare Kunststoffe, die über die Kunststofffraktion gesammelt werden. Die wenigen Produkte werden vor dem Recycling aussortiert und ebenfalls thermisch verwertet.

Bei einigen Großveranstaltungen werden beispielsweise PLA Becher separat gesammelt und in einem eigenen Recyclingstrom verwertet oder kompostiert.

Abbildung 9: Vereinfachte Darstellung der Entsorgungswege mengenmäßig relevanter BAK in den Niederlanden



Quelle: Eigene Darstellung

ZUSAMMENFASSUNG ENTSORGUNGSPRAXIS

Auf Grundlage verfügbarer Informationen lassen sich keine belastbaren Aussagen treffen, welcher Entsorgungsweg in den Niederlanden der Hauptentsorgungsweg biologisch abbaubarer Kunststoffe ist. Dieser ist stark vom BAK Produkt sowie der vorhandenen Infrastruktur abhängig.

Tendenz: Energetische Verwertung

Quelle: Befragung per Fragebogen und Austausch mit Länderexperten per E-Mail (Fragebogen siehe Anhang); (narocon/nova-Institut 2016) (WFBR 2017)

3.4.5 Schweden

GESETZGEBUNG	
BioEconomy Strategy 2012	Schwedens Bioökonomie legt Fokus auf biobasierte Produkte (biologisch abbaubare Kunststoffe finden dabei keine Erwähnung) aufgrund geographischer Gegebenheiten und Vorkommen an natürlichen Ressourcen
Gesetzliche Regelungen	- Keine expliziten Regelungen zu biologisch abbaubaren Kunststoffen durch die schwedische Gesetzgebung - Regelungen z.B. zur Zulassung in Kompost- bzw. Vergärungslangen auf lokaler Ebene (dazu lokale Guidelines) - Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen (klare Position) gerade in Diskussion
MARKT BIOLOGISCH ABBAUBARER KUNSTSTOFFE	
Verbrauch 2015 (Zahlen über narocon/nova-Institut 2016):	Total für Norwegen, Schweden, Dänemark und Finnland: 5.000-8.000 t/a - Anteil Schwedens nach Anteil an Bevölkerung (37 %): circa 2.400 t/a (0,245 kg/EW) - Bioabfallbeutel, Kunststoffeinkaufstüten (geringer pro Kopf Verbrauch) - Weitere: Hundekotbeutel, Bioabfallbeutel - Traditionell starke Papier- und Kartonindustrie
Angewandte Standards	- Grundsätzlich finden Standards für den biologischen Abbau wenig Anwendung - Ausnahme: Bioabfallbeutel nach EN 13432 bzw. ASTM 6400 - Lokal unterschiedlich werden auch Standards des RISE - Research Institutes Sweden angewendet
DARSTELLUNG MÖGLICHER ENTSORGUNGSWEGE BAK	
a. VERGÄRUNG UND KOMPOSTIERUNG	
Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukte:	Biologisch abbaubare Bioabfallbeutel (in geringen Mengen)
Kompostierzyklus in Schweden	Circa zwei bis drei Monate
Vorgang der industriellen Kompostierung/Vergärung biologisch abbaubare Kunststoffe	- In Schweden Vergärung der Bioabfälle größere Bedeutung als Kompostierung (kaum Bestand an großen industriellen Kompostieranlagen) - Da biologisch abbaubare Kunststoffe unter mesophilen Bedingungen kaum vergären (keine Information über Nachrotte) werden diese zum Großteil vor der Vergärung aussortiert - Nicht vollständig zersetzte/abgebaute Kunststoffreste im Kompost werden als Problem gesehen - Aussortierte Störstoffe werden energetisch verwertet

	• Oftmals auch Kompostierung von Bioabfällen im eigenen Garten (unklar ob hier auch biologisch abbaubare Bioabfallbeutel entsorgt werden)
b. RECYCLING	
Relevante biologisch abbaubare Kunststoffprodukte	Zu geringe Mengen an biologisch abbaubaren Kunststoffen → spielen keine Rolle Wenige biologisch abbaubare Kunststoffe (Verpackungen) gelangen über die Kunststofffraktion zu Recyclinganlagen
Vorgang des Recyclings biologisch abbaubarer Kunststoffe	Biologisch abbaubare Kunststoffe werden vor Recyclingprozess aussortiert und thermisch verwertet. Geteilte Meinungen, ob biologisch abbaubare Kunststoffe Recyclingprozess konventioneller Kunststoffe stören: 1. Da biologisch abbaubare Kunststoffe ähnlich zu konventionellen Kunststoffen sind, können diese nicht zu 100 % aussortiert werden und beeinträchtigen Recyclingqualität 2. Keine tatsächlichen Probleme in Praxis bekannt, wegen geringer Mengen an biologisch abbaubaren Kunststoffen

c. THERMISCHE VERWERTUNG

Hauptentsorgungsweg biologisch abbaubarer Kunststoffe in Schweden. Diese stammen entweder aus

- Vorsortierungsprozess von Vergärungs- oder Kompostieranlagen
- Restmüll
- Störstoffe aus Kunststofffraktion

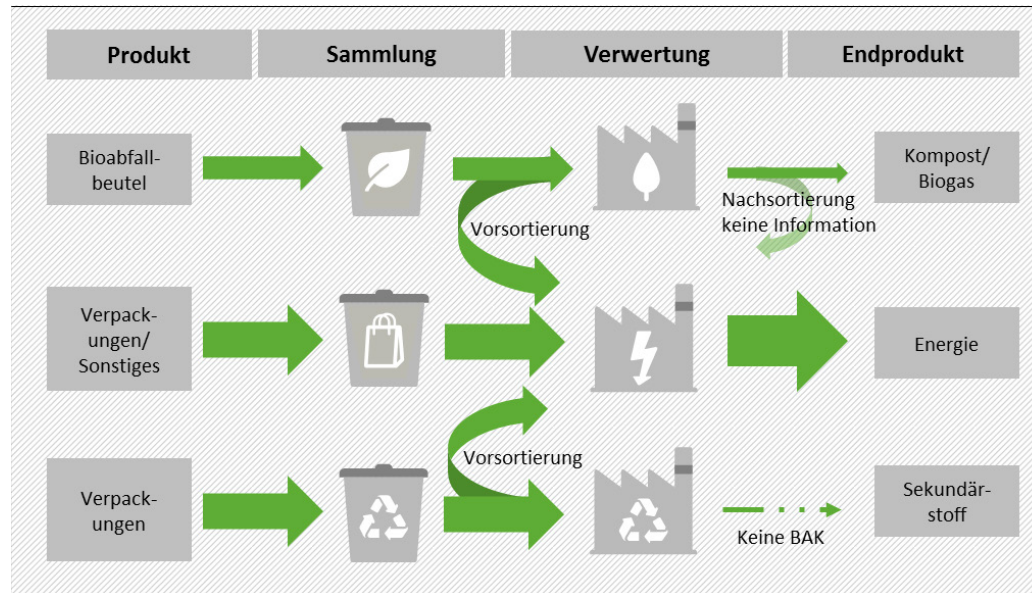
VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER ENTSORGUNGSWEGE MENGENMÄSSIG RELEVANTER BIOLOGISCH ABBAUBARER PRODUKTE

Bioabfallbeutel aus BAK: wird mit Bioabfall zu Vergärungsanlagen (in Schweden mehr Bedeutung als industrielle Kompostierung) geliefert. Biologisch abbaubare Kunststoffe vor Vergärung fast immer vorher aussortiert und mit anderen Störstoffen thermisch verwertet. Kompostieranlagen sortieren biologisch abbaubare Kunststoffe kaum aus.

Verpackungen aus BAK: biologisch abbaubarer Kunststoffe in der Kunststofffraktion werden vor dem Recyclingprozess aussortiert und thermisch verwertet.

Sonstiges aus BAK: biologisch abbaubare Kunststoffe im Restmüll werden ohne Vorsortierung verbrannt.

Abbildung 10: Vereinfachte Darstellung der Entsorgungswege mengenmäßig relevanter BAK in Schweden



ZUSAMMENFASSUNG ENTSORGUNGSPRAXIS

Auf Grundlage verfügbarer Informationen lassen sich keine belastbaren Aussagen treffen, welcher Entsorgungsweg in Schweden der Hauptentsorgungsweg biologisch abbaubarer Kunststoffe ist.

Tendenz: energetische Verwertung für BAK

Quelle: Befragung per Fragebogen und Austausch mit Länderexperten per E-Mail (Fragebogen siehe Anhang) (narocon/nova-Institut 2016)

3.5 Gegenüberstellung der Entsorgungskonzepte der Beispielländer

Basierend auf den Ergebnissen der Befragung werden die Konzepte der fünf Beispielländer in diesem Kapitel verglichen. Dabei werden verschiedene Vergleichskategorien gebildet und tabellarisch aufgelistet (Tabelle 8).

Ziel ist dabei, Rückschlüsse auf Umfang und Effektivität der Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle in den einzelnen Ländern zu ziehen und Empfehlungen für die Verwertung von Abfällen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen in Deutschland abzuleiten.

Ein umfassender Vergleich der verschiedenen Konzepte wird erschwert durch unterschiedliche Voraussetzungen sowie die begrenzte Datenlage zum Mengenaufkommen (quantitativ; qualitativ). Der Versuch, diese Unsicherheiten durch eine Expertenbefragung zu beseitigen oder zu minimieren, birgt dabei Chancen aber auch Risiken. So ist es möglich, durch nationale Experten spezifische Informationen einfach und zielführend zu erhalten und dabei auch wichtige Einstellungen oder Erfahrungen zu erfassen. Andererseits können die Aussagen aufgrund subjektiver Ziele oftmals stark variieren. Wie bereits unter Kapitel 3.4 beschrieben, wurde versucht, diese Unklarheiten durch gezieltes Nachfragen oder durch eine weiterführende Literaturrecherche zu beseitigen. Aufgrund komplexer oder oftmals kontroverser Informationen, wird in nachfolgender Tabelle teilweise mit vereinfachten Annahmen gearbeitet.

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Entsorgungskonzepte der Beispielländer²⁰

	Deutschland	Frankreich	Italien	Niederlande	Schweden
Produkte zugelassen zur industriellen Kompostierung	Bioabfallbeutel; Voraussetzung EN 13432	Grundsätzlich alle Produkte zertifiziert nach EN 13432	Alle Produkte zertifiziert nach EN 13432	Bioabfallbeutel; Voraussetzung EN 13432	Bioabfallbeutel; Voraussetzung EN 13432
Förderung spezieller BAK Produkte durch Gesetzgebung	Nein	Obst- und Gemüsebeutel Ab 2020: Einweg-Kunststoffgeschirr, Wattestäbchen	Einweg-Kunststofftüten/beutel Obst- und Gemüsebeutel	Nein	Nein
Damit verbundene Anforderung	-	Verkauf erlaubt sofern als gartenkompostierbar zertifiziert (z.B. nach NF T 51-800) + Biobasiert	Verkauf erlaubt sofern zertifiziert nach EN 13432 Industriell kompostierbar + Biobasiert	-	-
Finanzielle Anreize für BAK	Nein	Nein	Nein	Ja (Änderung in Diskussion)	Nein
Weitere gesetzliche Besonderheiten	Pflicht zur Getrenntsammlung von Bioabfällen	-	Getrennte Sammlung von organischen Abfällen mittels wieder-verwendbaren Containern oder kompostierbaren Beuteln	Pflicht zur Getrenntsammlung von Bioabfällen	-
Gesetzgebung/ Position in Bezug auf BAK	Negativ/ Indifferent	Positiv	Positiv	Indifferent	Indifferent
BAK Verbrauch (kg/EW)	2015: 0,16	2015: 0,105 2017: 0,524	2015: 0,79 2017: 0,90	2015: 0,47	2015: 0,25
Zusammenhang Gesetzgebung und Verbrauch	Keine Förderung / negative Gesetzgebung für BAK sorgt für geringe Nachfrage nach BAK	Gesetzgebung fördert steigende Nachfrage nach BAK	Positive Gesetzgebung sorgt für starken BAK Markt und große Nachfrage	Relativ hohe Nachfrage nach BAK - evtl. gefördert durch finanziellen Anreiz	Fehlende Förderung BAK durch Gesetzgebung sorgt für geringe Nachfrage
Kompost- und Vergärungsinfrastruktur	Gut ausgebaut	Im Aufbau	Gut ausgebaut	Gut ausgebaut	Gut ausgebaut

²⁰ BAK in der Landwirtschaft, dem Gartenbau, der Teichwirtschaft, der Forstwirtschaft, der Jagd und Fischerei werden hier vernachlässigt; hier wird Konsens unter den einzelnen Ländern vermutet

	Deutschland	Frankreich	Italien	Niederlande	Schweden
Kompostierzyklus	3 Wochen - max. 15 Wochen (Tendenz eher einige Wochen)	Ca. 3-6 Monate	(Infrastruktur für BAK geeignet) Ca. 3 Monate	Ca. 2-6 Wochen	Wichtig: Eigenkompostierung Ca. 2-3 Monate
Hauptentsorgungsweg BAK21	Energetische Verwertung	Energetische Verwertung/ Beseitigung	Kompostierung (regionale Abweichungen möglich)	Energetische Verwertung	Energetische Verwertung
Mögliche Begründung für Entsorgungsweg	• BAK in Restmüll zusammen mit diesem entsorgt/verwertet • Aussortierung vor/nach Kompostierung/ Vergärung und Kunststoffrecycling → Befürchtung der Minderung der Kompostqualität	• Mangelhafte Kompostierinfrastruktur (wenige Anlagen, geringe Möglichkeiten zur Getrenntsammlung) • BAK in Restmüll zusammen mit diesem entsorgt/verwertet	• Erfolgreiche Etablierung BAK in Kompost/ Vergärungsprozess → Verbot konventioneller Kunststofftüten/ -beutel verringert Fehlwürfe	• Aussortierung vor Kompostierung/ Vergärung und Kunststoffrecycling • BAK in Restmüll zusammen mit diesem entsorgt/verwertet	• Aussortierung vor Kompostierung/ Vergärung und Kunststoffrecycling • BAK in Restmüll zusammen mit diesem entsorgt/verwertet
Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle	Keine gesonderte Behandlung • BAK aus Biomüll: bei Aussortierung Behandlung mit anderen Störstoffen → energetische Verwertung; ohne Aussortierung: industrielle Kompostierung	Keine gesonderte Behandlung • BAK aus Biomüll: bei Aussortierung Behandlung mit anderen Störstoffen; ohne Aussortierung industrielle Kompostierung	• BAK aus Biomüll: Bei Aussortierung - Großteil Wiedereingliederung in neuen Kompostierzyklus aussortierter Stoffe / eigener Kompostierzyklus; ohne Aussortierung industrielle Kompostierung	Keine gesonderte Behandlung • BAK aus Biomüll: bei Aussortierung Behandlung mit anderen Störstoffen → energetische Verwertung oder Wiedereingliederung in neuen Kompostierzyklus; ohne	Keine gesonderte Behandlung • BAK aus Biomüll: bei Aussortierung Behandlung mit anderen Störstoffen → energetische Verwertung; ohne Aussortierung: industrielle Kompostierung

²¹ keine Statistiken vorliegen - Annahmen auf Basis von Expertenbefragung

	Deutschland	Frankreich	Italien	Niederlande	Schweden
	• BAK aus Restmüll: energetische Verwertung • BAK aus Kunststofffraktion: energetische Verwertung als Bestandteil der Rest- und Störstofffraktion	• BAK aus Restmüll: energetische Verwertung/ Beseitigung mit gesamten Inhalt • BAK aus Kunststofffraktion: energetische Verwertung/ Beseitigung als Bestandteil der Rest- und Störstofffraktion	• BAK aus Kunststofffraktion: energetische Verwertung/ Beseitigung als Bestandteil der Rest- und Störstofffraktion	• Aussortierung: industrielle Kompostierung • BAK aus Restmüll: energetische Verwertung mit gesamten Inhalt • BAK aus Kunststofffraktion: energetische Verwertung als Bestandteil der Rest- und Störstofffraktion	• BAK aus Restmüll: energetische Verwertung mit gesamten Inhalt • BAK aus Kunststofffraktion: energetische Verwertung als Bestandteil der Rest- und Störstofffraktion
Effektivität der Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle	• Gesteigerte Mengen an Bioabfall durch Bioabfallbeutel • Einige Anlagenbetreiber berichten von Schwierigkeiten mit BAK Bioabfallbeutel bei der Kompostierung (Verwechslungsgefahr und langsame Rotte) • Energetische Verwertung als Hauptentsorgungsweg etabliert	• Aussagen aufgrund kurzer Anpassungszeit kaum möglich • Energetische Verwertung/ Beseitigung als Hauptentsorgungsweg etabliert	• Verbot konventioneller Kunststofftüten/ -beutel führt zu geringen Fehlwürfen in Kompostieranlagen • Gesteigerte Mengen an Bioabfall durch Bioabfallbeutel • Kompostierung (mit/ohne vorgeschalteter Vergärung) etabliert	• Energetische Verwertung als Hauptentsorgungsweg etabliert • Trotz gesetzlicher Zulassung Bioabfallbeutel große Diskrepanz bei Akzeptanz der Kompost-Anlagenbetreiber • Unklare Position gegenüber BAK	• Energetische Verwertung als Hauptentsorgungsweg etabliert • Unklare Position gegenüber BAK

	Deutschland	Frankreich	Italien	Niederlande	Schweden
Mögliche Chancen für die Kompostierung von BAK	Erfahrungen mit industrieller Kompostierung	- Günstige Gesetzgebung für BAK - Junge Kompostinfrastruktur kann auf Gesetzgebung reagieren - Geplanter Ausbau der Infrastruktur - Ausreichend lange Kompostierzyklen	- Erfahrungen mit industrieller Kompostierung - Günstige Gesetzgebung - Ausreichend lange Kompostierzyklen - Lange Erfahrung mit BAK - Klare Position zu BAK	- Erfahrungen mit industrieller Kompostierung - Hohe Nachfrage	- Erfahrungen mit industrieller Kompostierung - Ausreichend lange Kompostierzyklen
Potenzielle Schwachstellen des Einsatzes von BAK	- Wenige Produkte zur Kompostierung/ Vergärung zugelassen (Bio-AbfV, DüMV) - Tendenz zu kurzen Kompostierzyklen - Zweifel der Anlagenbetreiber - Starke Vor- und Nachsortierung - Lokale Regelungen der Kompostierung (Priorisierung von bestimmten Verwertungswegen aufgrund günstiger/ ungünstiger Auslastung)	Status quo: energetische Verwertung bzw. Beseitigung große Rolle	-	- Kurze Kompostierzyklen - Indifferente Position - Wenige Produkte zur Kompostierung zugelassen	- Geringe Nachfrage - Indifferente Position - Wenige Produkte zur Kompostierung zugelassen

Die Gegenüberstellung zeigt, dass zwei der fünf Länder durch die Gesetzgebung den Einsatz biologisch abbaubarer Kunststoffe fördern: Italien und Frankreich. Frankreich fördert den Einsatz bestimmter biologisch abbaubarer Kunststoffprodukte durch die Regelung, dass Obst- und Gemüsebeutel, sowie ab 2020 Einwegcateringgeschirr und Wattestäbchen, garten-kompostierbar und biobasiert sein müssen. In Italien besteht die fördernde Regelung für biologisch abbaubare Kunststoffe darin, dass alle Einweg-Kunststofftüten und -beutel industriell kompostierbar und biobasiert sein müssen. Zusätzlich sind in Italien alle nach EN 13432 zertifizierten Produkte für die industrielle Kompostierung zugelassen. Zwar wird auch in den Niederlanden der Einsatz biologisch abbaubarer Kunststoffe durch finanzielle Anreize gefördert, eine klare Position gibt es jedoch nicht. Dies gilt ebenfalls für Deutschland und Schweden, wobei hier keine finanziellen Anreize gegeben werden.

Weiterhin wird deutlich, dass, mit Ausnahme von Italien, in keinem der Länder ein konkretes bzw. funktionierendes Verwertungskonzept für biologisch abbaubare Kunststoffe etabliert ist. So werden biologisch abbaubare Kunststoffe zum Großteil als Bestandteil der Restmüll- und Störstofffraktion (aussortiert vor oder nach des industriellen Kompostierprozess) energetisch verwertet oder beseitigt. Wie sich das Verwertungskonzept für Frankreich weiterentwickeln wird, ist zum jetzigen Zeitpunkt unklar. In Italien hingegen sind, laut Stakeholderaussagen, biologisch abbaubare Kunststoffe bereits erfolgreich in die Verwertungsstrukturen integriert, weshalb der Großteil hier industriell kompostiert wird (regionale Unterschiede möglich).

Inwiefern die identifizierten Regelungen sowie Entsorgungswege biologisch abbaubarer Kunststoffe sinnvoll und praktikabel sind, wird in Kapitel 5 diskutiert.

4 Grundlagen der biologischen Abbaubarkeit

In der natürlichen Umwelt spielen Mikroorganismen bei dem Abbau von organischen Substanzen eine wesentliche Rolle. Als Destruenten sorgen Mikroorganismen dafür, dass die jährlich in großem Umfang neu anfallenden Biomassen auch wieder abgebaut und zu Endprodukten wie Kohlendioxid oder Methan, Wasser und Mineralien mineralisiert werden. Der biologische Abbau des organischen Materials ist Teil des Energiestoffwechsels (Katabolismus), bei dem die Mikroorganismen Energie gewinnen für die Vermehrung und Synthese neuer Biomasse.

Unter aeroben Bedingungen dominiert der aerobe Atmungsstoffwechsel, welcher die höchste Energieausbeute aus dem organischen Substrat liefert. Der hohe Energiegewinn ermöglicht den Mikroorganismen eine schnelle Vermehrung und eine hohe Biomasseproduktion. Bis zu 40 % des organischen Substrates wird dabei in neue Biomasse umgesetzt.

Der biologische Abbau unter anaeroben Bedingungen erfolgt stufenweise über eine Nahrungskette mit einer Kombination aus Gärungen und der Bildung von Methan und Kohlendioxid am Ende der Kette. Die anaeroben Stoffwechselreaktionen ermöglichen nur eine im Vergleich zur aeroben Atmung geringen Energiegewinn und daher auch eine geringe Biomasseproduktion. Aus dem organischen Substrat werden nur etwa 10–20 % in Biomasse umgesetzt, der größte Anteil wird mineralisiert. Die unterschiedlichen Reaktionen hinsichtlich Abbau und Biomasse-neubildung unter aeroben und anaeroben Bedingungen haben Einfluss auf die Festlegung von Abbaukriterien in biologischen Abbauprüfungen.

Der biologische Abbau und dessen Kinetik werden vor allem durch folgende Faktoren beeinflusst:

- ▶ Anzahl der Mikroorganismen und Zusammensetzung der mikrobiellen Population,
- ▶ Umgebungsbedingungen, die die Vermehrung beeinflussen wie Wasseraktivität²², Temperatur, Sauerstoffgehalt, pH-Wert und Nährstoffgehalt,
- ▶ Bioverfügbarkeit des organischen Substrats, bei Feststoffen insbesondere Wasserlöslichkeit und Hydrolysierbarkeit.

Bei Polymeren erfolgt der biologische Abbau zweistufig. Der erste Schritt ist eine Hydrolyse der Polymerkette in kleinere Fragmente, die oftmals wasserlöslich sind und von den Zellen aufgenommen werden. An der Hydrolyse sind Enzyme beteiligt, bei einigen Polymeren wie PLA spielen auch chemisch-physikalischen Vorgänge eine Rolle. In der Zelle werden die Fragmente weiter abgebaut bis zur Mineralisierung bzw. in neue Biomasse umgesetzt.

4.1 Biologischer Abbau von Kunststoffen in verschiedenen Milieus unter optimalen Umgebungsbedingungen

Die Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit von organischen Materialien erfolgt in der Regel im Labormaßstab. Die optimalen Bedingungen für den biologischen Abbau lassen sich am ehesten unter Laborbedingungen einstellen. Parameter wie Temperatur, Feuchtigkeit und Belüftung können geregelt und kontrolliert werden. Die Erfassung der Mineralisierung über die Bestimmung der mineralischen Endprodukte (Kohlendioxid, Methan) oder über die Messung des Sauerstoffverbrauchs ist praktisch nur im Labormaßstab möglich, ebenso eine Bilanzierung der

²² Wasseraktivität: Verhältnis des Wasserdampfpartialdrucks in/über einem Medium (p) zum Sättigungsdampfdruck von reinem Wasser (p₀) bei einer bestimmten Temperatur.

Kohlenstoffverbindungen. In der Regel ist auch die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen unter Laborbedingungen höher als bei Versuchen unter Freilandbedingungen.

Da die Prüfung der biologischen Abbaubarkeit von Kunststoffen unter Einsatz von natürlich vorkommenden Mikroorganismen erfolgt, kann keine allgemein gültige Aussage zur Abbau-barkeit getroffen werden, die für alle Habitate gilt. Der Abbau ist immer in Verbindung mit den jeweiligen Umweltbedingungen und der Herkunft der verwendeten Mikroorganismen (Inokulum) zu bewerten.

4.1.1 Testverfahren zur Prüfung der biologischen Abbaubarkeit

Bei den Laborverfahren zur Prüfung der biologischen Abbaubarkeit wird die grundsätzliche biologische Abbaubarkeit von Materialien untersucht. Ein positives Ergebnis kann als Nachweis für ein natürlich vorhandenes Enzymsystem gelten, das in der Lage ist, unter den gewählten Umweltbedingungen das Prüfmaterial zu mineralisieren. Diese Labortests liefern keine Information zur Abbaukinetik in natürlicher Umwelt unter realen Bedingungen.

Bei den Labortests werden optimale und konstante Umgebungsbedingungen wie Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffversorgung und Nährstoffgehalt eingestellt. Andererseits wird ein nicht an das Prüfmaterial adaptiertes Inokulum und ein hohes Prüfmaterial/Inokulum-Verhältnis verwendet, das in der Natur in aller Regel so nicht zu erwarten ist. Somit handelt es sich bei diesen Tests trotz der optimalen Umgebungsbedingungen um stringente Tests, die sichere Aussagen zur prinzipiellen Abbaubarkeit von Materialien liefern.

Im Gegensatz zur Prüfung der biologischen Abbaubarkeit gibt es bei der Desintegrationsprüfung Empfehlungen zur Art der Prüfstücke. Die Materialien sollen in der Form eingesetzt werden, in der eine spätere Verwendung vorgesehen ist. Die Norm ISO 14855 enthält dabei Angaben zur Größe (maximale Oberfläche 2 x 2 cm² oder Granulat, Pulver).

Allgemein anerkannte Messgrößen in standardisierten Laborverfahren zur Erfassung der vollständigen biologischen Abbaubarkeit von Feststoffen im aeroben Milieu ist die Produktion von Kohlendioxid als Endprodukt der Mineralisierung. Unter aeroben Bedingungen korreliert die CO₂-Produktion eng mit dem Sauerstoffverbrauch, welcher bei einigen Testverfahren als Messgröße erfasst wird. Der mittels spezifischer Analyse oder Masseverlust erfasste Primär-abbau ist kein eindeutiger Nachweis für einen vollständigen biologischen Abbau, sondern ein Parameter zur Erfassung der Zersetzung des Prüfmaterials.

Laborverfahren zur Prüfung der biologischen Abbaubarkeit von Kunststoffen sind seit den 90er Jahren etabliert. Da die Abbaubarkeit von den verschiedenen Umweltbedingungen abhängt, sind für die verschiedenen Habitate wie Kompostierung, Boden und wässriges Milieu entsprechend angepasste Prüfverfahren entwickelt worden und als standardisierte Verfahren verfügbar (Tabelle 9).

Tabelle 9: Prüfverfahren der biologischen Abbaubarkeit

	Milieu	Temperatur	Messparameter	Masseverhältnis Prüfsubstanz/ In- okulum	Relevante Nor- men
Aerob	Kompost	57 ±2 °C	CO ₂ -Produktion	14 % (TM)	ISO 14855-1
	Kompost	25 ±5 °C	CO ₂ -Produktion	14 % (TM)	ISO 14855-1 bei 25 ±5 °C
	Süßwasser	20-25 °C	O ₂ -Verbrauch CO ₂ -Produktion	min. 100 mg/L	ISO 14851 ISO 14852

	Milieu	Temperatur	Messparameter	Masseverhältnis Prüfsubstanz/ In- okulum	Relevante Nor- men
Anaerob	Boden	20-28 °C	O ₂ -Verbrauch oder CO ₂ -Produktion	0,1 %	ISO 17556
	Meerwasser	30 ±2 °C	CO ₂ -Produktion	min. 267 mg/L	ASTM D6691
	Faulschlamm	35 °C	Produktion von CO ₂ und CH ₄ (Biogas)	200 mg/L 100 mg OC/g TM	ISO 14853
	High-Solid Gär- rest	52 ±2 °C	Produktion von CO ₂ und CH ₄ (Biogas)	1,5-2,0 % 7,5-10 % (TM)	ISO 15985

Die Prüfverfahren unterschieden sich vor allem hinsichtlich der Matrix und der Inkubations-temperatur. Bei den Abbauprüfungen werden immer Vergleichsansätze mit Inokulum und ohne Prüfmaterial mitgeführt. Ansonsten wäre eine Ermittlung der spezifischen Abbaurate des Prüf-materials nicht möglich. Zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit des Testsystems und der Ak-tivität des Inokulums werden Referenzansätze mit einem gut abbaubaren Polymer parallel mit-geführt.

Im Ökosystem Meer werden sechs verschiedene Habitate unterschieden:

- Supralitoral: Spritzwasserzone; Salzwiesen und hochgelegene Strände
- Eulitoral: Bereich der Gezeiten (Watt)
- Sublitoral: ständig unter Wasser stehender Küstenbereich; Meeresboden, Priele
- Tiefseezone
- Sediment: sublitoral und Tiefseezone
- Pelagial: Wasserkörper

Für die Prüfung im Meerwasser-Milieu existiert bisher eine Norm zur Prüfung der Abbaubarkeit im Wasserkörper (Pelagial). Für die anderen Meerwasser-Habitate wurden noch keine standar-disierten Verfahren erarbeitet.

Bei den Laborverfahren im anaeroben Milieu ist die Biogas-Produktion (CO₂ und CH₄) die aner-kannte Messgröße für den vollständigen biologischen Abbau.

Die für biologisch abbaubare Kunststoffe geforderten Abbaukriterien, d.h. der Mindestabbau-grad nach einem definierten Zeitraum, ist in Prüfprogrammen geregelt, die die Anforderungen für bestimmte Prüfziele festlegen und ebenfalls als Normen veröffentlicht sind (Tabelle 10).

Tabelle 10: Prüfprogramme mit Anforderungen an die biologische Abbaubarkeit

Prüfziel	Normen (Programme)	Anforderung an biologische Abbau- barkeit
Industrielle Kompostierbarkeit	EN 13432, ISO 17088*, EN 14995, ISO 18606*, ASTM D6400*, AS 4736	mindestens 90% oder von 90% des maximalen Wertes einer geeigneten Referenzsubstanz nach maximal 6 Mo- naten *Komponenten mit 1-10 % Gehalt müssen separat geprüft werden
Heim- und Gartenkompostier- barkeit	AS 5810, NF T 51-800	mindestens 90% oder von 90% des maximalen Wertes einer geeigneten

Prüfziel	Normen (Programme)	Anforderung an biologische Abbaubarkeit
Bioabbaubar in Boden	EN 17033	Referenzsubstanz nach maximal 12 Monaten mindestens 90% oder von 90% des maximalen Wertes einer geeigneten Referenzsubstanz nach maximal 24 Monaten
Bioabbaubar in Süßwasser	EN 13432, EN 14995; adaptiert an Süßwasser; EN 14987 (wasserlösliche/-dispergierbare Kunststoffe)	mindestens 90% oder von 90% des maximalen Wertes einer geeigneten Referenzsubstanz nach maximal 56 Tagen
Bioabbaubar in Meerwasser	ASTM D7081 (zurückgezogen)	mindestens 90% oder von 90% des maximalen Wertes einer geeigneten Referenzsubstanz nach maximal 6 Monaten

Der in allen Prüfprogrammen geforderte Abbaugrad von 90 % ist als hohes und restriktives Kriterium einzuschätzen. Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, wird ein erheblicher Anteil (bis zu 40 %) des Prüfmateri als in neue Biomasse umgesetzt. Ein Abbaugrad von 90 % ist nur erreichbar, wenn auch ein Teil der neu gebildeten Biomasse wieder mineralisiert wird. Da ein absoluter Abbaugrad von 90 % in der Regel nur nach sehr langer Versuchsdauer erreicht wird (auch bei den positiv abbaubaren Referenzproben) wird als alternatives Bewertungskriterium der Abbaugrad des Prüfmateri als im Verhältnis zum Abbaugrad der Referenzprobe bewertet. Hierbei muss ein Abbaugrad von mindestens 90 % des maximalen Wertes der Referenzsubstanz erreicht werden.

Bei der biologischen Abbauprüfung von Chemikalien im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung wird in Zusammenhang mit den Messgrößen CO₂-Produktion / O₂-Verbrauch ein Abbaugrad von 60 % gefordert (OECD 301). Auch in der früheren Version des Prüfprogramms ASTM D6400 (1999 und 2004) und der Vorläufer-Norm zu EN 13432 (DIN V 5400) wurde beim Abbaugrad zwischen Homo- und Heteropolymeren unterschieden. Für Homopolymere wurde ein Abbaugrad von 60 %, für Heteropolymere ein Abbaugrad von 90 % gefordert. In den aktuellen Prüfprogrammen gilt jetzt einheitlich der strenge Abbaugrad von 90 % für alle Werkstoffe.

Bei einigen Prüfprogrammen ist für Komponenten mit Gehalten von 1 bis 10 % im Produkt eine separate Prüfung der biologischen Abbaubarkeit vorgeschrieben (ISO 17088, ISO 18606, ASTM D6400). Selbst bei einem hohen Abbaugrad von 90 % absolut oder bezogen auf den Abbaugrad der Referenzsubstanz kann möglicherweise nicht ausgeschlossen werden, dass biologisch nicht abbaubare, organische Komponenten mit Gehalten <10 % bei der Abbauprüfung des Produktes bzw. Blends sicher erkannt werden. Die separate Prüfung dieser Komponenten sorgt für zusätzliche Sicherheit in diesem Bereich. Zur Klärung dieser Frage sind zusätzliche Untersuchungen sinnvoll.

Ein anaerober Abbau wird in den Prüfprogrammen zur Kompostierbarkeit (EN 13432, EN 14995, AS 4736) nur optional gefordert. Dabei gilt ein Abbaugrad von mindestens 50 % des theoretischen Wertes nach längstens zwei Monaten. Weitere Normen zur Prüfung der anaeroben Abbaubarkeit von Kunststoffen sind in Vorbereitung (OWS 2017).

Zusätzlich zur biologischen Abbaubarkeit sind für eine Zertifizierung von Biokunststoffen Desintegrationstests erforderlich, wobei die Zersetzung der Biokunststoffe unter praxisähnlichen Bedingungen geprüft wird.

Tabelle 11: Prüfprogramme mit Anforderungen an die Desintegration

Prüfziel	Normen (Programme)	Anforderung an Desintegration
Industrielle Kompostierbarkeit	EN 13432, ISO 17088, EN 14995, ISO 18606, ASTM D6400, AS 4736	mindestens 90% nach maximal 3 Monaten
Heim- und Gartenkompostierbarkeit	AS 5810, NF T 51-800	mindestens 90% nach maximal 6 Monaten
Bioabbaubar in Boden	EN 17033	keine Anforderung
Bioabbaubar in Süßwasser	EN 13432, EN 14995; adaptiert an Süßwasser; EN 14987 (wasserlösliche/-dispergierbare Kunststoffe)	Keine Anforderung
Bioabbaubar in Meerwasser	ASTM D7081 (zurückgezogen)	document ref. TS-OK-23.

Essentiell für die Desintegrationsprüfung ist die Angabe der Schichtdicke, mit welcher der Werkstoff geprüft wurde.

4.1.2 Kunststoffe mit nachgewiesener biologischer Abbaubarkeit

Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden Ergebnisse von biologischen Abbauprüfungen der verschiedenen Werkstoffe zusammengestellt. Dabei wurden nur Ergebnisse berücksichtigt, bei denen der Abbaugrad mittels Mineralisierung bestimmt wurde. Ergebnisse zur Zersetzung werden ggf. zusätzlich beschrieben.

In Tabelle 12 sind Ergebnisse zur biologischen Abbaubarkeit unter Kompostierungsbedingungen aufgeführt. Die Ergebnisse aus der Literatur wurden mit eigenen Versuchsergebnissen (Fraunhofer UMSICHT) ergänzt.

Tabelle 12: Biologische Abbaubarkeit (Mineralisierung) von biologisch abbaubaren Kunststoffen unter Kompostierungsbedingungen

Material	Temperatur	Abbaugrad	Zeit	Quelle
Thermoplastische Stärke-(TPS) TPS/PCL (Mater-Bi class Z)	55 °C	>80 % >90 % bezogen auf Referenz	30 Tage	(Catia Bastioli 1998)
TPS (Pulver)	58 °C	73 % 99 % bezogen auf Referenz	56 Tage	(Du et al. 2008)
TPS (500µm film)	58 °C	80 %	45 Tage	(Shin et al. 2004)
PLA (extrudiert) PLA/poultry feather fiber/Stärke 80/5/15 (0,5 cm2 Stücke)	58 °C	13 % 53 %	60 Tage	(Ahn et al. 2011)
PLA Flasche (10 mm2 Stücke)	58 °C	84 % 98 % bezogen auf Referenz	58 Tage	(Kale et al. 2007b)
PLA (amorph) PLA/PBAT (35 µm Film)	55 °C	ca. 70 % ca. 40 %	28 Tage	(Tabasi und Ajji 2015)
PHA (Film)	58 °C	79,7-90,5 %	70 Tage	(Weng et al. 2011)

Material	Temperatur	Abbaugrad	Zeit	Quelle
		95,9-108,9 % bezogen auf Referenz		
PHA (AONILEX)	58 °C	>80 % ca. 60 % bei Referenz	28 Tage	(KANEKA Corporation 2014)
PHA PHA/PBAT PBAT (35 µm Film)	55 °C	ca. 80 % ca. 45 % ca. 35 % ca. 90 % bei Referenz	28 Tage	(Tabasi und Ajji 2015)
PBS	58 °C	90 %	160 Tage	(Anstey et al. 2014)
PBS 75 % composit Pulver 100 µm		90 %	140 Tage	
PBS (Bionolle 1001 MD, 70 µm film)	58 °C	ca. 90 %	150 Tage	(Showa Denko K.K. 2015)
PBSA (Bionolle 3001 MD, 70 µm film)		ca. 90 %	50 Tage	
PBS/Stärke (Film)	58 °C	100 %	45 Tage	(Jayasekara et al. 2003)
PBAT (Pulver 500 µm)	58 °C	83 % >90 % bezogen auf Referenz	74 Tage 64 Tage	Fraunhofer UMSICHT
PBST (Pulver 500 µm)	58 °C	88,5 % >90 % bezogen auf Referenz	74 Tage 64 Tage	
PBAT (Film)	58 °C	60 %	45 Tage	(Kijchavengkul et al. 2010)
PBAT	58 °C	>90 %	80 Tage	(Breulmann 2009)
PCL (Pulver 63-250 µm)	50 °C	59 %	11 Tage	(Ohtaki et al. 1998)
PCL (500 µm Film)	58 °C	40 %	45 Tage	(Shin et al. 2004)
Cellulose-Acetat (CA)	53 °C	72 %	24 Tage	(Gu et al. 1993)
CA-1,7		78 %	60 Tage	
CA-2,5 (Pulver: 300-400 µm)				

In der Literatur wurden ausschließlich Abbauergebnisse unter thermophilen Kompostierungsbedingungen gefunden, die für das Prüfziel „Industrielle Kompostierbarkeit“ relevant sind. Leider wurde nicht bei allen Untersuchungen der Abbaugrad bis zum Erreichen einer Plateauphase bestimmt, sondern bereits nach relativ kurzer Zeit, in einem Fall bereits nach elf Tagen (Ohtaki et al. 1998) beendet. Dennoch zeigen auch diese Untersuchungen einen signifikanten Abbau der jeweiligen Polymere. Bei den Werkstoffen TPS, PHA, PLA, PBAT, PBST und PBS wird die maximal erlaubte Abbauzeit von sechs Monaten deutlich unterschritten. Hinsichtlich der Geschwindigkeit des biologischen Abbaus werden TPS und PHA am schnellsten abgebaut (ca. 30 - 45 Tage), gefolgt von PLA und den Polyestern PBAT/PBST (60-80 Tage). Am längsten mit bis zu 160 Tagen benötigt PBS für einen vollständigen Abbau, was im Wesentlichen mit einem hohen Anteil an kristalliner Struktur begründet wird (Xu und Guo 2010).

Zum biologischen Abbau des aliphatisch-aromatischen Co-Polyester PBAT wurden umfangreiche Untersuchungen in verschiedenen Milieus durchgeführt (Eubeler 2010) (Künkel 2017) (Kijchavengkul et al. 2008a) (Kijchavengkul et al. 2008b) (Künkel et al. 2016). Eine biologische Hydrolyse des Polymers erfolgt bis zu einem maximalen Terephthalsäure-Gehalt von etwa 50 %. Untersuchungen mit einem thermophilen Stamm zeigten eine Depolymerisation von PBAT (Ecoflex®) und Entstehung der Monomere Butandiol, Adipat und Terephthalat (Witt et al. 2001). Die Monomere wurden innerhalb von 21 Tagen bei 22 °C rasch abgebaut. Dabei wurden keine toxischen Effekte durch die Oligo- und Monomere gefunden.

In der Literatur sind kaum Ergebnisse zum biologischen Abbau von Kunststoffen unter Bedingungen der „Heimkompostierung“, d.h. bei Temperaturen von maximal 30 °C, zu finden. (Kale et al. 2007a) beschreibt Versuche zur Zersetzung von PLA-Flaschen (96 % L-Lactide, 12 % Kristallinität) und PLA-Schalen (94 % L-Lactide, 1,4 % Kristallinität) sowohl im realen Kompostierungsprozess mit thermophiler Phase als auch im halbertechnischen Maßstab bei Umgebungstemperatur. Hierbei wurde die Zersetzung über den Masseverlust erfasst. Nach 30 Tagen waren die PLA-Proben im industriellen Prozess nahezu vollständig zersetzt. Bei Umgebungstemperatur zeigten die PLA-Proben dagegen keine Zersetzung.

Kunststoffe aus PLA werden unter Kompostierungsbedingungen bei Temperaturen von 50-60 °C innerhalb weniger Wochen vollständig abgebaut. In Kompost und Boden unter Umgebungsbedingungen (<30 °C) erfolgt der Abbau jedoch sehr langsam (Tokiwa und Calabia 2006) (Ohkita und Lee 2006). Die für den biologischen Abbau erforderliche Hydrolyse des Polymers erfolgt in erster Linie physikalisch-chemisch bei höheren Temperaturen, bedingt u.a. durch die Kristallinität des Materials. Der amorphe Bestandteil gilt als leichter biologisch abbaubar als der kristalline Teil. Bei Kompostierung unter Umgebungsbedingungen sowie beim Abbau in Böden und Gewässern werden die erforderlichen Temperaturen nicht erreicht.

Einen Überblick über Ergebnisse zum biologischen Abbau von Kunststoffen im Boden zeigt Tabelle 13.

Tabelle 13: Biologische Abbaubarkeit (Mineralisierung) von biologisch abbaubaren Kunststoffen im Boden

Material	Temperatur	Abbaugrad	Zeit	Quelle
PBAT/PLA (Ecovio®M2351; PLA 9 %)	max. 28 °C	94 %	181 Tage	(Künkel 2017)
PHB (Mirel™ P5001, 85 µm Film)	25 °C	90,2 %	120 Tage	OWS (Wilde et al. 2016a)
PBSe* (25 µm Film)		91,7 %	120 Tage	
PBSeT** (25 µm Film)		76,7 %	318 Tage	
Cellulose Papier		92,5 %	318 Tage	
PHB (Mirel™ P5001, 85 µm Film)	28 °C	82,6 %	210 Tage	Novamont (Wilde et al. 2016a)
PBSe* (25 µm Film)		87,4 %		
PBSeT** (25 µm Film)		90,5 %		
Cellulose Papier		83,5 %		
PHBV (60 µm Film)	25 °C	65-90 %	23,4 Wochen	(Arcos-Hernandez et al. 2012)
Stärke (Pulver 20 µm)		>70 %	8,4 Wochen	
Cellulose (Pulver 20 µm)		>70 %	13,8 Wochen	
PHA (620 µm Film)	20 °C	69,2 %	660 Tage	(Gómez und Michel 2013)
Copolyester/Stärke (Ecobras™, 720 µm Film)		55,1 %		
Cellulose-Papier (350 µm)		74,2 %		
PLA (Pulver 500 µm)	20 °C	<1 %	186 Tage	Fraunhofer UMSICHT
Cellulose (Pulver 20 µm)		76 %		
Als Pulver:	25 °C	15 %	28 Tage	(Adhikari et al. 2016)
PBS		25 %		
PBS/TPS		12 %		
PLA				
PHB/HV	20-25 °C	ca. 35 %	125 Tage	(Solaro et al. 1998)
PCL		ca. 20 %		
Mater-Bi Film		ca. 18 %		
Cellulose		ca. 48 %		

Material	Temperatur	Abbaugrad	Zeit	Quelle
PLA (30 µm Film)	20-25 °C	Masseverlust:	11 Monate	(Rudnik und Briassoulis 2011)
PLA (75 µm Film)		0 %	11 Monate	
Filterpapier		0 %	3 Monate	
PE		100 %		
Prüfstück 3 mm dick: PCL/TPS (75/16), 9 % Additive	20 °C	Masseverlust: ca. 37 %	9 Monate	(Di Franco et al. 2004)

* Polybutylen-Sebacat

** Polybutylen Sebacat-cobutylenterephthalat

Anhand des Referenzmaterials Cellulose wird deutlich, dass die Abbaugeschwindigkeit im Boden bei Raumtemperatur deutlich geringer ist als unter Kompostierungsbedingungen mit Heiß-rot-tephase. Während bei der thermophilen Kompostierung nach 45 Tagen ein Abbaugrad von mindestens 70 % erreicht sein sollte, ist dieser Abbaugrad im Bodentest erst nach etwa vier bis fünf Monaten erreicht. Ähnliche Ergebnisse für Cellulose wurden auch bei Kompostierung bei 30 °C ermittelt (Fraunhofer UMSICHT).

Die Polymere PHA und fossil basierten aliphatischen und aliphatisch-aromatischen Polyester waren nach sechs bis sieben Monaten vollständig abgebaut und unterschreiten dabei deutlich die für eine Zertifizierung im Bodbereich geforderte maximale Abbaupzeit von zwei Jahren. Die Schichtdicke der Materialien spielt eine große Rolle bei der Abbaugeschwindigkeit. Polymer-Filme mit Schichtdicken von <100 µm werden deutlich schneller mineralisiert als Materialien mit Schichtdicken >500 µm.

PLA wird im Boden bei 20 °C allenfalls sehr langsam abgebaut, ähnliche Ergebnisse sind bei Kompostierungsprozessen bei Umgebungstemperatur zu erwarten.

Der biologische Abbau der Polymere PHB, PBSe und PBSeT wurde im Rahmen des Open-Bio Projektes parallel von zwei verschiedenen Laboren (OWS, Novamont) nach dem gleichen Verfahren (ISO 17556) geprüft (Wilde et al. 2016a). Beide Labore erhielten die gleichen Prüfmaterialien und verwendeten unterschiedliche Böden als Inokulum. Beide Labore erzielten ähnliche Ergebnisse. Der Abbau von PHA und dem aliphatischen Polyester PBSe zeigte einen ähnlichen Verlauf wie das Referenzmaterial Cellulose, nach vier Monaten waren beide Polymere vollständig abgebaut. Bei dem aliphatisch-aromatischen Polyester PBSeT war die Abbaugeschwindigkeit bei beiden Laboren unterschiedlich, bei OWS war nach 318 Tagen ein Abbaugrad von 76,7 % erreicht. Bei Novamont zeigten alle Proben einen ähnlichen Verlauf des Abbaus mit einem Abbaugrad > 80 % nach 210 Tagen.

Zusätzlich wurde bei OWS die Zersetzung der Proben unter Laborbedingungen untersucht. Die Polymer-Filme wurden in Diarahmen eingespannt, in 2,5 kg natürlichen Boden eingebracht und bei 25 °C inkubiert. Die Ergebnisse nach zwölf Wochen zeigt Tabelle 14.

Tabelle 14: Ergebnisse der Zersetzung im Desintegrationsversuch bei OWS (Wilde et al. 2016a)

Material	Temperatur	Zersetzungsgrad	Zeit	Quelle
PHB (Mirel™ P5001, 85 µm Film)	25 °C	90 %	12 Wochen	OWS (Wilde et al. 2016a)
PBSe* (25 µm Film)		94 %	12 Wochen	
PBSeT** (25 µm Film)		19 %	12 Wochen	
Cellulose Papier		100 %	8 Wochen	

* Polybutylen-Sebacat

** Polybutylen Sebacat-cobutylenterephthalat

Die Ergebnisse des Desintegrationsversuchs entsprechen den Ergebnissen des Abbautests von OWS. Eine vollständige Zersetzung nach drei Monaten wurde bei PHB, PBSe und der Referenz Cellulose beobachtet. Die Zersetzung des Co-Polymers PBSeT verlief langsamer und hatte nach zwölf Wochen einen Zersetzungsgrad von 19 % erreicht. Auf Basis des Ergebnisses des Abbautests kann bei PBSeT unter diesen Bedingungen nach etwa ein Jahr eine vollständige Zersetzung erwartet werden.

Im wässrigen Milieu werden zeigen einige Polymere deutlich schnellere Abbauezeiten im Vergleich zum Boden. Einen Überblick zu Ergebnissen zur biologischen Abbaubarkeit im wässrigen Milieu zeigt Tabelle 15.

Tabelle 15: Biologische Abbaubarkeit (Mineralisierung) von biologisch abbaubaren Kunststoffen im wässrigen Milieu

Material	Temperatur	Abbaugrad	Zeit	Quelle
Süßwasser-Milieu				
TPS/PCL TPS/Cellulose >85 % TPS	20-25 °C	ca. 90 % ca. 80 % ca. 95 %	55 Tage	(Catia Bastioli 1998)
PBS (Bionolle 1001 MD, 70 µm Film) PBSA (Bionolle 3001 MD, 70 µm Film)	25 °C	60 % >70 % (60 % bei Referenz)	90 Tage 50 Tage	(Showa Denko K.K. 2015)
PHA (AONILEX)	25 °C	>80 % (ca. 75 % bei Referenz)	28 Tage	(KANEKA Corporation 2014)
PLLA (PLA aus L-Lactid) (Gewebe, 45-50 % kristallin; Film, 30-35 % kristallin)	25 °C 37 °C 55 °C 60 °C	<10 % 10 % 80 % 90 %	180 Tage 180 Tage 210 Tage 120 Tage	(Itävaara et al. 2002)
PCL (Pulver) PLA (20 µm Film) TPS/PCL (Mater-Bi, 20 µm Film) PBAT (20 µm Film)	30 °C	37,7 % 3,7 % 42,8 % 15,1 % (17,3 % bei Referenz)	28 Tage	(Massardier-Nageotte et al. 2006)
PLA (Pulver 500 µm) Cellulose (Pulver 20 µm)	20 °C	<10 % >70 %	118 Tage 28 Tage	Fraunhofer UMSICHT
Ecoflex® PBAT	20 °C	<10 %	500 Tage	(Eubeler 2010)
Ecovio® 55 %PBAT/45%PLA Ecovio® 20%PBAT/70%PLA/10%Citrofol	20 °C	ca. 35 % <10 %	350 Tage	(Eubeler 2010)
Meerwasser				
PHBH (Pulver) PHBH (Film) PCL (Film) PBSA, PBAT, PBS, PLA (Film) (100 µm Film)	27 °C	ca. 52 % ca. 23 % ca. 14 % < 4 %	28 Tage	(Lepoudre 2017)
Mater-Bi® (22 µm Film) Cellulose Papier	20-25 °C sublitoral	68,9 % 76 %	236 Tage	(Tosin et al. 2012)
PCL (Pulver 500 µm)	20 °C	>90 %	28 Tage	Fraunhofer UMSICHT
Nylon 4 (25 µm Film) PHB	25 °C	ca. 80 % ca. 80 %	25 Tage 14 Tage	(Tachibana et al. 2013)

Material	Temperatur	Abbaugrad	Zeit	Quelle
Ecoflex® PBAT	20 °C	<10 %	500 Tage	(Eubeler 2010)
Ecovio® 55 %PBAT/45%PLA	20 °C	ca. 30 %	500 Tage	(Eubeler 2010)
Ecovio® 20%PBAT/70%PLA/10%Cit-rofol		<15 %		
PHB	25-28 °C	69-97 %	120-180 Tage	(Tosin et al. 2016a)
PBSe		64 - >100 %		
PBSeT*		18-92 %		
LDPE		<10 %		

*hohe Abweichung bei den Einzelparallelen

Im Süßwassermilieu sind thermoplastische Stärke und die Polymere PHA und PCL gut abbaubar und werden innerhalb von vier bis acht Wochen mineralisiert. PBS wird in etwa 3 Monaten abgebaut, das Co-Polymer PBSA sogar schneller. Bei PLA zeigt sich auch im Süßwasser die Temperaturabhängigkeit des biologischen Abbaus. Während bei 20 °C nach 180 Tagen kaum Abbau zu verzeichnen ist war PLA bei 60 °C nach 120 Tagen vollständig mineralisiert (Itävaara et al. 2002). Das Co-Polymer PBAT ist im wässrigen Milieu ebenfalls nur sehr langsam abbaubar.

Im Rahmen des Open-Bio Projektes wurde die biologische Abbaubarkeit der Polymere PHB, PBSe, PBSeT, LDPE im Frischwasser-Milieu untersucht (Wilde et al. 2016b). Das Verfahren (analog ISO 14851, ISO 14852) wurde dabei im Rahmen eines kleinen Ringversuchs (drei Labore) überprüft. Die Ergebnisse sind als Zusammenfassung im Internet verfügbar. Bei den untersuchten Polymeren wurde folgender Trend beim biologischen Abbau beobachtet: Cellulose > PHB > PBSe > PBSeT > LDPE (kein Abbau). Die Reihenfolge des Abbaus ist die gleiche wie bei den Meerwasser-Untersuchungen, die ebenfalls im Rahmen des Open-Bio Projektes durchgeführt wurden (Tosin et al. 2016a). Beim Abbautest wurde bei PBSeT sowohl im Meerwasser- als auch im Frischwasser-Test eine hohe Abweichung der Ergebnisse sowohl zwischen den teilnehmenden Laboren als auch bei den Parallelen innerhalb der Labore beobachtet. Dieser Effekt wurde nur bei den wässrigen Milieus, jedoch nicht beim entsprechenden Abbautest in Boden gefunden. Offenbar benötigen aliphatisch-aromatische Co-Polymere ein spezifisches Konsortium an Mikroorganismen insbesondere für den Primärabbau.

Im Meerwassermilieu sind, ähnlich wie im Süßwasser, stärkebasierte Werkstoffe (Mater-Bi®) und die Polymere PHA und PCL gut abbaubar und im besten Fall bereits nach 28 Tagen vollständig abgebaut. PLA und die Polyester PBS, PBAT werden dagegen nur langsam abgebaut.

Neben dem aeroben Milieu liegen auch Ergebnisse zum biologischen Abbau unter anaeroben Bedingungen vor. Die Abbauuntersuchungen bei thermophiler Temperatur (52-55 °C) wurden meist mit Feststoff-reicher Matrix (solid phase system) durchgeführt, die Versuche unter mesophilen Bedingungen (35 °C) im wässrigen Milieu Tabelle 16.

Tabelle 16: Biologische Abbaubarkeit (Mineralisierung) von biologisch abbaubaren Kunststoffen unter anaeroben Bedingungen

Material	Temperatur	Abbaugrad	Zeit	Quelle
TPS/Cellulose (Mater-Bi® class Y)	52 °C; Solid phase	90 %	14 Tage	(Catia Bastioli 1998)
PHA (AONILEX)	35 °C;	ca. 90 %	15 Tage	(KANEKA Corporation 2014)
PLA		0 % (ca. 90 % bei Referenz)		
PHA (AONILEX)	52 °C;	>60 %	15 Tage	(KANEKA Corporation 2014)
PLA	Solid phase	ca. 25 %		

Material	Temperatur	Abbaugrad	Zeit	Quelle
		(>80 % bei Referenz)		
PHBV; PHBH (Pulver 500 µm)	35 °C	>90 %	28 Tage	Fraunhofer UMSICHT
PLLA (PLA aus L-Lactid) (Gewebe, 45-50 % kristallin; Film, 30-35 % kristallin)	37 °C; 52 °C; Solid phase	60 % 60 %	100 Tage 40 Tage	(Itävaara et al. 2002)
PCL (Pulver 250 µm)	55 °C	91 %	47 Tage	(Yagi et al. 2009)
PLA (Pulver 250 µm)		91 %	75 Tage	
PCL (Pulver 500 µm)	35 °C	>90 %	72 Tage	Fraunhofer UMSICHT
PCL	55 °C	80 %	50 Tage	(Yagi et al. 2013)
PLA		75 %	75 Tage	
PHB		90 %	14 Tage	
PBS		0 %	100 Tage	
(alles Pulver 125-250 µm)				
PCL (Pulver)	35 °C	0 %	28 Tage	(Massardier-Nageotte et al. 2006)
PLA (20 µm Film)		0 %		
TPS/PCL (Mater-Bi®, 20 µm Film)		23 %		
PBAT (20 µm Film)		0 %		
		(62,2 % bei Referenz)		
PBS; PBST; PBAT (Pulver 500 µm)	35 °C	<10 %	44 Tage	Fraunhofer UMSICHT
Copolyester/Stärke (Ecobras™, 720 µm Film)	52 °C Solid phase	20,2 %	50 Tage	(Gómez und Michel 2013)
Cellulose-Papier (350 µm)		74,1 %		

Bei mesophiler Temperatur ist das Polymere PHA im anaeroben Milieu bereits nach spätestens vier Wochen vollständig abgebaut. PCL wird unter diesen Bedingungen ebenfalls abgebaut, allerdings langsamer. Ein vollständiger Abbau ist erst nach über zwei Monaten erreicht.

PLA ist unter anaeroben Bedingungen abbaubar, allerdings nur bei höherer Temperatur.

Polyester wie PBS und PBAT scheinen unter anaeroben Bedingungen nicht abbaubar.

Die Abbaueigenschaften der verschiedenen Polymere spielen eine große Rolle hinsichtlich der Zertifizierung im Anwendungsbereich. Bei der Zertifizierung für die Heim- und Gartenkompostierung (z.B. OK Compost HOME) sind keine PLA-basierten Werkstoffe zu finden bzw. Blends mit nur geringem PLA-Gehalt. Hier dominieren die bei Umgebungsbedingungen gut abbaubaren Werkstoffe wie Stärke-basierte Materialien, PHA und PBS. Zertifikate für Werkstoffe mit Anwendung im wässrigen Milieu wurden bisher für PHA-basierte Materialien erteilt (Vinçotte 2017a). Neben dem Werkstoff-Typ spielt die Schichtdicke eine wichtige Rolle für den jeweiligen Anwendungsbereich. In Tabelle 17 sind beispielhaft einige zertifizierte Werkstoffe gelistet.

Tabelle 17: Bei Vinçotte zertifizierte Werkstoffe mit Schichtdicken

Markenname	Polymer	Schichtdicken [µm]		
		OK Compost	OK Compost HOME	OK biodegradable MARINE
Ecovio FT 2341	PBAT/PLA	249	53	
BIOPLAST 505	Stärke-Blend	250	37	
BIOPLAST 500	Stärke-Blend	172	65	
Mater-Bi NF 01U	Stärke-Blend	100	67	
Mater-Bi EF 01A	Stärke-Blend	100	16	
AONILEX X151A	PHA	130	130	47
MIREL M2100	PHA	690	1000	45
RWDC PHA Copolymer	PHA	390	85	85
DaniMer 12291	PHA	90	90	
Meridian	PHA	430	430	19
BioPBS FD 92	PBS	87	85	
GS Pla FD92	PBS	87	85	
BIONOLLE 5001 MD	PBS	126	126	
BIONOLLE STARCLA 10XIn	PBS	129	79	

Quelle: Eigene Darstellung nach (Vinçotte 2017b) (Vinçotte 2017c) (Vinçotte 2017a)

Einige Werkstoffe sind für mehrere Anwendungen zertifiziert und unterscheiden sich dabei nur in der Schichtdicke. Die maximalen Schichtdicken für „OK Compost HOME“ sind bei Stärke-Blends und PBAT/PLA-Blend deutlich geringer als für „OK Compost“ (industrielle Kompostierung). Bei PHA und PBS sind die maximalen Schichtdicken für beide Zertifikate meist gleich, ein weiterer Hinweis auf eine gute Abbaubarkeit bei Umgebungstemperatur. Bei den für die Anwendung im Meeresmilieu zertifizierten PHA-Werkstoffen sind die maximalen Schichtdicken noch deutlich geringer.

4.2 Zeitraum der Zersetzung in situ im Boden, Süßwasser und Meerwasser unter realen Bedingungen

Die auf einer Literaturrecherche basierte Ermittlung der Zeiträume des biologischen Abbaus unter naturnahen, realen Bedingungen erfolgte für die Umweltkompartimente Süßwasser, Meerwasser und Boden. Der Schwerpunkt lag auf dem Kompartiment Boden, da hier ein wesentlicher Eintragspfad für biologisch abbaubare Kunststoffe zu sehen ist. Der Eintrag kann über direkte Anwendung von Kunststoffen im Boden, z.B. Mulchfolien, oder ungezielten Eintrag erfolgen.

In realen Umweltkompartimenten ist es aufgrund der offenen Systeme nicht möglich, gezielt den biologischen Abbau über die Erfassung des entstehenden Endproduktes Kohlendioxid zu bestimmen. Wichtigster Parameter ist daher die Bestimmung der Zersetzung des Kunststoffes, meist über den Masseverlust und/oder Oberflächenbestimmung bzw. visuelle Beurteilung.

4.2.1 Zersetzung im Boden

Erste Untersuchungen zur Zersetzung von biologisch abbaubaren Kunststoffen in realen Böden wurden bereits in den 90er Jahren durchgeführt. In Frankreich wurden insgesamt 20 verschiedene Proben aus unterschiedlichen Polymeren (PHB, PHBV, PCL, TPS mit Additiv, PCL/TPS, PLA, Zellophan, PE/Stärke mit Additive, PE) an 4 verschiedenen Standorten in den Boden eingebracht (Calmon et al. 1999). Die Filmproben (20 cm²) wurden in Rahmen befestigt. Die 4 Standorte repräsentierten 4 verschiedene klimatische Bedingungen: ozeanisch (Schluff, viel Organik), mediterran (Schluff/Sand) und 2 x kontinental (1. Sandboden, 2. Schluff/ Sand/ Ton). Die durchschnittliche Temperatur an den Standorten betrug 10,6-14,5 °C. Nach vier, sechs, neun, 12, 18, und 24 Monaten wurden Proben entnommen und auf Zersetzung kontrolliert. Erfasst wurden der Masseverlust, zusätzlich wurde eine Bildanalyse der zersetzten Oberflächen durchgeführt. Nach 24 Monaten wurde eine vollständige Zersetzung bei den Proben aus PHB, PCL, PCL/TPS, Zellophan an allen Standorten festgestellt. Eine teilweise bis vollständige Zersetzung wurde beim TPS-Film mit Additiv gefunden in Abhängigkeit der Schichtdicke (35 µm 72-99 %, 116 µm 32-52 %). Stark schwankende Zersetzungsergebnisse wurden bei PLA gefunden (0-100 % Zersetzung). PE wurde nicht zersetzt. Je geringer die Schichtdicke der jeweiligen Polymerproben, desto höher war der Zersetzungsgrad.

Die Zersetzung von Kunststoffbeuteln aus Stärke-basiertem Polymer (Mater-Bi®) in landwirtschaftlich genutztem Boden wurde in Italien untersucht (Accinelli et al. 2012). Die Folienstücke wurden für drei Monate während der Sommermonate in den Boden eingebracht. Parallel wurden Zersetzungsuntersuchungen in Boden und Kompost im Labor unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Während unter Laborbedingungen eine deutliche Zersetzung nach drei Monaten (Kompost 43 %, Agrarboden 37 %) gefunden wurde, war die Zersetzung der Proben unter Feldbedingungen mit <5 % sehr gering. Der geringe Zersetzungsgrad wurde auf den relativ trockenen Boden während der Sommermonate zurückgeführt.

In Griechenland wurden PLA-Filmproben (20-400 µm) und PLA-Fasern in Kunststoffnetze platziert und in mediterranen Boden eingebracht (Rudnik und Briassoulis 2011). Der Versuch dauerte elf Monate von Oktober 2007 bis September 2008. Die Beurteilung der Zersetzung erfolgte durch optische Beurteilung und Bestimmung von mechanischen Eigenschaften. In diesem Feldtest wurde bei den PLA-Filmproben eine Fragmentierung und allenfalls geringe Zersetzung gefunden, die PLA-Fasern wurden nicht zersetzt.

In China wurde die Zersetzung von PBAT, PLA, und PBAT/PLA-Blends in realem Boden bestimmt (Weng et al. 2013). Die Film-Proben wurden für die Dauer von vier Monaten in den Boden eingebracht und darüber eine Rasenfläche angelegt. Nach vier Monaten war der PBAT Film weitgehend zersetzt. Von dem PLA-Film waren nach vier Monaten ebenfalls nur wenige Reststücke zu finden, bei dem PBAT/PLA-Blend war die Zersetzung geringer als bei den reinen Polymeren.

In Vietnam wurde die Zersetzung von verschiedenen PHA-Film-Proben (PHB, PHBV; je 100 µm Schichtdicke; platziert in Gazebeutel) in Böden an zwei verschiedenen Standorten unter tropischen Bedingungen untersucht (Boyandin et al. 2013). Die mittlere Temperatur betrug 26-31 °C, die Versuchsdauer zehn bis 12 Monate. An dem Standort Hoa Lac war die PHB-Probe am Ende vollständig, die PHBV-Probe zu 61 % zersetzt. An dem Standort Dam Bai wurde eine geringere Zersetzung der Proben (47 % für PHB, 14 % für PHBV) festgestellt. Allerdings zeigten beide Standorte etwas unterschiedliche Bedingungen, bei Hoa Lac waren mehr Niederschläge zu verzeichnen und der pH-Wert im Boden etwas niedriger (pH 5.5 in Hoa Lac, pH 6,6 in Dam Bai).

Die Zersetzung von PBS (Bionolle 1001 MD, 100 µm Film) und PBSA (Bionolle 3001 MD, 100 µm film) im Boden wurde an 18 verschiedenen Standorten in Japan untersucht (Showa Denko K.K.

2015). Die Zersetzungsraten zeigten eine starke Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchtigkeit. Bei PBS wurde ein Zersetzungsgrad von <10 % nach 360 Tagen bis >90 % nach 300 Tagen gefunden, bei PBSA ca. 20 % nach 360 Tagen bis >90 % nach 270 Tagen.

Neben den Feldversuchen zur Zersetzung von biologisch abbaubaren Kunststoffen im Boden werden diese Werkstoffe für den Einsatz als Mulchfolien im Agrarbereich erprobt und als Alternative zu den konventionellen PE-Folien getestet (Moreno et al. 2017). Im Vordergrund stehen vor allem die Anwendungseigenschaften, in einigen Fällen wurde auch die Zersetzung erfasst. Zum Einsatz kommen vorwiegend Stärke-basierte Materialien. Die Schichtdicken liegen meist bei 15- -35 µm.

In den USA wurde die Zersetzung von PBAT-basierter Mulchfolie auf einem Agrarboden mit Tomatenpflanzung in den Jahren 2006 und 2007 untersucht (Ngouajio et al. 2008). Nach 76 Tagen (in 2006) bzw. 54 Tagen (in 2007) betrug der Zersetzungsgrad der Mulchfolien >90%. Die zum Vergleich parallel untersuchte PE-Folie zeigte dagegen einen Zersetzungsgrad von weniger als 2 %.

Ebenfalls in den USA wurde die Zersetzung verschiedener Mulchfolien über eine Periode von 24 Monaten im Feldversuch in Agrarboden an drei verschiedenen Standorten untersucht (Li et al. 2014). Bei den Folien handelte es sich um eine Cellulose-basierte Mulchfolie, 2 Stärke-basierte Folien und eine experimentelle PLA-Folie, welche in feinmaschigen Netzbeuteln (250 µm Maschenweite) in die Böden eingebracht wurden. Die Cellulose-Mulchfolie war nach 12 Monaten an allen Standorten vollständig zersetzt. Bei den Stärke-basierten Folien betrug der Zersetzungsgrad zwischen 11-98 %, je nach Standort und Umgebungsbedingungen. Die PLA-Folie war nach 24 Monaten an keinem Standort zersetzt.

Die Zersetzung von Stärke-basierter Mater-Bi®-Mulchfolie in Agrarboden wurde in Portugal untersucht (Costa et al. 2014). Die Filmproben wurden in Plastikrahmen mit Netz eingespannt und in den Boden eingebracht. Der Untersuchungszeitraum betrug fünf Monate von April bis September. Mittels Bildauswertung wurde der Verlust an Oberfläche bestimmt. Nach fünf Monaten wurde noch keine Zersetzung der Mulchfolie festgestellt. Allerdings herrschte während des Versuchszeitraums eine lange Trockenperiode.

In Australien wurde die Zersetzung von Mulchfolie bestehend aus Stärke und aliphatischem Polyester im Rahmen des Tomaten- und Paprika-Anbaus untersucht (Halley et al. 2001). Bereits zwei Wochen nach Unterpflügen der Folie waren keine Reststücke mehr sichtbar. Bei einem Erdbeerfeld in Italien wurde eine Mater-Bi®-basierte Mulchfolie eingesetzt (Kapanen et al. 2008). Nach der Ernte wurde die Folie untergepflügt. Ein Jahr nach Unterpflügen wurden weniger als 4 % an Folienrückständen gefunden.

Die Ergebnisse der Recherche zeigen, dass die Zersetzung von biologisch abbaubaren Kunststoffen unter realen Bedingungen im Boden stark von den Umgebungsbedingungen, vor allem Temperatur, Feuchtigkeit und pH-Wert abhängig ist. Stärke-basierte Polymere, PHA, PCL, PBAT, PBS, und PBSA sind im Boden, bei guten Bedingungen, nach etwa 12 Monaten vollständig zersetzt. Damit zeigen die Werkstoffe, die sich im entsprechenden Labortest (Abbaubarkeit im Boden) als biologisch abbaubar erwiesen haben, auch eine Zersetzung unter realen Bedingungen im Boden. Beim Einsatz als Mulchfolien wurde gezeigt, dass bei den verwendeten Werkstoffen (z.B. Mater-Bi®, PBAT) eine weitgehende Zersetzung nach wenigen Monaten möglich ist. Aufgrund der geringen Schichtdicke von Mulchfolien steht bei der Beurteilung des Umweltverhaltens die Prüfung der biologischen Abbaubarkeit im Vordergrund. Eine zusätzliche Prüfung der

Zersetzung unter mehr realen Bedingungen, wie für die Prüfung der Kompostierbarkeit erforderlich, wird für biologisch abbaubare Mulchfolien entsprechend der Norm EN 17033 nicht verlangt.

Bei PLA-Werkstoffen wurden bei den Feldversuchen im Boden stark schwankende Ergebnisse zur Zersetzung gefunden, von nicht zersetzt bis vollständig zersetzt nach zwei Jahren. Ein Problem ist hier möglicherweise eine schlechte Wiederfindungsrate von Bruchstücken, da PLA-Filme im Boden zur Versprödung neigen und zerfallen können. Eine geringe Zersetzung von PLA im Boden stimmt dagegen mit den Ergebnissen der Abbauprüfungen im Labor überein, die eine sehr geringe biologische Abbaubarkeit von PLA im Boden bei Raumtemperatur zeigen.

4.2.2 Zersetzung in Süßwasser

Zur Zersetzung von biologisch abbaubaren Kunststoffen in realen Süßwasser-Kompartimenten gibt es nur wenige Publikationen (Brandl und Püchner 1992) (Gilmore et al. 1993) (Volova et al. 2007) (Showa Denko K.K. 2015) (Accinelli et al. 2012)

Die Zersetzung von PBS (Bionolle 1001 MD, 100 µm film) und PBSA (Bionolle 3001 MD, 100 µm film) in einem Fluss und im Meer in Japan beschreibt (Showa Denko K.K. 2015). PBS zeigte im Fluss einen Zersetzungsgrad von 90 % nach 200 Tage, im Meer nur ca. 10 % nach 360 Tagen. Der Co-Polyester PBSA scheint im wässrigen Milieu leichter abbaubar: im Fluss wurde ein Zersetzungsgrad von 90 % nach 180 Tagen erreicht, im Meer ca. 60 % nach 360 Tagen.

In der Schweiz wurde die Zersetzung von Produkten aus PHA (Biopol® Shampoo-Flaschen, Film mit 17 µm) im Luganer See untersucht (Brandl und Püchner 1992). Es handelt sich um ein eutrophisches Gewässer (hoher Nährstoffgehalt) mit deutlicher Schichtung, d.h. anoxischer Zone ab ca. 40 m Wassertiefe in den Sommermonaten. Die Proben wurden in unterschiedlichen Wassertiefen und auf dem Sediment in 85 m Tiefe platziert. Der Versuchszeitraum betrug 254 Tage. Die physikalisch-chemischen Bedingungen waren unterschiedlich je nach Wassertiefe. Die Wassertemperatur betrug 6 °C in 40 m Tiefe bis 20 °C an der Oberfläche. Die PHA-Filmproben wurden alle innerhalb des Versuchszeitraums vollständig zersetzt, auch im anoxischen Bereich bei Temperaturen von 6 °C. Die Zersetzung der PHA-Flaschen verlief wesentlich langsamer. Bei den Proben in 85m Tiefe waren nach 254 Tagen ca. 10% zersetzt, in 20m Tiefe nach 260 Tagen etwa 16%.

Die Zersetzung von PHBHV-Film (500µm) im Belebungsbecken einer Abwasserreinigungsanlage wurde in den USA untersucht (Gilmore et al. 1993). Die Filmproben wurden für fünf Monate etwa 0,5 m tief in das Belebungsbecken gehängt. In einer ersten Versuchsreihe betrug die Temperatur im Belebungsbecken etwa 12-20 °C, der Zersetzungsgrad betrug ca. 50 % nach fünf Monaten. Während der zweiten Versuchsserie in den Sommermonaten lag die Temperatur bei 18-22 °C und die PHBHV-Filme waren bereits nach 90 Tagen vollständig zersetzt. Parallel untersuchte Filmproben aus PE-Blends zeigten dagegen keine Zersetzung.

In Russland wurde die Zersetzung von PHB- und PHBHV-Filmproben (70-100µm) in einem Stausee mit 8m Wassertiefe während der Sommermonate von 1999 bis 2001 untersucht (Volova et al. 2007). Es handelt sich um ein eutrophisches Gewässer. Die Filmproben wurden in 1 m Wassertiefe eingebracht. Der Co-Polyester PHBHV erwies sich als schneller zersetzbar als das Homopolymer PHB, was auf die höhere Kristallinität von PHB zurückgeführt wurde. Die Wassertemperatur schwankte zwischen 10-25 °C und hatten großen Einfluss auf die Zersetzungsgeschwindigkeit. Für die PHA-Filme wurden Halbwertszeiten von 17-66 Tage für dieses Habitat ermittelt.

Die Zersetzung von Stärke-basierten Kunststoffbeuteln (Mater-Bi®) wurde unter realen Bedingungen in einer Süßwasser-Lagune und in Meerwasser an der Adria in Italien untersucht (Acci-

nelli et al. 2012). Die Proben wurden 1 m Wassertiefe (Lagune) bzw. 20 m (Meerwasser) eingebracht, die Versuchsdauer betrug drei Monate von Mai bis Juli. Die Zersetzung im Süßwasser-Milieu betrug am Ende 1,5 %, im Meerwasser 4,5 %. Die Ergebnisse aus den Feldversuchen stimmten dabei mit parallel geführten biologischen Abbautests im Labor (Verwendung von gleichem Inokulum wie bei Feldhabitat) überein.

Zur Zersetzung von biologisch abbaubaren Kunststoffen im Süßwasser-Milieu wurde hauptsächlich mit PHA-Polymeren untersucht. In allen untersuchten Süßwasser-Habitaten wurde PHA zersetzt. Die Geschwindigkeit der Zersetzung unter realen Bedingungen wird vor allem von den Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Sauerstoffgehalt beeinflusst. Der Zeitraum für eine vollständige Zersetzung unter realen Bedingungen ist länger als bei den entsprechenden Prüfungen zur biologischen Abbaubarkeit, welche die Einstellung optimaler Umgebungsbedingungen erlauben. Während unter Laborbedingungen ein vollständiger Abbau von PHA bereits nach vier Wochen erzielt wird, ist eine vollständige Zersetzung unter realen Bedingungen erst nach mehreren Monaten erreicht.

4.2.3 Zersetzung in Meerwasser

Eine aktuelle Publikation beschreibt die Zersetzung von PCL-Film (60 µm) unter realen Bedingungen in der Ostsee (Heimowska et al. 2017). Die Proben wurden etwa 2 m unter der Wasseroberfläche im Hafen von Gdynia (Polen) eingebracht und über drei Monate (Juni bis August) beobachtet. Die Wassertemperatur betrug 17-20 °C, der pH-Wert war leicht alkalisch (8,2-8,9) und der Sauerstoffgehalt sorgte für aerobe Bedingungen. Nach sechs Wochen waren die PCL-Proben vollständig zersetzt. Parallelversuche in einem Süßwasserteich zeigten dagegen eine langsamere Zersetzung von 39 % nach 42 Wochen. Angaben zum Nährstoffgehalt der Gewässer sind nicht angegeben.

Verschiedene Proben von Kunststoffbeuteln wurden im Mai 2008 im Hafen von Plymouth im Meerwasser unter realen Umweltbedingungen auf Zersetzung untersucht (O'Brine und Thompson 2010). Bei den Materialien handelte es sich um zwei sogenannte oxo-fragmentierbare Produkte, eine kompostierbare Mater-Bi®-Folie und PE-Beutel. Die Proben wurden 0,6 m unterhalb der Wasseroberfläche eingebracht, die Versuchsdauer betrug 40 Wochen. Die kompostierbare Folie war nach 16 Wochen vollständig zersetzt, bei den beiden oxo-fragmentierbaren Produkten und der PE-Folie betrug der Zersetzungsgrad nach 40 Wochen <2 %.

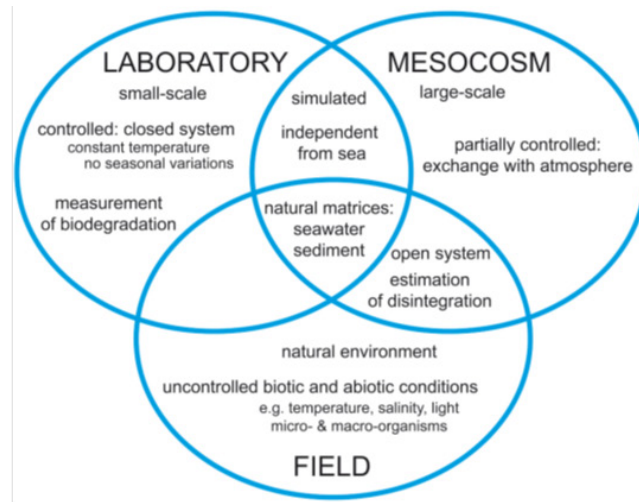
Die Zersetzung von verschiedenen Kunststoffbeuteln wurde unter realen Bedingungen an der Küste von Elba im Mittelmeer untersucht (Pauli et al. 2017). Bei den Proben handelte es sich um PE-Beutel (20 µm Schichtdicke) und Mater-Bi®-Beutel (22 µm Schichtdicke). Die Untersuchung erfolgte in zwei Habitaten: im Wasserkörper (25 m Tiefe) und am Meeresboden in 36 m Tiefe. Die durchschnittliche Wassertemperatur betrug 19 °C. Der Versuchszeitraum betrug ein Jahr von September 2013 bis Juli 2014. Im Wasserkörper war die Mater-Bi®-Probe nach einem Jahr zu etwa 60 % zersetzt, am Meeresboden zu etwa 25 %. Die PE-Proben wurden in beiden Habitaten nicht zersetzt.

Die Zersetzung von PHB und PHBHV-Filmproben (100 µm Schichtdicke) wurden im tropischen Meer vor Vietnam untersucht (Volova et al. 2010). Die Proben wurden in ca. 1,20 m Wassertiefe eingebracht, die Versuchsdauer betrug vier Monate. Die Wassertemperatur betrug 27-30 °C, der pH-Wert 7-7,5, der durchschnittliche Salzgehalt 3,5 %. Nach 160 Tagen betrug der Masseverlust bei beiden Polymer-Typen 54- 58 %.

Umfangreiche Versuche zur biologischen Abbaubarkeit und Zersetzung im Meerwasser-Milieu wurden im Rahmen des Open-Bio Projektes durchgeführt (Tosin et al. 2016c) (Tosin et al. 2012). Die Untersuchungen umfassten Labortests zur Prüfung der biologischen Abbaubarkeit, halb-

technische Mesocosm-Versuche zur Bestimmung der Zersetzung mit Simulation verschiedener Habitats unter kontrollierten Bedingungen bis zu Feldversuchen in realen Meereshabitats. Die wesentlichen Charakteristika und Überschneidungen der verschiedenen Testsysteme zeigt Abbildung 11.

Abbildung 11: Testschema zur Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit und Zersetzung im Meer



Quelle: (Tosin et al. 2016b)

Von den verschiedenen Meereshabitats wurde folgende für die Versuche ausgewählt:

- ▶ Eulitoral: Bereich der Gezeiten (Watt); aerob
- ▶ Sedimentzone; sublitoral (Phasengrenze Wasser/Meeresboden); aerob
- ▶ Pelagial: Wasserkörper; aerob

Für die Prüfung der biologischen Abbaubarkeit im Wasserkörper (Pelagial) sind standardisierte Verfahren verfügbar (Kapitel 4.1.1), für die anderen Testsysteme wurden im Rahmen des Projektes einheitliche Prozedere für alle Projektteilnehmer erarbeitet, um möglichst gut vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Insgesamt waren fünf Labore an dem Projekt beteiligt. Die Wasser- bzw. Sedimentproben für die Labor- und Mesocosm-Versuche wurden an zwei verschiedenen Standorten im Mittelmeer entnommen, an denen auch die Feldversuche durchgeführt wurden: Salamis (Griechenland) und Elba (Italien). Alle Versuche wurden in zwei Durchgängen in zwei nacheinander folgenden Jahren durchgeführt.

Die Untersuchung erfolgte mit den Polymeren PHB, PBSe, PBSeT und LDPE (negative Referenzprobe), Cellulose wurde zum Teil als positiv (abbaubare) Referenz eingesetzt. Die Ergebnisse zur biologischen Abbaubarkeit im Wasserkörper sind in Kapitel 4.1.2 beschrieben.

Die Ergebnisse aus den Laborversuchen zur Prüfung der biologischen Abbaubarkeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ PHB wurde in allen Habitats abgebaut und eignet sich als Positivkontrolle
- ▶ LDPE wurde in keinem der Habitats abgebaut und blieb vollständig intakt
- ▶ Die Polyester PBSe und PBSeT zeigten mit steigender Versuchsdauer einen zunehmenden Abbau im eulitoral Habitat und im sublitoral Sedimentbereich. PBSe scheint insgesamt

leichter abbaubar als das aliphatisch-aromatische Co-Polymer PBSeT. Die Untersuchungen im Wasserkörper zeigten uneinheitliche Ergebnisse, sowohl zwischen den Laboren als auch bei den Parallelen innerhalb der Labore. Als Begründung wird eine niedrigere Mikroorganismen-Konzentration im Wasserkörper im Vergleich zu den anderen Habitaten vermutet.

Bei den Mesocosm-Versuchen wurden die dieselben drei Habitate in getrennten Tanks simuliert und unter kontrollierten Bedingungen (Licht, Temperatur, Gezeiten, Wasserqualität) ein Jahr lang inkubiert (zweimal nacheinander). Alle Polymere mit Ausnahme von LDPE wurden mehr oder weniger stark zersetzt (<50 % bis 90 % nach einem Jahr), Unterschiede zeigten sich zwischen den Polymer-Typen und Habitaten. Allerdings wurden bei diesen Versuchen ebenfalls hohe Abweichungen der Ergebnisse verzeichnet, die eine weitere Optimierung des Verfahrens erfordern. Ein Trend hinsichtlich Zersetzung ließ sich weder für die Polymere noch für die Habitate erkennen.

Für die Felduntersuchungen wurden die gleichen Polymere in Rahmen eingesetzt und an den beiden mediterranen Standorten in Griechenland und Italien in den drei bereits beschriebenen Habitaten ausgebracht (Lott et al. 2016). Für eine Einschätzung und Bewertung der Zersetzung von Kunststoffen ist bei Felduntersuchungen die genaue Charakterisierung der Feldbedingungen und Erfassung von physikalisch-chemischen Parametern wie Temperatur, pH-Wert, Salz- und Sauerstoffgehalt sowie Nährstoffgehalt notwendig. An beiden Standorten fand in allen Habitaten eine Zersetzung der Polymere mit Ausnahme von LDPE statt. In manchen Habitaten erfolgte die Zersetzung sehr langsam, z.B. im Wasserkörper (Pelagial) vor der Insel Elba, was auf einen geringen Nährstoffgehalt im Wasser zurückzuführen sein könnte. Ein weiteres im Projekt adressiertes Problem sind die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren zur Erfassung der Zersetzung bei Feldversuchen. Bei der Bestimmung der Zersetzung über den Masseverlust der Probe werden Ergebnisse oftmals durch anhaftende Verunreinigungen und Biofilmbewuchs verfälscht. Zuverlässiger scheint die Bestimmung über die Oberflächenabnahme mittels Bildanalyse zu sein.

Generell wird betont, dass die Bestimmung der Zersetzung in Mesocosm- und Feldversuchen allein keine ausreichende Information zum Abbau von Kunststoffen in der Umwelt liefert, sondern immer in Zusammenhang mit Ergebnissen zur biologischen Abbaubarkeit (Mineralisierung) aus den Labortests bewertet werden muss (Lott et al. 2016).

Biologische abbaubare Kunststoffe wurden auch für Anwendungen im marinen Bereich (Fischernetze u.Ä.) erprobt (Kim et al. 2016) (Kim et al. 2014) (Kim et al. 2013). Zur Herstellung eines biologisch abbaubaren Treibnetzes wurde eine Faser erprobt, bestehend aus einem Blend mit 82 % PBS und 18 % PBAT (Kim et al. 2016). Neben den Anwendungseigenschaften wurde die Zersetzung der Fasern mit Elektronenmikroskopie untersucht. Hierbei war erst nach zwei Jahren eine beginnende Zersetzung der Faseroberfläche zu erkennen.

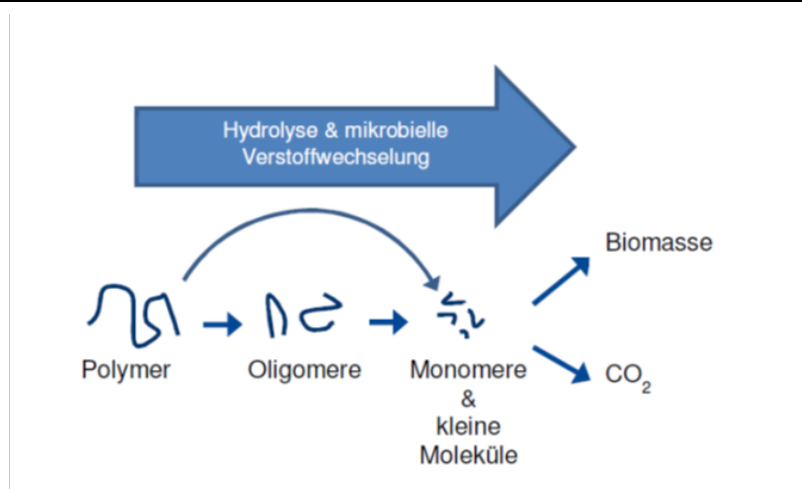
Als Ergebnis der Recherche wurde bei verschiedenen biologisch abbaubaren Kunststoffen eine signifikante Zersetzung unter realen Bedingungen in Meereshabitaten gefunden. Generell wurde eine Zersetzung bei PHA, PCL und Stärke-basierten Werkstoffen wie Mater-Bi® nachgewiesen. Damit stimmen die Ergebnisse zur Zersetzung gut überein mit den Ergebnissen zur biologischen Abbaubarkeit in Meerwasser. Bei synthetischen Polyestern wie PBS und PBAT findet offenbar auch eine Zersetzung statt, allerdings wesentlich langsamer und im Zeitraum von mehreren Jahren.

Die Zeiträume, die unter realen Bedingungen für eine vollständige Zersetzung der Werkstoffe benötigt werden, hängen von vielen Faktoren ab. Neben den mikrobiellen Populationen im Habitat (Gesamtkonzentration und Zusammensetzung) spielen physikalisch-chemische Faktoren eine wesentliche Rolle.

4.3 Charakterisierung abbaurelevanter mikrobieller Gemeinschaften in aquatischen und terrestrischen Ökosystemen

Der biologische Abbau von polymeren Substanzen beginnt grundsätzlich mit der Hydrolyse der Polymerketten in kleinere Fragmente (Primärabbau), die von den Mikroorganismen aufgenommen und im Stoffwechsel weiterverarbeitet werden. Die Zellen können nur kleinere Moleküle in die Zellen einschleusen, welche im Rahmen des Energiestoffwechsels bis zum CO_2 mineralisiert und teilweise in neue Biomasse umgesetzt werden (siehe folgende Abbildung).

Abbildung 12: Schematische Darstellung des biologischen Abbauprozesses



Quelle: (Schlegel 2018)

Bei biogenen Polymeren wie Stärke und PHA, aber auch bei synthetischen Polyestern wie PBS oder PBAT erfolgt die Hydrolyse im Wesentlichen enzymatisch, wobei die Polymer-spaltenden Enzyme als Exoenzyme von den Mikroorganismen aus den Zellen ausgeschieden werden. Abiotische Prozesse wie eine rein chemische Hydrolyse können auch beteiligt sein. Bei anderen Polymeren wie PLA haben auch physikalisch Faktoren wie höhere Temperatur Einfluss auf die Hydrolyse. Die aus der Hydrolyse entstehenden Oligomere und Monomere können meist auch von anderen Mikroorganismen aufgenommen und verwertet werden, so dass sich im Umfeld der Polymere komplexe mikrobielle Gemeinschaften ansiedeln können. Dieser Prozess des biologischen Abbaus findet generell für alle Polymeren statt unabhängig von Umweltkompartimenten.

Die Hydrolyse der Polymere ist der entscheidende und geschwindigkeitslimitierende Schritt beim biologischen Abbau (Emadian et al. 2017) (Tokiwa et al. 2009). Die Mikroorganismen, die zur enzymatischen Hydrolyse der Polymere befähigt sind, sind daher in allen Umweltkompartimenten von großer Bedeutung. Der mikrobielle Abbau der Polyester PBS, PBS/TPS, und PLA wird bei (Shah et al. 2014) beschrieben. An der Hydrolyse sind verschiedene Enzyme wie Esterasen, Cutinasen, Lipasen, Proteasen und PHA-Depolymerasen beteiligt, die von verschiedenen Mikroorganismen produziert werden können. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass Polyester-abbauende Mikroorganismen in der Umwelt potentiell weit verbreitet sind.

4.3.1 Terrestrisches Milieu

In Kompost und Boden wurden über 90 Typen von Mikroorganismen identifiziert, die biologisch abbaubare Kunststoffe verwerten können (Emadian et al. 2017). Dazu gehören sowohl aerobe, anaerobe und photosynthetisch aktive Bakterien, aber auch einige Eukaryonten, vor allem Pilze. Speziell in Böden ist in der Regel eine größere Vielfalt an Mikroorganismen zu finden im Vergleich zu wässrigen Umwelthabitaten.

Bei der Hydrolyse von stärkebasierten Kunststoffen und synthetischen Polyestern wie PBS und PBAT im Boden spielen Pilze eine wesentliche Rolle. Bei Versuchen mit Mater-Bi-Beuteln wurde festgestellt, dass Pilze bei der Zersetzung eine größere Rolle spielen als Bakterien (Accinelli et al. 2012). Um einen Einblick in die Verbreitung von Mikroorganismen zu erhalten, die zur Hydrolyse von PBAT im Boden befähigt sind, wurde im Auftrag der BASF eine Studie mit 15 verschiedenen Bodenproben aus Europa durchgeführt (Schlegel 2018). Insgesamt konnten 400 PBAT-hydrolysierende Organismen aus 22 verschiedenen Gattungen identifiziert werden. Die Mehrzahl mit 88 % waren Pilze, 12 % waren Bakterien.

Der Einfluss von PBAT-Film im Boden auf die mikrobielle Gemeinschaft und das Pflanzenwachstum wurde von (Muroi et al. 2016) untersucht. An dem Primärabbau von PBAT ist das Enzym Cutinase beteiligt, das auch von phytopathogenen Organismen produziert wird. Eine Fragestellung war daher, ob durch den Eintrag von PBAT in den Boden die Vermehrung von Phytopathogenen gefördert und das Pflanzenwachstum beeinträchtigt wird. Auf der Oberfläche der PBAT-Filme vermehrten sich hauptsächlich Schlauchpilze (Ascomyceten). Hierbei kam es zu einer Anreicherung von PBAT-hydrolysierenden Pilzen speziell auf den Filmoberflächen, im umgebenden Boden blieb die Zusammensetzung der Organismen gleich. Insgesamt kam es zu einer Zunahme der mikrobiellen Biomasse, da PBAT als Kohlenstoffquelle genutzt wurde. Auf die Zusammensetzung der bakteriellen Mikroflora im Boden hatte PBAT keinen Einfluss. Der gleiche Befund wurde auch bei der Untersuchung von PLA, PCL und PBSA im Boden festgestellt (Masui et al. 2011).

Bei Untersuchungen zur Zersetzung der Polymere PBS, PBS/TPS, und PLA in einem landwirtschaftlichen Boden (Zellzahl $7,5 \times 10^8$ /g Boden) wurde auch der Einfluss auf die Mikroflora betrachtet (Adhikari et al. 2016). Bei Versuchen mit 3 verschiedenen Böden (Flussufer, Gebirge, Agrarboden) mit unterschiedlichen Mikroorganismen-Konzentrationen ($5,8 \times 10^7$ bis $7,8 \times 10^8$ /g Boden) wurde gefunden, dass die Geschwindigkeit der Zersetzung der Polymere positiv mit der Mikroorganismen-Konzentration korreliert. Es wurde dabei jedoch kein Effekt auf Zusammensetzung der Bodenbakterien festgestellt. Die Zersetzung der Polymere hatte keinen Einfluss auf mikrobielle Nitrifikation im Boden.

Der Einfluss von PHA-Film auf die Mikroflora in Waldböden wurde in Malaysia untersucht (Ong und Sudesh 2016). Der Versuch dauerte acht Wochen, mittels Metagenom-Analyse wurde die Mikroflora charakterisiert. Dabei wurde eine Zunahme der Mikroorganismen als auch eine Änderung der Zusammensetzung gefunden, die mit dem Abbau der PHA-Filme korreliert werden konnte. Identifiziert wurden vor allem Bakterien der Gattung *Actinobacteria*, *Firmicutes* und *Proteobacteria*. Inwieweit die Veränderung der Mikroflora Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit hat, wurde im Rahmen der Studie nicht geklärt.

Bei Versuchen zur Zersetzung von PHA in tropischem Boden wurden die am Abbau beteiligten Mikroorganismen identifiziert (Boyandin et al. 2013). Dabei handelte es sich eine Vielzahl von Bakterienspezies (*Burkholderia*, *Bacillus*, *Cupriavidus*, *Mycobacterium*, *Nocardiosis*) und Pilzen (*Acremonium*, *Gongronella*, *Paecilomyces*, and *Penicillium*, *Trichoderma*).

Der Abbau von PLA im Boden erfolgt wesentlich langsamer als bei anderen Polyester wie PHA und PCL (Qi et al. 2017). Mikroorganismen, die in der Lage sind, PLA zu hydrolysieren sind in natürlicher Umwelt offenbar weniger verbreitet als Mikroorganismen, die PHA und PCL abbauen. Es wurde eine Vielzahl an Bakterien und Pilzen identifiziert, die in der Lage sind, PLA zu hydrolysieren. Die meisten wurden aus Kompost und Böden bei höheren Temperaturen (50-60 °C) isoliert, nur wenige stammen aus Habitaten mit niedrigerer Temperatur.

4.3.2 Aquatisches Milieu

Die aquatischen Habitate weisen in der Regel geringere Mikroorganismen-Konzentrationen auf als Boden und Kompost. Darüber hinaus wird die Mikroflora im wässrigen Milieu eher von Bakterien dominiert, Pilze sind in diesen Habitaten weniger vertreten (Emadian et al. 2017). Im Unterschied zu Boden wurden in Süß- und Meerwasser keine Pilze gefunden, die stärkebasierte Mater-Bi®-Beutel zersetzen (Accinelli et al. 2012).

Die wichtigsten aus wässrigen Systemen isolierte Spezies, die in der Lage sind Biokunststoffe zu hydrolysieren sind Bakterien der Gattungen *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Alcanivorax*, *Tenacibaculum*, *Leptothrix*, *Entrobacter*, *Variovorax* and *Gracilibacillus* (Emadian et al. 2017).

Bei Versuchen mit PE- und Mater-Bi®-Filmen in mediterranem Habitaten wurde eine deutliche Biofilmbildung auf beiden Polymer-Filmen festgestellt (Biofouling) (Pauli et al. 2017). Die Mikroflora, bestehend aus 21 unterschiedlichen Familien, unterschied sich bei den verschiedenen Habitaten „Wasserkörper“ und „Meeresgrund“, zeigte aber keinen Unterschied innerhalb der Polymertypen. Nur beim Mater-Bi®-Film fand auch eine Zersetzung in beiden Habitaten statt.

In Japan wurden Versuche zur Zersetzung der Polymere PCL, PBS und PHA in Tiefseewasser an drei verschiedenen Standorten (321 bis 612 m Tiefe) durchgeführt (Sekiguchi et al. 2011). Nach 12 Monaten waren die Proben aus PCL und PHA an allen Standorten brüchig bzw. waren vollständig zersetzt. Die PBS-Fasern zeigten deutliche Zersetzung an der Oberfläche. Aus dem Tiefseewasser wurden fünf Bakterienstämme (Gattungen *Pseudomonas*, *Alcanivorax*, *Tenacibaculum*) isoliert, die in der Lage sind PCL abzubauen.

Im Gegensatz zum Habitat Boden wurde der Abbau von PLA in aquatischen Systemen bisher wenig untersucht (Karamanlioglu et al. 2017). Untersuchungen in Meerwasser haben auch nach mehreren Monaten keine Zersetzung von PLA-Proben gezeigt. Offenbar sind Mikroorganismen mit der Fähigkeit PLA zu hydrolysieren, im wässrigen Milieu nur gering verbreitet.

5 Empfehlungen für eine optimale Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel werden in diesem Kapitel

- ▶ Chancen/Vorteile und Herausforderungen/Nachteile unterschiedlicher Verwertungswege biologisch abbaubarer Kunststoffprodukte in Deutschland gegenübergestellt (siehe Kapitel 5.1);
- ▶ der derzeit praktizierte Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen in Deutschland auf ökologische Vorteilhaftigkeit, technische Umsetzbarkeit und Praktikabilität geprüft und Empfehlungen für eine optimale Verwertung unter aktuellen Gegebenheiten ausgesprochen (siehe Kapitel 5.2) und,
- ▶ inspiriert von der Herangehensweise anderer Mitgliedsstaaten der EU, alternative Ansätze zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle geprüft (siehe Kapitel 5.3).

In einem ersten Schritt werden dazu die verschiedenen, in Deutschland möglichen Verwertungswege biologisch abbaubarer Kunststoffe beschrieben und deren jeweilige Chancen/Vorteile und Herausforderungen/Nachteile gegenübergestellt. Diese Argumentationsketten basieren auf Aussagen der befragten Stakeholder (siehe Kapitel 3.4), auf von Stakeholdern zur Verfügung gestellter Literatur sowie auf einer zusätzlichen Literaturrecherche zu Vor- und Nachteilen biologisch abbaubarer Kunststoffe.

Basierend auf diesen Gegenüberstellungen werden Schlussfolgerungen zur ökologischen Sinnhaftigkeit, technischen Umsetzbarkeit und Praktikabilität des derzeit praktizierten Umgangs biologisch abbaubarer Kunststoffe bzw. Kunststoffabfälle (unterschieden nach Hauptproduktgruppen) unter Berücksichtigung geltender Gesetzgebung in Deutschland gezogen.

Für eine grundsätzliche Empfehlung für eine optimale Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland werden darüber hinaus Alternativansätze betrachtet und dem aktuellen Umgang gegenübergestellt. Diese Ansätze stellen vorrangig gesetzliche Regelungen dar, da diese ausschlaggebend für den praktizierten Entsorgungsweg eines Landes sind. In Kapitel 5.3 werden folglich weitere Ansätze (inspiriert durch die Betrachtung anderer EU-MS) diskutiert, um Empfehlungen bzw. Möglichkeiten zur optimalen Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland ableiten zu können. Dabei wird auch analysiert, welche Chancen und Risiken sich für Deutschland durch die Übertragung dieser Ansätze ergeben könnten und welche Voraussetzungen für deren Umsetzung erforderlich wären.

5.1 Gegenüberstellung von Chancen und Herausforderungen der unterschiedlichen Verwertungswege in Deutschland

Chancen und Herausforderungen werden für folgende möglichen Verwertungswege (Ausnahme: Abbau im Boden) biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland dargestellt:

- ▶ Werkstoffliches Recycling;
- ▶ Industrielle Kompostierung;
- ▶ Gartenkompostierung;

- Vergärung;
- Energetische Verwertung;
- Abbau im Boden²³.

Die auf dem deutschen Markt relevanten Produktgruppen sind vor allem Bioabfallbeutel, Verpackungen (z.B. Joghurt-Becher) sowie Mulchfolien. Grundsätzlich ist anzumerken, dass nicht alle Verwertungswege für alle Produktgruppen biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland relevant sind. So steht die industrielle Kompostierung und Vergärung vor allem für Bioabfallbeutel im Fokus, wohingegen der Abbau im Boden vor allem für Mulchfolien relevant ist.

5.1.1 Werkstoffliches Recycling

Das werkstoffliche Recycling ist auf gesetzlicher Ebene für alle Produktgruppen biologisch abbaubarer Kunststoffe erlaubt. Folglich bezieht sich die Gegenüberstellung der Chancen und Herausforderungen für das Recycling auf alle Produktgruppen.

Tabelle 18: Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen für das werkstoffliche Recycling von BAK in Deutschland

Werkstoffliches Recycling		
	Herausforderungen/ Nachteile	Chancen/ Vorteile
EU Strategie	- Plastic Strategy 2018 strebt Erhöhung, Verbesserung und Erleichterung von Kunststoffrecycling innerhalb der EU an (Europäische Kommission 2018) - Recycling von BAK aktuell nicht angewandt	
Norm	Keine spezifische Norm zum werkstofflichem Recycling BAK vorhanden	
Recycling BAK in Praxis	Sortenreine Trennung und Verwertung von Post-Consumer Abfällen aufgrund geringer BAK Abfallmengen nicht wirtschaftlich → Kein Recycling von BAK Post-Consumer Abfällen	- Sortenreine BAK Abfälle können wie auch konventionelle Kunststoffabfälle recycelt werden - Bei innerbetrieblichen Produktionsabfällen wird stoffliches Recycling erfolgreich durchgeführt
	BAK werden aussortiert und energetisch verwertet	Energetische Verwertung aus ökobilanzieller Sicht sinnvoll für BAK (Rossi et al. 2015)
Aussortierung BAK	100 % sortenreine Sortierung trotz Nahinfrarot-Hohlkörpersortieranlagen kaum möglich	- Grundsätzlich eindeutige Detektion und Aussortierung von BAK möglich - Auch konventionelle Kunststoffe können grundsätzlich in Sammelströme anderer Materialien gelangen - Studie des Fachverbandes für Getränkekartonverpackungen

²³ Ablagerung in oder auf dem Boden wird als Beseitigungsverfahren und nicht als Verwertungsverfahren angesehen. Um jedoch alle möglichen bzw. relevanten Entsorgungsoptionen vollständig zu diskutieren, wird auch der biologische Abbau im Boden im Rahmen dieses Vorhabens weiter betrachtet.

Werkstoffliches Recycling		
		(in WFBR 2017) zeigt: von 200 Proben getrennt gesammelter Kunststoffe enthalten nur neun Proben Anteile von Biokunststoffen zwischen 0,01 und 0,14 %. → Bei aktuell geringen Mengen an BAK in Deutschland keine Gefahr der Störung der Recyclingprozesse von konventionellen Kunststoffen
Recycling anderer Kunststoffe	Gelangen BAK in Recyclingströme konventioneller Kunststoffe, können sie diese beeinträchtigen: → Geringere Schmelztemperaturen von BAK können zu Prozessstörungen, Verfärbungen, Stabilitätsverlust und Qualitätseinbußen führen (Kreindl 2013) → Zutreffend für Biokunststoffe, die in den PET-Recyclingstrom gelangen (PET: ca. 250 °C; PLA ca. 180 °C) (Endres/Siebert-Raths 2009)	- PP oder PS haben keinen höheren Schmelzbereich als BAK (PP: ca. 150 °C; PS: ca. 180 °C; PLA: 180 °C) (Endres/Siebert-Raths 2009) - Laut (UMSICHT et al. 2017) treten bei < 3 Massenprozent im Recycling von Polypropylen sowie bei < 10 Prozent in Polystyrol-Regranulaten keine Störungen auf - Laut (WFBR 2017) treten bis 10 % Stärke-Blends und bis 10 % PLA keine negativen Effekte der mechanischen Eigenschaften von sortenreinem konventionellen Kunststoff auf → Mengen an PLA so gering, dass Überschreitung kaum möglich - Auch konventionelle Kunststoffe können Recycling anderer Kunststoffe stören

5.1.2 Industrielle Kompostierung

Verpackungen gehören laut BioAbfV nicht zu den Abfällen, welche für die Verwertung als Düngemittel auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Böden oder zum Zweck der Aufbringung geeignet sind. Sie sind damit nicht zur Verwertung in einer industriellen Kompostier- bzw. Vergärungsanlage zugelassen - auch nicht, wenn deren Abbau nach EN 13432 nachgewiesen und zertifiziert wurde.

Abfallbeutel zur Sammlung von Bioabfall sind jedoch laut BioAbfV für die Verwertung als Düngemittel oder zum Zweck der Aufbringung zugelassen, sofern diese nach EN 13432 zertifiziert sind und aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Gleiches gilt für biologisch abbaubare Kunststoffabfälle (Materialien aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen und nach EN 13432 zertifiziert) der Landwirtschaft, des Gartenbaus, der Teichwirtschaft, der Forstwirtschaft, der Jagd und der Fischerei. Dies schließt beispielsweise Mulchfolien ein. Da für biologisch abbaubare Mulchfolien vor allem der Abbau im Boden relevant ist, liegt der Fokus der Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen der industriellen Kompostierung auf den biologisch abbaubaren Bioabfallbeuteln.

Rahmenbedingungen zur Sammlung und Aufbereitung haushaltsnaher Abfälle können durch kommunale Satzungen definiert bzw. eingegrenzt werden. So besteht die Möglichkeit, dass Bioabfallbeutel zwar laut BioAbfV zur industriellen Kompostierung zugelassen sind, nach kommunaler Abfallsatzung dies jedoch untersagt wird. In nachfolgender Tabelle sind unabhängig davon Herausforderungen und Chancen einer industriellen Kompostierung von biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen aufgelistet.

Tabelle 19: Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen für die industrielle Kompostierung von BAK (v.a. Bioabfallbeutel) in Deutschland

Industrielle Kompostierung (relevant für Bioabfallbeutel)		
	Herausforderungen/ Nachteile	Chancen/ Vorteile
Gesetzgebung	DüMV Anlage 2 - Tabelle 8 Nebenbestandteile: • Biologisch abbaubare Werkstoffe zählen zu Fremdstoffen, die düngemittelrechtlich keinerlei Nutzen aufweisen • Biologisch abbaubare Werkstoffe dürfen nur in unvermeidlichen Anteilen enthalten sein	Geplante Änderung der EU-Abfallrahmenrichtlinie (General Secretariat of the Council 2018) • Artikel 22 - deutsche Fassung: „MS können ermöglichen, dass Verpackungen, deren Eigenschaften relevanten europäischen Standards bzgl. biologischer Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit entsprechen, gemeinsam mit Bioabfällen gesammelt werden“ • Artikel 22: Förderung des Recyclings (u.a. durch Kompostierung und Vergärung) DüMV: Anlage 2 - Tabelle 8 Nebenbestandteile: • Biologisch abbaubare Kunststoffe zählen als Nebenbestandteile zu Stoffen, „deren Zugabe in der Regel gezielt wegen eines zusätzlichen produktions- oder anwendungstechnischen Nutzens als Hilfsmittel zur Unterstützung der Anwendung oder Aufbereitung erfolgt“
Bioabfallsammlung	• Kein direkter Zusatznutzen für Kompost durch Kompostierung von BAK-Produkten, da BAK keine Nährstoffe enthalten • Viele Anlagen mit Vorsortierung: oftmals Aussortierung von BAK mit anderen Störstoffen	• Nutzen besteht in gesteigerter Menge an Bioabfall, da sich ein erhöhter Komfort für Verbraucher durch gemeinsame Entsorgung von Bioabfallbeutel und Bioabfall (hygienisch; einfach) ergibt. Beispiele: Projekt Remscheid: durch kostenlose Ausgabe von BAK-Sammelbeuteln Steigerung der Bioabfallmenge um 28 % (Öko-Institut et al. 2008); Projekt Berlin: Verteilung BAK-Beutel → Steigerung der Bioabfallmengen um 12-14 % (Kant-hak/Söling 2012)

Industrielle Kompostierung (relevant für Bioabfallbeutel)		
		Projekt München: durch kostenlose Ausgabe von Bioabfallbeuteln und Sammelgefäßen Steigerung der Bioabfallmengen um 50 % (Schmidt 2016) → Erhöhte Mengen Bioabfall in Kompostier- oder Vergärungsanlagen • Reduktion von Bioabfall im Restmüll (ungenutztes Potenzial in Deutschland: 6,5 Mio. t/a (nabu 2017))
Aussortierung	• Viele Anlagen mit Vorsortierung: oftmals Aussortierung von BAK mit anderen Störstoffen → Energetische Verwertung → Kosten für energetische Verwertung • Viele Anlagen mit kürzeren Kompostierzyklen, wie im Test nach EN 13432 angewandt wird → Nachsortierung und Aussortierung mit anderen Störstoffen und energetische Verwertung → Energetische Verwertung → Kosten für energetische Verwertung	• Vor- und Nachsortierung finden unabhängig von Bioabfallbeuteln statt
Zulassung BAK	• Keine einheitliche Regelung der örE in D in Bezug auf Zulassung von BAK-Sammelbeuteln → auch Ausschluss von biologisch abbaubaren Bioabfallbeuteln möglich • Kompostierungsinfrastruktur nicht auf BAK ausgelegt	
Kompostqualität / biologischer Abbau	• Viele Anlagen mit kürzeren Kompostierzyklen als im Test nach EN 13432 angewandt wird → Nachsortierung und Aussortierung mit anderen Störstoffen und energetische Verwertung → Minderung der Kompostqualität falls keine Aussortierung erfolgt • Bereits 10 % Rückstände gelten für die Bewertung des Fremdstoffgehalts im Prüflabor (z.B. RAL Gütesiegel) als Problem; keine Unterscheidung zwischen konventionellen und biologisch abbaubaren-Kunststoffen bei der optischen Kontrolle	• Zertifizierung nach EN 13432 unterliegt anspruchsvollen Prüfungen: Einhaltung geforderter Max. Konzentrationen + vollständiger biologischer Abbau + Desintegrationstest + Ökotoxizitätstest mit Pflanzen • Bioabfallbeutel meist aus PLA/PBAT- (BASF) oder Stärke-Blends (novamont) → diese weisen sehr gute Testergebnisse auf (siehe dazu auch Tabelle 12) mit vollständigem Abbau auch in kürzerer Zeit als nach EN 13432 maximal gestattet ist z.B. ecovio Bioabfallbeutel bei acht Praxistests sieben Mal Abbaurate über 90 % unter 29 Tagen (BASF o.J.) (Kosak 2013)

Industrielle Kompostierung (relevant für Bioabfallbeutel)		
		• Vor- und/oder Nachsortierung findet in allen Anlagen statt → kaum Gefahr der Verunreinigung des Kompostes • Sollten feine Rückstände im Kompost zu finden sein, bauen diese weiter im Boden ab (im Gegensatz zu konventionellen Kunststoffen)
	• Vermarktungsschwierigkeiten durch Kunststoffreste im Kompost	• Kunststoffreste ebenso aus konventionellen Kunststoff oder Papier → kein grundsätzliches Problem BAK • BAK können im Nachgang im Boden noch weiter abbauen
Fehlwürfe	• Fehlwürfe/Verunreinigungen durch große Ähnlichkeit von BAK und konventionellen Beuteln	• Projekte zeigen, dass durch Nutzung von Bioabfallbeuteln aus BAK keine zusätzliche Verunreinigung entsteht z.B.: Kassel Projekt (nach EUBP 2009) Projekt Bad Dürkheim: 65.000 Haushalte erhalten Bioabfallbeutel aus BAK - keine Veränderung der Fehlwurfraten (Hamprecht/Kosak 2011) → Projekte immer in Kombination mit Aufklärung und Kommunikation
Bildung von Mikroplastik	• Bei den in der Aufbereitung vor und/oder nach der Kompostierung durchgeführten Prozessen (z. B. Zerkleinerung, Siebung, Sichtung) oder bei dem Umsetzen der Kompostmieten kann es zur Bildung von Mikroplastik aus Kunststoffteilen im Kompost kommen, vor allem aus Folienmaterial.	• Mögliche Bildung von Mikroplastik unabhängig davon, ob Folien aus abbaubaren oder nicht-abbaubaren Materialien bestehen • Je kleiner die Partikel von BAK, desto bessere Voraussetzungen herrschen für die biologische Abbaubarkeit (wg. großer Oberfläche). • Kleine Restpartikel, die mit Kompost in die Umwelt (Boden) gelangen, werden weiter abgebaut
Ökobilanz Entsorgung	• Bei Betrachtungszeitraum > 100 Jahre industrielle Kompostierung in Bezug auf die Menge von Treibhausgasen (CO₂-Äquivalente) sowie Ressourcenverbrauch nicht zu favorisieren (Rossi et al. 2015) • Ranking in Bezug auf Menge von Treibhausgasen sowie Ressourcenverbrauch (> 100 Jahre) für PLA und Thermoplastische Stärke: Recycling > Energierückgewinnung durch Direct Fuel	• Ausschlaggebend ist nicht zwingend die Ökobilanz des Produktes, sondern die Ökobilanz des gesamten Abfallsystems → durch gesteigerte Sammlung an Bioabfällen Vermeidung von Treibhausgasen und Kreislauf-führung von Düngematerialien (N, P, K etc.) • Recycling aufgrund stark verschmutzter Beutel nicht möglich

Industrielle Kompostierung (relevant für Bioabfallbeutel)		
	Substitution > anaerobe Vergärung > Energierückgewinnung durch MVA > industrielle Kompostierung > Deponierung	(auch nicht von konventionellen Beuteln) → andere Verwertungswege notwendig (z.B. energetische Verwertung)
Ökobilanz Produkt	- Bei Vergleich des gleichen Anwendungsgebietes sind Biokunststoffe konventionellen Kunststoffen gesamtökologisch weder über- noch unterlegen - Pauschale Aussagen zur Ökobilanz sind kaum möglich: häufig zeigen Biokunststoffe bessere Ergebnisse hinsichtlich Treibhausgasemissionen und fossiler Ressourcenverbrauch, dagegen schlechtere Ergebnisse bei Versauerung, aquatischer Eutrophierung und terrestrischer Eutrophierung (Detzel et al. 2012)	

5.1.3 Gartenkompostierung

Die Überlassungspflicht von Erzeugern/Besitzern von Abfällen aus privaten Haushaltungen an örE besteht entsprechend § 17 Abs. 1 KrWG nur, soweit diese zu einer Verwertung auf den von ihnen im Rahmen ihrer privaten Lebensführung genutzten Grundstücken nicht in der Lage sind oder diese nicht beabsichtigen. Der wichtigste Anwendungsfall ist die Eigenkompostierung von Küchen-, Speise- und anderen organischen Abfällen, deren Rahmenbedingungen durch kommunale Satzung definiert bzw. eingegrenzt werden können (siehe beispielhaft § 4 der Hausmüllentsorgungs-Satzung der Stadt München vom 12. Dezember 2001). Hier gilt es in jedem Fall zu prüfen, ob biologisch abbaubare Kunststoffabfälle laut der entsprechenden Abfallsatzung zur Eigenkompostierung erlaubt sind²⁴. In nachfolgender Tabelle sind unabhängig davon Herausforderungen und Chancen einer Gartenkompostierung von biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen aufgelistet.

Tabelle 20: Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen für die Gartenkompostierung von BAK in Deutschland

Gartenkompostierung		
	Herausforderungen/ Nachteile	Chancen/ Vorteile
Gesetzgebung	ÖrE entscheidet in Satzung welche Abfälle auf den Grundstücken der Bürger verwertet werden dürfen → auch Ausschluss von BAK möglich	- Geplante Änderung der EU-Abfallrahmenrichtlinie (General Secretariat of the Council 2018) - Artikel 22 - Bio-waste: EU-MS müssen u.a. Maßnahmen ergreifen, um Gartenkompostierung von Bioabfällen zu fördern
Ökonomischer Faktor		Vermehrte Gartenkompostierung spart Kosten für örE (Wegfall der Sammlung und Verwertung) sowie für Bürger (Wegfall Gebühren) (EUBP 2015d)

²⁴ Wir würden in der Regel davon ausgehen, dass biologisch abbaubare Kunststoffe nicht zur Eigenkompostierung zulässig sind; dies kann aber je nach Ausgestaltung der kommunalen Satzung anders sein

Gartenkompostierung		
Ökologischer Faktor	Bei nicht sachgerechter Handhabung Risiko der Entweichung von Treibhausgasen (v.a. Methan als klimaschädliches Gas) oder Austritt von Stickstoff in Boden oder Grundwasser (EUBP 2015d)	- Gartenkompostierung spart Transportemissionen sowie Energiebedarf im Gegensatz zur Verwertung in einer industriellen Anlage (UBA 2016c) - Gartenkompostierung von BAK reduziert Menge von Kunststoffen in anderen Entsorgungswegen (EUBP 2015d)
Gartenkompostierung in Praxis	Grundsätzlich in städtischen Regionen kaum möglich (Anteil der Bevölkerung in dicht besiedelten Gebieten: 35,8 %; in Gebieten mit mittlerer Bevölkerungsdichte: 41,7 % → Anteil der städtischen Bevölkerung in Deutschland: 77,4 % (Eurostat 2015))	
Gartenkompostierung BAK in Praxis	- Geringe Anzahl an Produkten in Deutschland als „Gartenkompostierbar“ zertifiziert (z.B. nach DIN CERTCO zertifiziert: 3 Produkte/Werkstoffe) - Hohe Anforderungen an BAK-Produkt zur Erfüllung von AS 5810, NF T 51-800 (geringe Temperaturen)	Wird Produkt als Gartenkompostierbar zertifiziert, erfüllt es grundsätzlich auch Anforderungen einer industriellen Kompostierung
Testergebnisse	Wenig verfügbare Testergebnisse	
Fehlwürfe	Fehlwürfe oder Littering aufgrund von Unsicherheiten der Konsumenten in Bezug auf Labels	

5.1.4 Biologischer Abbau im Boden

Aufgrund ihrer Anwendung in der Landwirtschaft ist für Mulchfolien besonders der biologische Abbau im Boden relevant.

Tabelle 21: Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen des biologischen Abbaus im Boden für BAK in Deutschland (v.a. Mulchfolien)

Biologischer Abbau im Boden		
	Herausforderungen/ Nachteile	Chancen/ Vorteile
Norm		• Harmonisierte Norm EN 17033 verfügbar
Fehlwürfe	• Förderung des Litterings durch Eindruck, dass Entsorgung in Umwelt legitim ist	• Zertifizierung nur für Produkte, wo Bodenkompostierung sinnvoll/angemessen ist
Zusatznutzen	• Problem sofern Produkt zu früh oder zu spät abbaut	• Einsatz in Landwirtschaft oder Gartenbau z.B. Mulchfolien (mit zertifiziertem biologischen Abbau im Boden) • Keine Entfernung nach Anwendung notwendig, da sie untergepflügt werden können • Arbeits- und Kostenersparnis (EUBP 2017)
Biologischer Abbau im Boden BK in Praxis	• Zersetzung/Abbau stark von Umgebungsbedingungen abhängig • Testergebnisse zu PLA (siehe Kapitel 0): große Schwankungen bei Zersetzung im Boden	• Testergebnisse zu Mulchfolien (siehe Kapitel 0) → Zersetzung nach wenigen Monaten möglich

5.1.5 Vergärung

Wie auch bei der industriellen Kompostierung liegt der Fokus der Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen der Vergärung auf Bioabfallbeuteln.

Tabelle 22: Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen einer Vergärung von BAK in Deutschland (v.a. Bioabfallbeutel)

Vergärung (relevant für Bioabfallbeutel) - Fokus der Betrachtung liegt auf anaeroben Stufe und nicht auf nachgeschaltetem aeroben Abbau		
	Herausforderungen/ Nachteile	Chancen/ Vorteile
Gesetzgebung vs. Vergärung BAK in Praxis	• Bei den meisten BAK kein Abbau während der Vergärung (bei typisch mesophilen Bedingungen), nur bei anschließender Nachrotte • Nachrotte laut (UBA 2012) nur bei circa der Hälfte der untersuchten Vergärungsanlagen → hier keine eindeutigen Aussagen zum Abbau von Bioabfallbeuteln • Keine einheitliche Regelung der öRE in Bezug auf Zulassung	Geplante Änderung der EU-Abfallrahmenrichtlinie (General Secretariat of the Council 2018) • Artikel 22 - Bio-waste: MS können Verpackungen deren Eigenschaften relevanten europäischen Standards bzgl. biologischer Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit entsprechen für die Sammlung von Bioabfällen verwenden

Vergärung (relevant für Bioabfallbeutel) - Fokus der Betrachtung liegt auf anaeroben Stufe und nicht auf nachgeschaltetem aeroben Abbau		
	→ Endstation von BAK zum Zeitpunkt der Entsorgung nicht immer klar	Artikel 22: Förderung des Recyclings (u.a. durch Kompostierung und Vergärung)
Testergebnisse	(Bauhaus Universität Weimar 2013): - Vollständiger Abbau PLA-Getränkebecher bei thermophilen Prozessbedingungen nach 80 Tagen - Abbau thermoplastischer Stärke-Blends (Bioabfallbeutel) bis zu 25 % bei thermophilen Bedingungen möglich	(Bauhaus Universität Weimar 2013): - Vollständiger Abbau von Lebensmittelolie aus Zellulose-Hydrat bei thermophilen Bedingungen nach 20 Tagen (Kern et al. 2017): - Abbauverhalten von Bioabfallbeuteln aus Stärke-Blends (Mater-Bi®) in vier deutschen Anlagen untersucht - Nach der jeweiligen anlagentypischen Prozessdauer (fünf bis zehn Wochen) kein Nachweis des Bioabfallbeutels in den Kompoststichproben aus der Nachrotte Hinweis: (Kern et al. 2017) untersuchen nach aerobem Abbau in der Nachrotte; (Bauhaus Universität Weimar 2013) nach anaerobem Abbau
Norm	Keine entsprechende Norm oder entsprechendes Zertifizierungsprogramm vorhanden	
Bioabfallsammlung	- Kein direkter Zusatznutzen der Vergärung von BAK Beuteln, wenn kein Abbau stattfindet - Großteil der Anlagen mit Vor- oder Nachsortierung: oftmals Aussortierung von BAK mit anderen Störstoffen (UBA 2012)	- Indirekter Nutzen - besteht in gesteigerter Menge an gesammeltem Bioabfall (erhöhter Komfort für Verbraucher durch gemeinsame Entsorgung von Bioabfall und -beutel) - mehr Bioabfall in Vergärungsanlage beutet mehr Rückgewinnung von Energie (Wärme und Strom) und Kompost (EUBP 2015c) - BAK Beutel trocknet Bioabfall nicht aus (im Gegensatz zu Papierbeutel) → höherer Methangehalt
Aussortierung	- Viele Anlagen mit Vorsortierung: oftmals Aussortierung von BAK mit anderen Störstoffen → Energetische Verwertung - Kosten für energetische Verwertung	Vor- und Nachsortierung finden unabhängig von Bioabfallbeuteln statt
Ökobilanz Entsorgung		Ranking in Bezug auf Menge von Treibhausgasen sowie Ressourcenverbrauch (> 100 Jahre) für PLA und Thermoplastische

Vergärung (relevant für Bioabfallbeutel) - Fokus der Betrachtung liegt auf anaeroben Stufe und nicht auf nachgeschaltetem aeroben Abbau		
Ökonomischer Faktor	Verbrennung aussortierter Materialien kostet zusätzlich Geld	Stärke: Recycling > Energierückgewinnung durch Direct Fuel Substitution > Vergärung > Energierückgewinnung durch MVA > industrielle Kompostierung > Deponierung (Rossi et al. 2015) Aussortierung auch von konventionellen Kunststofftüten notwendig → kein spezielles Problem von BAK
Kompostqualität	Vermarktungsschwierigkeiten durch BAK-Reste im Kompost/Endprodukt	Laut (UBA 2012) ca. 90 % des Absatzes in Landwirtschaft → hier ästhetische Faktoren zweitrangig

5.1.6 Energetische Verwertung

Eine energetische Verwertung steht auf gesetzlicher Ebene allen Produktgruppen biologisch abbaubarer Kunststoffe offen. Folglich bezieht sich die Gegenüberstellung der Chancen und Herausforderungen einer energetischen Verwertung auf alle Produktgruppen.

Tabelle 23: Gegenüberstellung von Herausforderungen und Chancen der energetischen Verwertung von BAK in Deutschland

Energetische Verwertung		
	Herausforderungen/ Nachteile	Chancen/ Vorteile
Energetische Verwertung BAK in Praxis	Verbrennung nasser Abfälle (Bioabfallbeutel mit Resthaftungen) reduziert Energieeffizienz des Prozesses (EUBP 2015e)	- Für BAK ohne Einschränkungen zu praktizieren - Gerade für stark verschmutzte Stoffe sinnvoll, die keinem Recycling mehr zugeführt werden können
Zusatznutzen	Produkt wird hergestellt, um anschließend zu Abfall zu werden	- Bei biogener Rohstoffbasis der BAK wird durch energetische Verwertung erneuerbare Energie rückgewonnen - Herstellung von Ersatzbrennstoffen verringert Einsatz fossiler Rohstoffe (Öl, Kohle, etc.) (EUBP 2015e)
Ökobilanz Entsorgung	Geringerer Heizwert von BAK im Gegensatz zu konventionellen Kunststoffen, Heizöl und Kohle (Endres/Siebert-Raths 2009)	- Vergleichbarer oder leicht höherer Heizwert von BAK im Vergleich zu Holz und Papier (Endres/Siebert-Raths 2009) - Ranking in Bezug auf Menge von Treibhausgasen sowie Ressourcenverbrauch (> 100 Jahre) für PLA und Thermoplastische Stärke: Recycling > Energierückgewinnung durch Direct Fuel

Energetische Verwertung		
		Substitution > Vergärung > Energierückgewinnung durch MVA > industrielle Kompostierung > Deponierung (Rossi et al. 2015)

5.2 Bewertung und Empfehlung zur derzeitigen Verwertung biologisch abbaubarer Kunststoffe in Deutschland

Aus ökobilanzieller Sicht ist im Einklang mit der Gesetzgebung stets eine Wiederverwendung oder ein Recycling (werkstofflich, rohstofflich) von Kunststoffen anzustreben. Grundsätzlich ist die biologische Abbaubarkeit von Kunststoffen erst dann vorteilhaft, wenn durch die Eigenschaft der biologischen Abbaubarkeit ein Zusatznutzen entsteht. Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der Inhalte von Tabelle 18 bis Tabelle 23 wird der derzeit praktizierte Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen in Deutschland geprüft.

5.2.1 Mulchfolien aus biologisch abbaubaren Kunststoffen

Biologisch abbaubare Mulchfolien werden im Gartenbau sowie in der Landwirtschaft eingesetzt. Sie sollen unter anderem für homogene Wachstumsbedingungen sorgen sowie das Wachstum von Unkraut hemmen und sich nach ihrer Anwendung im Boden abbauen. Dies soll das Einsammeln und Entsorgen ersparen, wie es bei Mulchfolien aus konventionellen Kunststoffen der Fall ist (FNR 2016). Zwischenzeitlich wurden jedoch auch Sammlungs- und Recycling-strukturen etabliert, so dass die geordnete und werkstoffliche Verwertung von konventionellen Kunststofffolien möglich ist. Ein Beispiel ist die Initiative „Erde-Recycling“²⁵.

Das Konzept der biologischen Abbaubarkeit kann auch für biologisch abbaubare Pflanzen- und Anzuchttöpfe, Bindegarne, -bänder und Clips angewendet werden (FNR 2013). In der Praxis findet der Abbau allerdings unter Umständen nicht zum gewünschten Zeitpunkt statt, weshalb in diesen Fällen das manuelle Einsammeln und die Wahl eines anderen Entsorgungsweges erforderlich sind (FNR 2016).

Ein hochwertiges werkstoffliches Recycling der benutzten biologisch abbaubaren Folie ist aufgrund des hohen Verschmutzungsgrades kaum möglich und der geringen Mengen unwirtschaftlich. Eine weitere Option wäre, die Folien zusammen mit anderen Bio- und Grünabfällen in die industrielle Kompostierung oder Vergärung zu geben. Hier würden die Folien höchstwahrscheinlich aussortiert werden. Der beste Verwertungsweg wäre in diesem Fall die energetische Verwertung.

Empfehlung zum Umgang mit Mulchfolien aus biologisch abbaubaren Kunststoffen in Deutschland unter aktuellen Rahmenbedingungen

Sofern der biologische Abbau der Mulchfolien im gewünschten Zeitraum eintritt, kann das Belassen entsprechend zertifizierter Folien im Boden in begrenztem Umfang toleriert werden. Als Alternative wäre zunächst das Recycling anzustreben, was aufgrund der bisweilen hohen Verschmutzung und geringer Mengen biologisch abbaubarer Mulchfolien jedoch mit einem hohen technischen Aufwand verbunden ist und somit derzeit kaum praktiziert wird. Folglich kann als weitere Alternative die energetische Verwertung in Betracht gezogen werden, da das Material in der industriellen Kompostierung keinen zusätzlichen Nutzen birgt.

²⁵ <http://www.erde-recycling.de/startseite.html>

5.2.2 Bioabfallbeutel aus biologisch abbaubaren Kunststoffen

Der Nutzen biologisch abbaubarer Bioabfallbeutel liegt in der erleichterten Handhabung und Sammlung von Bioabfällen, da die Beutel gemeinsam mit den Bioabfällen entsorgt werden können. Das Ergebnis kann eine deutliche Steigerung der separat erfassten Bioabfälle sein und somit auch ein erhöhter Input an Bioabfällen für industrielle Kompostier- und Vergärungsanlagen (siehe dazu Testversuche Tabelle 19). Demgegenüber steht eine ablehnende Haltung einiger Anlagenbetreiber gegen biologisch abbaubare Bioabfallbeutel. Als Grund wird unter anderem die zu lange Abbauphase einiger Bioabfallbeutel genannt, was einen erhöhten Sortieraufwand oder die Minderung der Kompostqualität mit sich bringt.

Eine Aussortierung findet jedoch in nahezu allen deutschen Kompostieranlagen, unabhängig von der Materialbasis der Beutel, statt. Ein werkstoffliches Recycling dieser aussortierten Abfälle ist aufgrund des hohen Verschmutzungsgrades kaum mehr möglich. Zudem sind die Abfallmengen biologisch abbaubarer Kunststoffe derzeit zu gering, um ein sortenreines Recycling wirtschaftlich zu gestalten. So ist die energetische Verwertung, mit der Rückgewinnung von Energie zur Strom und Wärmenutzung, die geeignetste Option für aussortierte biologisch abbaubare Bioabfallbeutel.

Wird ein nach EN 13432 zertifizierter Bioabfallbeutel nicht vor der Kompostierung aussortiert, wird dieser im Kompostierungsprozess abgebaut. Findet der Abbau im tatsächlichen Kompostierungszyklus statt, sollte der Beutel keine Probleme verursachen. Testergebnisse zeigen, dass bestimmte Bioabfallbeutel bereits nach wenigen Wochen vollständig abgebaut sind (siehe dazu Testversuche Tabelle 19). Dauert der Abbau der Beutel jedoch zu lange, werden größere Fragmente im Nachgang bei fast allen Kompostieranlagen in Deutschland aussortiert und, wie oben beschrieben, energetisch verwertet.

Die Verwertung biologisch abbaubarer Bioabfallbeutel in einer Vergärungsanlage wird nur dann als sinnvoll erachtet, sofern auch eine Nachrotte durchgeführt wird. ÖrE, welche Bioabfälle hauptsächlich in Vergärungsanlagen ohne Nachrotte verwerten, könnten sich demzufolge gegen eine Annahme von biologisch abbaubaren Bioabfallbeuteln aussprechen und dies entsprechend kommunizieren.

Sollten einzelne Beutel als „gartenkompostierbar“ zertifiziert sein, kann die Verwertung auf dem eigenen Kompost grundsätzlich sinnvoll sein, da die entsprechenden Anforderungen des biologischen Abbaus, der Zersetzung etc. durch das Zertifizierungsprogramm gewährleistet sind. Hier gilt es in jedem Fall zu prüfen, ob biologisch abbaubare Kunststoffabfälle laut der entsprechenden Abfallsatzung zur Eigenkompostierung erlaubt sind. Zudem liegt es im Ermessen des Eigentümers, ob er seinen Biomüll mittels gartenkompostierbarem Bioabfallbeutel sammelt und diesen mit auf seinem Kompost entsorgen möchte. Da jedoch zum einen bislang kaum Produkte über DIN CERTCO als gartenkompostierbar zertifiziert sind und nur ein geringer Teil der Bevölkerung einen eigenen Kompost besitzt, scheint dieser Verwertungsweg eher von untergeordneter Bedeutung.

Ein biologischer Abbau von Bioabfallbeuteln im Boden spielt in Deutschland keine Rolle, da Bioabfallbeutel grundsätzlich nicht als abbaubar im Boden zertifiziert sind.

Empfehlung zum Umgang mit Bioabfallbeuteln aus biologisch abbaubaren Kunststoffen in Deutschland unter aktuellen Rahmenbedingungen

Biologisch abbaubare Sammelbeutel können die Bioabfallsammlung sinnvoll unterstützen. Zum jetzigen Zeitpunkt führt dies zur industriellen Kompostierung der mit Bioabfall gefüllten Beutel oder auch zur energetischen Verwertung, sofern eine Kunststoffseparation erfolgt.

In jedem Fall sollten Sammlung und Verwertung von Bioabfällen aufeinander abgestimmt sein, so dass Kommunen und Anlagenbetreibern ein Ermessensspielraum hinsichtlich des Beuteleinsatzes offenbleibt. Die Eignung von biologisch abbaubaren Kunststoffbeuteln zur Sammlung von Bioabfällen in der industriellen Kompostierung sollte der Anlagenbetreiber zunächst in einem Test prüfen oder auf bereits durchgeführte Tests für vergleichbare Anlagen zurückgreifen. So können begründete Entscheidungen für oder gegen eine Zulassung von Bioabfallbeuteln aus biologisch abbaubaren Kunststoffen in der entsprechenden Anlage getroffen werden.

Falls eine Umstellung auf biologisch abbaubare Kunststoffbeutel erwogen wird, sollte dies Bürgerinnen und Bürgern klar und nachvollziehbar mitgeteilt werden. Es empfiehlt sich dabei, Hinweise auf geeignete Bioabfallsammelbeutel zu geben oder geeignete Beutel bereitzustellen.

5.2.3 Biologisch abbaubare Kunststoffverpackungen

Biologisch abbaubare Kunststoffverpackungen sind in Deutschland auch mit einer Zertifizierung nach EN 13432 nicht zur industriellen Kompostierung oder Vergärung zugelassen. Sie sind laut Verpackungsverordnung ebenso wie andere Verpackungen von den Dualen Systemen zu verwerten. Damit sind Vergärung und Kompostierung für biologisch abbaubare Kunststoffverpackungen in Deutschland aktuell nicht relevant.

Ein mechanisches Recycling ist für diese Post-Consumer Verpackungen aufgrund geringer Mengen aktuell nicht wirtschaftlich, im Gegensatz zu konventionellen Kunststoffverpackungen oder Drop-In Biokunststoffen, und wird deshalb nicht praktiziert.

Sollten einzelne Kunststoffverpackungen als gartenkompostierbar zertifiziert sein, kann dieser Weg grundsätzlich sinnvoll sein, da die entsprechenden Anforderungen des biologischen Abbaus, der Zersetzung etc. durch das Zertifizierungsprogramm gewährleistet sind. Da jedoch bislang kaum Produkte in Deutschland als gartenkompostierbar zertifiziert sind, nur ein geringer Teil der Bevölkerung einen eigenen Kompost besitzt und nur in bestimmten kommunalen Abfallsatzungen biologisch abbaubarer Kunststoffe zur Gartenkompostierung erlaubt sind, scheint dieser Verwertungsweg eher von geringer Bedeutung.

Bei einem biologischen Abbau von Verpackungen (als abbaubar im Boden zertifiziert) im Boden kann kein Zusatznutzen erkannt werden, weshalb dieser Entsorgungsweg nicht empfohlen wird.

Empfehlung zum Umgang mit Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen in Deutschland unter aktuellen Rahmenbedingungen

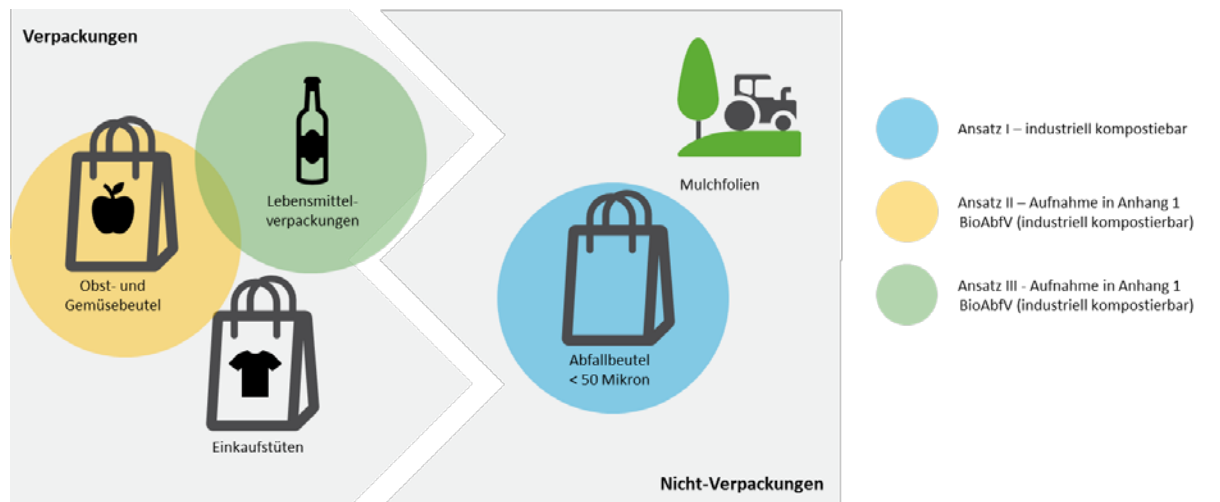
Da für Verpackungen die erweiterte Herstellerverantwortung gilt, muss in Deutschland eine Verwertung entsprechend der Verpackungsverordnung und zukünftig entsprechend des Verpackungsgesetzes erfolgen.

Unter aktuellen Rahmenbedingungen ist folglich die energetische Verwertung die einzig mögliche Verwertungsoption.

5.3 Diskussion alternativer Ansätze im Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen in Deutschland

Zusätzlich zur zuvor erfolgten Bewertung des derzeitigen Umgangs mit biologisch abbaubaren Kunststoffen in Deutschland (unter aktuellen Rahmenbedingungen), werden in diesem Kapitel drei alternative Ansätze zum möglichen Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffen analysiert (siehe Abbildung 9). Diskutiert werden dabei Chancen und Herausforderungen einer Einführung dieser Ansätze in Deutschland und mit welchen Maßnahmen die Einführung verbunden wäre.

Abbildung 13: Überblick über betroffene Produktgruppen der alternativen Ansätze



5.3.1 Ansatz I: Verpflichtung für sämtliche leichten Kunststoffabfallbeutel kleiner 50 Mikron: Zertifizierung nach EN 13432 sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen

Unter Ansatz I werden Chancen und Herausforderungen für den Fall untersucht, dass Kunststoffbeutel zur Sammlung von Abfall (Restmüll sowie Biomüll) in Deutschland verpflichtend nach EN 13432 zertifiziert sein müssten (sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen). Zusätzlich werden mögliche Maßnahmen zur Einführung dieses Ansatzes beschrieben.

Tabelle 24: Ansatz I: Verpflichtung für sämtliche leichten Kunststoffabfallbeutel kleiner 50 Mikron: Zertifizierung nach EN 13432 sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen²⁶

Chancen	Herausforderungen	Potenziell notwendige Maßnahmen für Einführung in Deutschland
Geringere Fehlwürfe im Bioabfall durch Abfallbeutel aus konventionellen Kunststoffen, da diese nicht erlaubt wären	Potenzielle Auswirkungen durch gesteigerte Mengen an BAK in Kompost- und Vergärungsanlagen → Verstärkte Aussortierung notwendig	Gesetzliche Anpassung auf nationaler Ebene: Verpflichtung, dass alle Kunststoffabfallbeutel nach EN 13432 zertifiziert sein müssen

²⁶ Chancen und Herausforderungen als Ergänzung zur Argumentationskette in Tabelle 18 bis Tabelle 23

Chancen	Herausforderungen	Potenziell notwendige Maßnahmen für Einführung in Deutschland
→ Verbesserung der Kompostqualität durch verringerte Anteile nicht abbaubarer Stoffe (CIC 2017) (Holland Bioplastics 2017) (Gröll et al. 2015) → Möglichkeit des Verzichts auf aufwendige Vorsortierung • Vereinfachung für Konsumenten, da grundsätzlich alle Kunststoffbeutel zur Abfallsammlung in der Biotonne entsorgt werden können → Gesteigerte Sammlung von Bioabfällen über Biotonne möglich	→ Erhöhte Kosten aufgrund verstärkter Aussortierung → Veränderung der Kompostzusammensetzung bei tatsächlicher Kompostierung → Veränderung der Kapazitätsauslastungen der Verwertungsanlagen in Deutschland → Veränderung des Marktes der Bioabfallbeutel • Gefahr, dass nicht wiederverwendbare Produkte - sondern Einwegprodukte gefördert werden	• Biobasiertheit als zusätzliche Voraussetzung → Bei energetischer Verwertung Erzeugung von erneuerbarer Energie • Anpassung der Norm EN 13432 an Kompostierzeiten deutscher Kompostieranlagen • Anpassung der Norm EN 13432 mit Vorgabe bestimmter Foliendicke • Anpassung Kompostierzyklen an Norm EN 13432 • Wiedereingliederung aussortierter Stoffe in neuen Kompostierzyklus

Als großer Vorteil des Verbots sämtlicher leichten Kunststoffabfallbeutel kleiner 50 Mikron aus konventionellen Kunststoffen wird eine Verringerung von Fehlwürfen im Biomüll gesehen. Fehlwürfe werden automatisch vermieden, da Konsumenten nicht die Wahl haben, auch Abfallbeutel aus konventionellen Kunststoffen zu verwenden. Studien wie beispielsweise (CIC 2017) (Holland Bio-plastics 2017) (Gröll et al. 2015) zeigen, dass durch die Verwendung von biologisch abbaubaren Abfallbeuteln der Anteil an nicht abbaubaren Stoffen im Biomüll deutlich sinkt, wodurch der Aufwand bei Vor- und Nachsortierung verringert werden kann. Andererseits könnte dieser Aufwand jedoch auch erhöht werden, da die Abfallbeutel in einigen Anlagen nicht schnell genug abgebaut werden. Zudem ist unklar, inwiefern die Kompostzusammensetzung durch erhöhte Mengen an biologisch abbaubaren Kunststoffen verändert wird. Eine Veränderung der Zusammensetzung durch einen steigenden Anteil der Beutel selbst ist jedoch eher unwahrscheinlich (Annahme: 2 g Bioabfallbeutel auf 2 kg Bioabfall = 1 Massenprozent Abfallbeutel); vielmehr wird eine Veränderung durch die gesteigerten Sammelmengen von Küchenabfällen erwartet.

Grundsätzlich ist dieser Ansatz nur sinnvoll, sofern man diesen mit begleitenden Maßnahmen umsetzt. Zum einen wäre dies eine Anpassung der Gesetzgebung, sofern die Verpflichtung auf nationaler Ebene eingeführt wird. Weiterhin könnte die Anpassung der Norm EN 13432 an die tatsächlichen vorherrschenden Kompostierzyklen das Problem der zu langen Abbaudauer einiger Abfallbeutel lösen. Auch wäre die Beschränkung auf eine bestimmte Schichtdicke denkbar, so dass ein schnellerer Abbau herbeigeführt werden kann. Andererseits wäre auch die Verlängerung der Kompostierzyklen deutscher Kompostieranlagen möglich, um potenzielle Probleme mit der Abbaudauer von biologisch abbaubaren Abfallbeuteln zu reduzieren. Dies könnte jedoch höhere Verfahrenskosten bedeuten und möglicherweise auch höhere Abfallgebühren. Die Wiedereingliederung aussortierter Störstoffe nach der Kompostierung in den neuen Kompostierzyklus - ein in Italien praktiziertes Vorgehen - wäre dabei eine denkbare Maßnahme.

Fazit zur Bewertung von Ansatz I: Verpflichtung für sämtliche leichten Kunststoffabfallbeutel kleiner 50 Mikron: Zertifizierung nach EN 13432 sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen

Grundsätzlich wird diese Regelung als interessanter Ansatz erachtet. Es wird darauf abgezielt, Fehlwürfe im Bioabfall zu reduzieren und gleichzeitig die Mengen getrennt gesammelten Bioabfalls zu erhöhen.

Als Hauptverwertungsweg in diesem möglichen Ansatz wird für Bioabfallbeutel die industrielle Kompostierung empfohlen und, sofern dies nicht möglich ist, eine energetische Verwertung.

5.3.2 Ansatz II: Aufnahme von sehr leichten Obst- und Gemüsebeuteln kleiner 15 Mikron in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen

Unter Ansatz II werden Chancen und Herausforderungen für den Fall untersucht, dass nach EN 13432 zertifizierte Kunststoffbeutel für den Transport von losem Obst und Gemüse aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen in Anhang 1 der BioAbfV und folglich zur „Liste der für eine Verwertung auf Flächen geeigneten Bioabfälle sowie der dafür geeigneten anderen Abfälle, biologisch abbaubaren Materialien und mineralischen Stoffe“ aufgenommen würden. Somit wäre eine industrielle Kompostierung von nach EN 13432 zertifizierten Obst- und Gemüsebeuteln erlaubt. Zusätzlich werden potenzielle Maßnahmen diskutiert, welche für die Einführung dieses Ansatzes notwendig wären.

Tabelle 25: Ansatz II: Aufnahme von sehr leichten Obst- und Gemüsebeuteln kleiner 15 Mikron in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen ²⁷

Chancen	Herausforderungen	Potenzielle notwendige Maßnahmen für Einführung in Deutschland
• Aktuell kaum hochwertiges Recycling für Obst- und Gemüsebeutel aus konventionellen Kunststoffen aufgrund oftmals hoher Kontamination, stattdessen überwiegend energetische Verwertung → Kompostierung biologisch abbaubarer Obst- und Gemüsebeutel wäre nach Abfallhierarchie vorteilhafter • Beutel mit doppelter Nutzung (Kaskadennutzung): Transportgut für Obst und Gemüse und anschließend Abfallbeutel für biologisch abbaubare Abfälle • Erleichterung der getrennten Sammlung von Bioabfällen → Gesteigerte Sammlung von Bioabfällen über Biotonne möglich → Gesteigerte Mengen an Bioabfall möglich • Vergleichbares Produkt zu Bioabfallbeuteln → Erfahrungswerte vorhanden → EN 13432 anwendbar	• Gemeinsame Entsorgung von Bioabfall und Verpackungen widerspricht der Verpackungsverordnung • Potenzielle Auswirkungen durch gesteigerte Mengen an BAK in Kompost- und Vergärungsanlagen → Erhöhte Aussortierung notwendig → Erhöhte Kosten aufgrund erhöhter Aussortierung → Veränderung der Kompostzusammensetzung bei tatsächlicher Kompostierung (Obst- und Gemüsebeutel können auch ohne Bioabfall über Biotonne entsorgt werden) → Veränderung der Kapazitätsauslastungen der Verwertungsanlagen in Deutschland → Veränderung des Marktes • Gefahr der Steigerung von Fehlwürfen durch Verwechslung mit konventionellen Obst- und Gemüsebeuteln	• Änderung der Gesetzgebung (Ergänzung der Positivliste der BioAbfV sowie der Verpackungsverordnung) • Klare Informationen der öRE zur speziellen Zulassungsregelung in Gemeinde • Aufklärungsarbeit • Eindeutige Kennzeichnung der Produkte zur Abhebung von konventionellen Kunststoffen sowie mit vorgesehenen Verwertungsweg • Biobasiertheit als zusätzliche Voraussetzung → Bei energetischer Verwertung Erzeugung von erneuerbarer Energie • Anpassung der Norm EN 13432 an Kompostierzeiten deutscher Kompostieranlagen • Anpassung der Norm EN 13432 mit Vorgabe bestimmter Foliendicke • Anpassung Kompostierzyklen an Norm EN 13432 • Wiedereingliederung aussortierter Stoffe in neuen Kompostierzyklus

Als Chance wird eine Kaskadennutzung von Obst- und Gemüsebeuteln (sofern zertifiziert nach EN 13432) gesehen: zum einen können sie zum Transport von losem Obst und Gemüse verwendet werden; nach der Transportfunktion können diese Beutel entweder direkt als Bioabfallbeutel zur Sammlung von Bioabfällen genutzt werden oder der erleichterten Entsorgung der Bioabfälle durch ein gemeinsames Wegwerfen dienen. Beispielsweise kann der nicht mehr genießbare Inhalt zusammen mit dem Beutel entsorgt werden, wohingegen Beutel und Inhalt ansonsten aus hygienischen Gründen oftmals zusammen über die Restmülltonne entsorgt werden. Folglich könnten die Mengen der getrennt gesammelten Bioabfälle gesteigert werden. Eine gemeinsame Entsorgung widerspricht jedoch der Entsorgungsstruktur in Deutschland. Bio-, Verpackungs- und Restmüllabfälle sind hier getrennt zu sammeln. Die Verwertung von Verpackungen liegt dabei in der Verantwortung der Dualen Systeme.

²⁷ Chancen und Herausforderungen als Ergänzung zur Argumentationskette in Tabelle 18 bis Tabelle 23

Die Materialeigenschaften von Obst- und Gemüsebeuteln sind oftmals mit denen von Bioabfallbeuteln zu vergleichen. Somit sollten sich diese bei einer industriellen Kompostierung/ Vergärung auch ähnlich verhalten. Dieser Erfahrungswert könnte damit einen weiteren Vorteil darstellen. Unklar sind jedoch die Auswirkungen einer gesteigerten Menge an biologisch abbaubaren Kunststoffen in industriellen Kompostieranlagen/Vergärungsanlagen sowie im Kompost. Potenzielle Risiken könnten ein erhöhter Sortierbedarf und folglich erhöhte Kosten sowie eine veränderte Kompostqualität darstellen (Obst- und Gemüsebeutel können auch ohne Bioabfall über die Biotonne entsorgt werden). Auch könnte die Verwechslungsgefahr für Konsumenten steigen, da konventionelle Obst- und Gemüsebeutel äußerlich nicht von biologisch abbaubaren zu unterscheiden sind.

Zwingend notwendig sind schließlich zum einen klare Informationen der öRE über die Zulassungsregelungen in der Gemeinde sowie Verbraucheraufklärung im Allgemeinen (Internet, Veranstaltungen etc.). Eine auffällige Kennzeichnung der abbaubaren Obst- und Gemüsebeutel wäre zudem sinnvoll. Notwendig wäre auch eine Änderung der Gesetzgebung bzw. eine Ausnahmeregelung für Obst- und Gemüsebeutel in der BioAbfV. Weiter könnte die Anpassung der Norm EN 13432 an die tatsächlichen vorherrschenden Kompostierzyklen das Problem der zu langen Abbaudauer einiger Kunststoffbeutel lösen. Auch wäre die Beschränkung auf eine bestimmte Schichtdicke denkbar, sodass ein schnellerer Abbau zu erwarten wäre. Andererseits wäre auch die Verlängerung der Kompostierzyklen deutscher Kompostieranlagen möglich, um potenzielle Probleme mit der Abbaudauer von biologisch abbaubaren Kunststoffbeuteln zu reduzieren. Die Wiedereingliederung aussortierter Störstoffe nach der Kompostierung in den neuen Kompostierzyklus wäre dabei eine weitere denkbare Maßnahme.

Fazit zur Bewertung von Ansatz II: Aufnahme von sehr leichten Obst- und Gemüsebeuteln kleiner 15 Mikron in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen

Grundsätzlich wird die Aufnahme von sehr leichten Obst- und Gemüsebeuteln kleiner 15 Mikron in Anhang 1 der BioAbfV (sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen) mit der Zielsetzung der Kaskadennutzung als interessanter Ansatz erachtet, um die Bioabfallsammlung weiterhin zu stärken. Als Hauptverwertungsweg dieses möglichen Ansatzes wird die industrielle Kompostierung sowie im Falle einer Aussortierung die energetische Verwertung empfohlen.

Eine große Herausforderung besteht jedoch in der Verwechslungsgefahr mit Obst- und Gemüsebeuteln aus konventionellen Kunststoffen und entsprechend vielen Fehlwürfen. Um Fehlwürfe zu vermeiden, wäre auch eine nationale Verpflichtung einer Zertifizierung nach EN 13432 von Obst- und Gemüsebeuteln zusammen mit Kunststoffabfallbeuteln (siehe Ansatz I) zu erwägen. Dies wäre jedoch mit der Regelung der Herstellerverantwortung für Verpackungen in Einklang zu bringen.

5.3.3 Ansatz III: Aufnahme von Lebensmittelverpackungen in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen

Unter Ansatz III werden Chancen und Herausforderungen für den Fall untersucht, dass alle nach EN 13432 zertifizierte Lebensmittelverpackungen aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen in Anhang 1 der BioAbfV und folglich zur „Liste der für eine Verwertung auf Flächen geeigneten Bioabfälle sowie der dafür geeigneten anderen Abfälle, biologisch abbaubaren Materialien und mineralischen Stoffe“ aufgenommen würden. Somit wäre eine industrielle Kompostierung

von nach EN 13432 zertifizierten Lebensmittelverpackungen erlaubt. Zusätzlich werden potenzielle Maßnahmen diskutiert, welche für die Einführung dieses Ansatzes notwendig wären.

Tabelle 26: Ansatz III: Aufnahme von Lebensmittelverpackungen in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen²⁸

Chancen	Herausforderungen	Potenzielle notwendige Maßnahmen für Einführung in Deutschland
• Erleichterung der Entsorgung (keine Trennung notwendig) → Gesteigerte Sammlung von Abfällen über Biotonne möglich	• Gemeinsame Entsorgung widerspricht der Entsorgungsstruktur in Deutschland, den Grundsätzen der Abfallrahmenrichtlinie sowie den europäischen Richtlinien zur erweiterten Herstellerverantwortung (getrennte Sammlung von Bio-, Verpackungs- und Hausmüllabfällen) • Technische Eignung BAK als Lebensmittelverpackung weitgehend ungeklärt • Potenzielle Auswirkungen durch gesteigerte Mengen an BAK in Kompost- und Vergärungsanlagen → Erhöhte Aussortierung notwendig → Erhöhte Kosten aufgrund erhöhter Aussortierung → Veränderung der Kompostzusammensetzung bei tatsächlicher Kompostierung (Verpackungen können auch ohne Bioabfall über Biotonne entsorgt werden) → Veränderung des Marktes → Veränderung der Kapazitätsauslastungen der Verwertungsanlagen in Deutschland • Gefahr, dass selbst recycelfähige Verpackungen über Biotonne entsorgt werden	• Änderung der Gesetzgebung • Klare Informationen der öRE zur speziellen Zulassungsregelung in Gemeinde • Aufklärungsarbeit • Eindeutige Kennzeichnung der Produkte zur Abgrenzung von konventionellen Kunststoffen sowie mit vorgesehenem Verwertungsweg • Prüfung der Auswirkungen eines großflächigen Einsatzes von Kunststoffverpackungen in industriellen Kompostier- und Vergärungsanlagen • Anpassung der Norm EN 13432 an Kompostierzeiten deutscher Kompostieranlagen • Anpassung der Norm EN 13432 mit Vorgabe bestimmter Foliendicke • Anpassung Kompostierzyklen an Norm EN 13432 • Wiedereingliederung aussortierter Stoffe in neuen Kompostierzyklus

²⁸ Chancen und Herausforderungen als Ergänzung zur Argumentationskette in Tabelle 18 bis Tabelle 23

Chancen	Herausforderungen	Potenzielle notwendige Maßnahmen für Einführung in Deutschland
	• Höhere Abbauezeiten für Produkte mit höherer Materialdicke • Gefahr der Steigerung von Fehlwürfen durch Verwechslung mit konventionellen Verpackungen • Gefahr der Erleichterung von Lebensmittelverschwendung	

Als Vorteil kann die erleichterte Entsorgung für den Konsumenten gesehen werden. Dieser kann nicht mehr genießbare Lebensmittel samt biologisch abbaubarer Kunststoffverpackung in der Biotonne entsorgen, ohne die Verpackung von den Bioabfällen trennen zu müssen. Dies könnte die Mengen der getrennt gesammelten Bio- und Lebensmittelabfälle erhöhen, da diese ansonsten häufig über den Restmüll entsorgt werden. Eine gemeinsame Entsorgung von Bioabfällen und Verpackungen widerspricht jedoch der Entsorgungsstruktur Deutschlands. Verkaufsverpackungen werden in Deutschland über das Duale System Deutschland gesammelt, sortiert und verwertet. Dieses System wird vom Handel finanziert. Bepfandete Einweggetränkeverpackungen müssen vom Handel selbst zurückgenommen werden.

Eine großflächige Zulassung von Kunststoffverpackungen zur industriellen Kompostierung würde dieses Konzept folglich stören. Eine großflächige Zulassung würde auch Kompostier- und Vergärungsanlagenbetreiber vor Herausforderungen stellen. Dickwandigere biologisch abbaubare Kunststoffverpackungen bauen grundsätzlich nicht genauso schnell ab wie dünnwandige Bioabfall-, Obst- oder Gemüsebeutel. Eine erhöhte Aussortierung bzw. eine Beeinträchtigung der Kompostqualität wären die Folgen (v.a. da auch biologisch abbaubarer Kunststoffverpackungen ohne Lebensmittel(reste) entsorgt werden dürften). Auch besteht die Gefahr von Fehlwürfen durch den Konsumenten aufgrund einer Verwechslung von konventionellen und biologisch abbaubaren Kunststoffverpackungen. So würde der Anteil an energetisch verwerteten Kunststoffverpackungen vermutlich steigen. Dies ist als besonders kritisch einzustufen, da Lebensmittelverpackungen aus konventionellen Kunststoffen zum Großteil einem hochwertigen Recycling zugeführt werden könnten.

Für die Einführung dieses Ansatzes in Deutschland müssten weitere begleitende Maßnahmen eingeführt werden. Diese sind in Tabelle 26 oben gelistet.

Fazit zur Bewertung von Ansatz III: Aufnahme von Lebensmittelverpackungen in Anhang 1 der BioAbfV, sofern nach EN 13432 zertifiziert sowie Herstellung aus überwiegend nachwachsenden Rohstoffen

Ein großer ökologischer Vorteil wird bei Ansatz III vermisst. Die Nachteile überwiegen eindeutig. Folglich wird die Zulassung aller nach EN 13432 zertifizierten Kunststoffverpackungen zur industriellen Kompostierung oder Vergärung nicht empfohlen.

Exkurs - Gartenkompostierbare Kunststoffe

In Frankreich sind Obst- und Gemüsebeutel (kleiner 50 Mikron) nur erlaubt, sofern diese (z.B. nach NF T 51-800) als „gartenkompostierbar“ zertifiziert sind und gleichzeitig eine nachwachsende Rohstoffbasis besitzen. Da diese Regelung erst 2016 eingeführt wurde, gibt es bislang

kaum belastbare Erfahrungen zum großflächigen Umgang mit gartenkompostierbaren Obst- und Gemüsebeuteln in Frankreich.

Generell wird der Vorteil einer Gartenkompostierbarkeit in den hohen Anforderungen der Norm gesehen: da der Abbau hier bei geringen Temperaturen garantiert sein muss, ist zu erwarten, dass der Abbau bei höheren Temperaturen, wie sie in den industriellen Kompostieranlagen vorherrschen, in kürzerer Zeit stattfinden wird. Dadurch soll der Kunststoff sowohl für die Entsorgung im eigenen Garten als auch für die Entsorgung über die industrielle Kompostierung geeignet sein.

Bislang gibt es jedoch wenig Studien und Praxiserfahrungen zum biologischen Abbau von Kunststoffen im eigenen Kompost. Besonders die unterschiedlich vorherrschenden Bedingungen auf Komposten machen eindeutige Aussagen schwierig. Gartenkompostierung kann als solche nur von einem geringen Anteil der deutschen Bevölkerung praktiziert werden. Auch kann die Verwertung von biologisch abbaubaren Kunststoffen im eigenen Garten über die Satzungen der öRE für einen Teil der Bevölkerung untersagt werden. Dieser Teil, wie auch der Teil der Bevölkerung ohne Möglichkeit zur Eigenkompostierung, müsste den zertifizierten Kunststoff über die Biomülltonne entsorgen, was Verwirrung und Unsicherheiten aufgrund der Bezeichnung „gartenkompostierbar“ hervorrufen kann. Zudem gibt es wenig Erfahrung inwiefern eine Zertifizierung nach z.B. NF T 51-800 auch gleichzeitig die Anforderungen nach EN 13432 erfüllt. Aufgrund der oftmals geringen Schichtdicke von als gartenkompostierbar zertifizierten Produkten wird die Erfüllung der Anforderungen jedoch erwartet.

6 Quellenverzeichnis

(Accinelli et al. 2012)

Accinelli, Cesare; Saccà, Maria Ludovica; Mencarelli, Mariangela; Vicari, Alberto (2012): Deterioration of bioplastic carrier bags in the environment and assessment of a new recycling alternative. In: *Chemosphere* 89 (2), S. 136-143. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.05.028.

(ADEME 2016)

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Hg.) (2016): Plastiques biodégradables - Les Fiches Techniques de l' ADEME.

(Adhikari et al. 2016)

Adhikari, Dinesh; Mukai, Masaki; Kubota, Kenzo; Kai, Takamitsu; Kaneko, Nobuyuki; Araki, Kiwako S.; Kubo, Motoki (2016): Degradation of Bioplastics in Soil and Their Degradation Effects on Environmental Microorganisms. In: *JACEN* 05 (01), S. 23-34. DOI: 10.4236/jacen.2016.51003.

(Ahn et al. 2011)

Ahn, H. K.; Huda, M. S.; Smith, M. C.; Mulbry, W.; Schmidt, W. F.; Reeves, J. B. (2011): Biodegradability of injection molded bioplastic pots containing polylactic acid and poultry feather fiber. In: *Bioresource technology* 102 (7), S. 4930-4933. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.01.042.

(Anstey et al. 2014)

Anstey, Andrew; Muniyasamy, Sudhakar; Reddy, Murali M.; Misra, Manjusri; Mohanty, Amar (2014): Processability and Biodegradability Evaluation of Composites from Poly(butylene succinate) (PBS) Bioplastic and Biofuel Co-products from Ontario. In: *J Polym Environ* 22 (2), S. 209-218. DOI: 10.1007/s10924-013-0633-8.

(AÖL 2015)

Assoziation ökologischer Lebensmittelhersteller e.V. (Hg.) (2015): Biokunststoff-Tool. <http://biokunststofftool.aol.org/index.php?id=23>. Zuletzt geprüft 22.11.2017.

(Arbeitsgemeinschaft Deutsche Kunststoffindustrie 2014)

Arbeitsgemeinschaft Deutsche Kunststoffindustrie (Hg.) (2014): Kunststoffe - Werkstoffe unserer Zeit. 16. Aufl. Frankfurt am Main.

(Arcos et al. 2012)

Arcos-Hernandez, Monica V.; Laycock, Bronwyn; Pratt, Steven; Donose, Bogdan C.; Nikolić, Melissa A.L.; Luckman, Paul et al. (2012): Biodegradation in a soil environment of activated sludge derived polyhydroxyalkanoate (PHBV). In: *Polymer Degradation and Stability* 97 (11), S. 2301-2312. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.035.

(Arcos-Hernandez et al. 2012)

Arcos-Hernandez, Monica V.; Laycock, Bronwyn; Pratt, Steven; Donose, Bogdan C.; Nikolić, Melissa A.L.; Luckman, Paul et al. (2012): Biodegradation in a soil environment of activated sludge derived polyhydroxyalkanoate (PHBV). In: *Polymer Degradation and Stability* 97 (11), S. 2301-2312. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.07.035.

(BASF o.J.)

BASF (Hg.) (o.J.): Wissenswertes über kompostierbare Biobeutel aus ecovio. https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/function/conversions:/publish/common/upload/biodegradable_plastics/Wissenswertes_ueber_kompostierbare_Biobeutel_aus_ecovio_WEB.pdf. Aufgerufen am 19.03.2018.

(Bauhaus-Universität Weimar 2013)

Bauhaus Universität Weimar (Hg.) (2013): Anaerobe Testverfahren zur Zertifizierung von Biologisch Abbaubaren Werkstoffen. Abschlussbericht. Weimar.

(Bioplastics MAGAZINE 2015)

Bioplastics MAGAZINE (Hg.) (2015): Glossary 4.2. In: Bioplastics MAGAZINE. 03 (11), S. 46-49. <http://www.bioplasticsmagazine.com/bioplasticsmagazine-wAssets/docs/Glossary.pdf>. Aufgerufen am 03.11.2017.

(Boyandin et al. 2013)

Boyandin, Anatoly N.; Prudnikova, Svetlana V.; Karpov, Valery A.; Ivonin, Vladimir N.; Đỗ, Ngọc Lanh; Nguyễn, Thị Hoài et al. (2013): Microbial degradation of polyhydroxyalkanoates in tropical soils. In: *International Bio-deterioration & Biodegradation* 83, S. 77-84. DOI: 10.1016/j.ibiod.2013.04.014.

(Brandl und Püchner 1992)

Brandl, Helmut; Püchner, Petra (1992): Biodegradation of plastic bottles made from 'Biopol' in an aquatic ecosystem under in situ conditions. In: *Biodegradation* 2 (4), S. 237-242.

(Calmon et al. 1999)

Calmon, A.; Guillaume, S.; Bellon-Maurel, V.; Feuilloley, P.; Silvestre, F. (1999): Evaluation of Material Biodegradability in Real Conditions - Development of a Burial Test and an Analysis Methodology Based on Numerical Vision. In: *Journal of Environmental Polymer Degradation* 7 (3), S. 157-166.

(Castro-Aguirre 2016)

Castro-Aguirre, E.; Iñiguez-Franco, F.; Samsudinb, H.; Fang, X.; Auras, R. (2016): Poly(lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. In: *Advanced Drug Delivery Reviews*. 107, S. 333-366.

(Catia 1998)

Catia Bastioli (1998): Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials. In: *Polymer Degradation and Stability* 59, S. 263-272.

(CIC 2017)

Italian Composting and Biogas Association (Hg.) (2017): Annual Report on Biowaste Recycling. <http://compost.it/attachments/article/1212/Rapporto%20CIC%202017%20Eng%20v%202.6%20web%20version.pdf>. Aufgerufen am 01.02.2017.

(Consultic 2016)

Consultic Marketing und Industrieberatung (Hg.) (2016): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015. Kurzfassung.

(Consultic 2018)

Information übermittelt per E-Mail am 16.01.2018.

(Costa et al. 2014)

Costa, Raquel; Saraiva, Artur; Carvalho, Lopo; Duarte, Elizabeth (2014): The use of biodegradable mulch films on strawberry crop in Portugal. In: *Scientia Horticulturae* 173, S. 65-70. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.04.020.

(Detzel et al. 2012)

Detzel, Andreas; Kauertz, Benedikt; Derreza-Greeven, Cassandra (2012): Endbericht Untersuchung der Umweltwirkungen von Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen. Erstellt für das Umweltbundesamt. Herausgeber: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (IFEU). Heidelberg.

(Di Franco et al. 2004)

Di Franco, C. R.; Cyras, V. P.; Busalmen, J. P.; Ruseckaite, R. A.; Vázquez, A. (2004): Degradation of polycaprolactone/starch blends and composites with sisal fibre. In: *Polymer Degradation and Stability* 86 (1), S. 95-103. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.02.009.

(Dicheplastica6 2017)

Dicheplastica6 (Hg.) (2017): Biowaste: presentati i dati delle ricerche per favorire la qualità della raccolta differenziata dell'umido e della plastica. <http://www.dicheplastica6.it/news/biowaste-dati-raccolta-umido-plastica/>. Aufgerufen am 21.02.2018.

(Du et al. 2008)

Du, Yan-Li; Cao, Yu; Lu, Fang; Li, Fang; Cao, Yi; Wang, Xiu-Li; Wang, Yu-Zhong (2008): Biodegradation behaviors of thermoplastic starch (TPS) and thermoplastic dialdehyde starch (TPDAS) under controlled composting conditions. In: *Polymer Testing* 27 (8), S. 924-930. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2008.08.002.

(Emadian et al. 2017)

Emadian, S. Mehdi; Onay, Turgut T.; Demirel, Burak (2017): Biodegradation of bioplastics in natural environments. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 59, S. 526-536. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.10.006.

(Endres/Siebert-Raths 2009)

Endres, Hans-Josef; Siebert-Raths, Andrea (2009): Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. Carl Hanser Verlag. München.

(Eubeler 2010)

Eubeler, Jan P. (2010): Biodegradation of Synthetic Polymers in the Aquatic Environment. Dissertation. Universität Bremen.

(EUBP 2009)

European Bioplastics (Hg.) (2009): Industrial Composting. http://docs.european-bioplastics.org/2016/publications/fs/EUBP_fs_industrial_composting.pdf. Aufgerufen am 09.01.2018.

(EUBP 2015a)

European Bioplastics (Hg.) (2015): Bioplastics. Facts and Figures. http://docs.european-bioplastics.org/2016/publications/EUBP_facts_and_figures.pdf. Aufgerufen am 16.11.2017.

(EUBP 2015b)

European Bioplastics (Hg.) (2015): "Oxo-biodegradable" plastics and other plastics with additives for degradation. http://docs.european-bioplastics.org/2016/publications/bp/EUBP_bp_additive-mediated_plastics.pdf. Aufgerufen am 05.12.2017.

(EUBP 2015c)

European Bioplastics (Hg.) (2015): Anaerobic Digestion. Factsheet. http://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_Anaerobic_digestion.pdf. Aufgerufen am 12.01.2018.

(EUBP 2015d)

European Bioplastics (Hg.) (2015): Home Composting. Factsheet. http://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_Home_composting.pdf. Aufgerufen am 20.03.2018.

(EUBP 2015e)

European Bioplastics (Hg.) (2015): Energy Recovery. Factsheet. http://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_Energy_recovery.pdf. Aufgerufen am 20.03.2018.

(EUBP 2016)

European Bioplastics (Hg.) (2016): Frequently Asked Questions on Bioplastics. http://docs.european-bioplastics.org/2016/publications/EUBP_FAQ_on_bioplastics.pdf. Aufgerufen am 02.11.2017

(EUBP 2017)

European Bioplastics (Hg.) (2017): Fertiliser Regulation: Biodegradable Mulch Films. http://docs.european-bioplastics.org/publications/pp/EUBP_EuropaBio_PP_Fertilizer_Regulation.pdf. Aufgerufen am 21.03.2018.

(EUBP o.J.)

European Bioplastics (Hg.) (o.J.): What are bioplastics? <http://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>. Aufgerufen am 26.10.2017.

(Europäische Kommission 2012)

Europäische Kommission (Hg.) (2012): Innovation für nachhaltiges Wachstum: eine Bioökonomie für Europa. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52012DC0060&from=EN> . Aufgerufen am 29.11.2017.

(Europäische Kommission 2013)

Europäische Kommission (Hg.) (2013): Gut leben innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten. Das 7. UAP - ein allgemeines Umweltaktionsprogramm der Union für die Zeit bis 2020. Brüssel. <http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/7eap/de.pdf>. Aufgerufen am 29.11.2017.

(Europäische Kommission 2017a)

Europäische Kommission (Hg.) (2017): Circular Economy. http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm. Aufgerufen am 29.11.2017.

(Europäische Kommission 2017b)

Europäische Kommission (Hg.) (2017): Roadmap. Strategy on Plastics in a Circular Economy. http://ec.europa.eu/smart-regulation/roadmaps/docs/plan_2016_39_plastic_strategy_en.pdf. Aufgerufen am 29.11.2017.

(Europäische Kommission 2018)

Europäische Kommission (Hg.) (2018): Eine europäische Strategie für Kunststoffe in der Kreislaufwirtschaft. http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_3&format=PDF. Aufgerufen am 25.01.2018.

(Europäische Kommission o.J.)

Europäische Kommission (Hg.) (o.J.): Strategie Europa 2020.

https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/economic-and-fiscal-policy-coordination/eu-economic-governance-monitoring-prevention-correction/european-semester/framework/europe-2020-strategy_de. Aufgerufen am 05.12.2017.

(Eurostat 2015)

Eurostat (Hg.) (2015): Knapp über 40% der EU-Bevölkerung leben in Städten. Pressemitteilung. <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/7020156/3-05102015-BP-DE.pdf/14498442-8e3a-4817-809e-1b632159bb4c>. Aufgerufen am 20.03.2018.

(FNR 2013)

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hg.) (2013): Biokunststoffe - Pflanzen, Rohstoffe, Produkte. Gülzow-Prüzen.

(FNR 2016)

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.) (Hg.) (2016): Neue bioabbaubare Mulchfolien und Geotextilien in Entwicklung. https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/archiv/archiv-nachricht/?tx_ttnews%5Byear%5D=2016&tx_ttnews%5Bmonth%5D=10&tx_ttnews%5Bday%5D=20&tx_ttnews%5Btt_news%5D=9375&cHash=a8d9aa26a1aa5d39c783501896c00bf3. Aufgerufen am 28.03.2018.

(General Secretariat of the Council 2018)

Council of the European Union (2018): Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2008/98/EC on waste. Brussels, 23.02.2018. <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-30751-directive-dechets.pdf>. Aufgerufen am 19.03.2018.

(Gilmore et al. 1993)

Gilmore, D. F.; Antoun, S.; Lenz, R. W.; Fuller, R. C. (1993): Degradation of Poly([-Hydroxyalkanoates) and Polyolefin Blends in a Municipal Wastewater Treatment Facility. In: *Journal of Environmental Polymer Degradation* 1 (4), S. 269-274.

(Gómez und Michel 2013)

Gómez, Eddie F.; Michel, Frederick C. (2013): Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation. In: *Polymer Degradation and Stability* 98 (12), S. 2583-2591. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.018.

(Gröll et al. 2017)

Gröll, Klaus; Kern, Michael; Turk, Thomas; Werner, Jenny (2017): Praxisversuch mit kompostierbaren Biobeuteln. In: *Abfallsammlung*. (6) 15, S. 304-312.

(Gu et al. 1993)

Gu, Ji-Dong; Eberiel, D.; McCarthy, S. P.; Gross, R. A. (1993): Degradation and mineralization of cellulose acetate in simulated thermophilic compost environments. In: *J Environ Polym Degr* 1 (4), S. 281-291. DOI: 10.1007/BF01458295.

(Halley et al. 2001)

Halley, Pete; Rutgers, Rulande; Coombs, Steve; Kettels, Janine; Gralton, John; Christie, Gregor et al. (2001): Developing Biodegradable Mulch Films from Starch-Based Polymers. In: *Starch/Stärke* 53 (8), S. 362. DOI: 10.1002/1521-379X(200108)53:8<362::AID-STAR362>3.0.CO;2-J.

(Hamprecht/Kosak 2011)

Hamprecht, Jens; Kosak, Georg (2011): Biologisch abbaubar. In: *Umwelt Magazin*. Sonderdruck 10/11-2011. Springer VDI Verlag. https://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/function/conversions:/publish/commmon/upload/biodegradable_plastics/ecovio_umweltmagazin.pdf. Aufgerufen am 20.03.2018.

(Heimowska et al. 2017)

Heimowska, Aleksandra; Morawska, Magda; Bocho-Janiszewska, Anita (2017): Biodegradation of poly(ε-caprolactone) in natural water environments. In: *Polish Journal of Chemical Technology* 19 (1), S. 854. DOI: 10.1515/pjct-2017-0017.

(Holland Bioplastics 2017)

Holland Bioplastics (Hg.) (2017): Creation of better conditions for Compostable Products in the Netherlands. By Erwin Vink. Präsentation. 6. April 2017.

(IfBB 2016)

IfBB (Institute for Bioplastics and Biocomposites) (Hg.) (2016): Biopolymers facts and statistics. Hochschule Hannover - University of Applied Science and Arts. Hannover

(IfBB 2017)

IfBB (Institute for Bioplastics and Biocomposites) (Hg.) (2017): Häufig gestellte Fragen. <http://www.ifbb-hannover.de/de/faqs.html>. Aufgerufen am 25.10.2017

(ISWA 2015)

International Solid Waste Association (Hg.) (2015): Biodegradable Plastics - An Overview of the Compostability of Biodegradable Plastics and its Implications for the Collection and Treatment of Organic Wastes. Wien.

(Itävaara et al. 2002)

Itävaara, Merja; Karjomaa, Sari; Selin, Johan-Fredrik (2002): Biodegradation of polylactide in aerobic and anaerobic thermophilic conditions. In: *Chemosphere* 46 (6), S. 879-885. DOI: 10.1016/S0045-6535(01)00163-1.

(Jayasekara et al. 2003)

Jayasekara, R.; Sheridan, S.; Loubakos, E.; Beh, H.; Christie, G.B.Y; Jenkins, M. et al. (2003): Biodegradation and ecotoxicity evaluation of a bionolle and starch blend and its degradation products in compost. In: *International Biodeterioration & Biodegradation* 51 (1), S. 77-81. DOI: 10.1016/S0964-8305(02)00090-2.

(Kale 2007a)

Kale, Gaurav; Auras, Rafael; Singh, Sher Paul (2007a): Comparison of the degradability of poly(lactide) packages in composting and ambient exposure conditions. In: *Packag. Technol. Sci.* 20 (1), S. 49-70. DOI: 10.1002/pts.742.

(Kale 2007b)

Kale, Gaurav; Auras, Rafael; Singh, Sher Paul; Narayan, Ramani (2007b): Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions. In: *Polymer Testing* 26 (8), S. 1049-1061. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2007.07.006.

(KANEKA Corporation 2014)

KANEKA Corporation (2014): Aonilex Bio-based biodegradable polymer. Online verfügbar unter www.kaneka.co.jp.

(Kanthak/Söling 2012)

Kanthak, Manfred; Söling, Frieder: Bewertung des Einsatzes von kompostierbaren Sammelbeuteln aus ecovio®-Materia. In: *Müll und Abfall*. 44 (8), S. 402-404.

(Kapanen et al. 2008)

Kapanen, Anu; Schettini, Evelia; Vox, Giuliano; Itävaara, Merja (2008): Performance and Environmental Impact of Biodegradable Films in Agriculture. A Field Study on Protected Cultivation. In: *J Polym Environ* 16 (2), S. 109-122. DOI: 10.1007/s10924-008-0091-x.

(Karamanlioglu et al. 2017)

Karamanlioglu, Mehlika; Preziosi, Richard; Robson, Geoffrey D. (2017): Abiotic and biotic environmental degradation of the bioplastic polymer poly(lactic acid). A review. In: *Polymer Degradation and Stability* 137, S. 122-130. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.009.

(Kauertz et al. 2011)

Kauertz, Benedikt; Detzel, Andreas; Volz, Susanne (2011): Ökobilanz von Danone Activia-Verpackungen aus Polystyrol und Polylactid. Herausgeber: Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU). Im Auftrag der Danone GmbH. Heidelberg.

(Kern et al. 2017)

Kern, Michael; Turk, Thomas; Hüttner, Axel und Koj, Ulla (2017): BAW-Beuteleinsatz in Biogutvergärungsanlagen - Praxisversuch in vier Anlagen. Müll und Abfall. S. 64-69.

(Kijchavengkul et al. 2008a)

Kijchavengkul, Thitisilp; Auras, Rafael; Rubino, Maria; Ngouajio, Mathieu; Fernandez, R. Thomas (2008a): Assessment of aliphatic-aromatic copolyester biodegradable mulch films. Part I. Field study. In: *Chemosphere* 71 (5), S. 942-953. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.10.074.

(Kijchavengkul et al. 2008b)

Kijchavengkul, Thitisilp; Auras, Rafael; Rubino, Maria; Ngouajio, Mathieu; Fernandez, R. Thomas (2008b): Assessment of aliphatic-aromatic copolyester biodegradable mulch films. Part II. Laboratory simulated conditions. In: *Chemosphere* 71 (5), S. 1607-1616. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.01.037.

(Kijchavengkul et al. 2010)

Kijchavengkul, Thitisilp; Auras, Rafael; Rubino, Maria; Selke, Susan; Ngouajio, Mathieu; Fernandez, R. Thomas (2010): Biodegradation and hydrolysis rate of aliphatic aromatic polyester. In: *Polymer Degradation and Stability* 95 (12), S. 2641-2647. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.07.018.

(Kim et al. 2013)

Kim, Seonghun; Park, Seongwook; Lee, Kyoungsoon (2013): 2014_Kim_fishing_performance_biodegradable_NetPot. In: *Turk. J. Fish. Aquat. Sci.* 14 (1). DOI: 10.4194/1303-2712-v14_1_03.

(Kim et al. 2014)

Kim, Sang-Goo; Lee, Won-IL; Yuseok, Moon (2014): The estimation of derelict fishing gear in the coastal waters of South Korea. Trap and gill-net fisheries. In: *Marine Policy* 46, S. 119-122. DOI: 10.1016/j.marpol.2014.01.006.

(Kim et al. 2016)

Kim, S.; Kim, P.; Lim, J.; An, H.; Suuronen, P. (2016): Use of biodegradable driftnets to prevent ghost fishing. Physical properties and fishing performance for yellow croaker. In: *Anim Conserv* 19 (4), S. 309-319. DOI: 10.1111/acv.12256.

(Kosak 2013)

Kosak, Georg: Stabile Tüten zur Sammlung von mehr Bioabfall. Müll und Abfall (5) 2013, S. 258-262

(Kreindl 2013)

Kreindl, Gernot (2013): Einsatz von Biokunststoffverpackungen aus Sicht der Abfallwirtschaft. In: Thomé-Kozminsky, Goldmann (Hg.) (2013): Recycling und Rohstoffe. S. 262-291

(Künkel 2017)

Künkel, Andreas (2017): Biodegradable mulch film -clarification of polymer fate in soil. Biopolymers Research BASF SE. 12th European Bioplastics Conference, 28&29 November 2017, Berlin, 2017.

(Künkel et al. 2016)

Künkel, Andreas; Becker, J.; Börger, L.; Hamprecht, J.; Koltzenburg, S.; Loos, R. et al. (2016): "Polymers, Biodegradable". Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry).

(Lepoudre 2017)

Lepoudre, Erwin (2017): Development of PHBH™based Marine Biodegradable Applications. KANEKA Belgium N.V. 12th European Bioplastics Conference, 28&29 November 2017, Berlin, 2017.

(Li et al. 2014)

Li, C.; Moore-Kucera, J.; Lee, J.; Corbin, A.; Brodhagen, M.; Miles, C.; Inglis, D. (2014): Effects of biodegradable mulch on soil quality. In: *Applied Soil Ecology* 79, S. 59-69. DOI: 10.1016/j.apsoil.2014.02.012.

(Lott et al. 2016)

Lott, C.; Weber, M.; Makarow, D.; B. Unger (HYDRA); Pikasi, A.; Briassoulis, D. et al. (2016): Marine degradation test field assessment. Deliverable N° D5.8 (Open-BIO: Opening bio-based markets via standards, labelling and procurement; Work package 5, In situ biodegradation). Online verfügbar unter <http://www.biobasedeconomy.eu/projects/open-bio/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.

(LUBW 2018a)

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hg.): Kompostierung von Bio- und Grünabfälle. <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/abfall-und-kreislaufwirtschaft/kompostierung-von-bio-und-grun-gut>. Aufgerufen am 09.01.2018.

(LUBW 2018b)

Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hg.): Vergärung von Bio- und Grüngut. <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/abfall-und-kreislaufwirtschaft/vergarung-von-bio-und-grungut>. Aufgerufen am 09.01.2018.

(Massardier-Nageotte et al. 2006)

Massardier-Nageotte, V.; Pestre, C.; Cruard-Pradet, T.; Bayard, R. (2006): Aerobic and anaerobic biodegradability of polymer films and physico-chemical characterization. In: *Polymer Degradation and Stability* 91 (3), S. 620-627. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2005.02.029.

(Masui et al. 2011)

Masui, Akihiko; Ikawa, Satoshi; Fujiwara, Nobuaki; Hirai, Hiroaki (2011): Influence for Soil Environment by Continuing use of Biodegradable Plastic. In: *J Polym Environ* 19 (3), S. 622-627. DOI: 10.1007/s10924-011-0314-4.

(Merk 2015)

Merk, Katrin (2015): Biokunststoffe in der Verpackungsindustrie. In: Maïke Sippel (Hg.): Nachhaltigkeit im industriellen Umfeld. Studentische Fachkonferenz 2015. HTWG Konstanz; HS-Ravensburg-Weingarten, S. 66-70.

(Moreno et al. 2017)

Moreno, Marta M.; González-Mora, Sara; Villena, Jaime; Campos, Juan A.; Moreno, Carmen (2017): Deterioration pattern of six biodegradable, potentially low-environmental impact mulches in field conditions. In: *Journal of environmental management* 200, S. 490-501. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.06.007.

(Muroi et al. 2016)

Muroi, Fumihiko; Tachibana, Yuya; Kobayashi, Yukiko; Sakurai, Takanori; Kasuya, Ken-ichi (2016): Influences of poly(butylene adipate-co-terephthalate) on soil microbiota and plant growth. In: *Polymer Degradation and Stability* 129, S. 338-346. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.05.018.

(nabu 2017)

Naturschutzbund Deutschland (Hg.) (2017): Alles wichtige rund um das Thema Bioabfallsammlung. <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/bioabfall/23033.html>. Aufgerufen am 21.03.2018.

(narocon/nova-Institut 2016)

Narocon (Kaeb, Harald) und nova-Institut (Aeschelmann, Florence; Dammer, Lara; Carus, Michael) (2016): Consumption of biodegradable and compostable plastic products in Europe. Publiziert: 28.04.2016.

(Ngouajio et al. 2008)

Ngouajio, M.; Auras, R.; Fernandez, R. T. (2008): Field Performance of Aliphatic-aromatic Copolyester Biodegradable Mulch Films in a Fresh Market Tomato Production System. In: *HortTechnology* 18 (4), S. 605-610.

(nova-Institut/EUBP 2016)

European Bioplastics (Hg.) (2016): Bioplastics. Facts and Figures. Data for the year 2015. Berlin.

(nova-Institut/EUBP 2017)

European Bioplastics (Hg.) (2017): Bioplastics. Facts and Figures. Data for the year 2016. Berlin.

(O'Brine und Thompson 2010)

O'Brine, Tim; Thompson, Richard C. (2010): Degradation of plastic carrier bags in the marine environment. In: *Marine pollution bulletin* 60 (12), S. 2279-2283. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.08.005.

(Ohkita und Lee 2006)

Ohkita, Tsutomu; Lee, Seung-Hwan (2006): Thermal degradation and biodegradability of poly (lactic acid)/corn starch biocompo-sites. In: *J. Appl. Polym. Sci.* 100 (4), S. 3009-3017. DOI: 10.1002/app.23425.

(Ohtak et al. 1998)

Ohtaki, Akihito; Sato, Noriaki; Nakasaki, Kiyohiko (1998): Biodegradation of poly-e-caprolactone under controlled cornposting conditions. In: *Polymer Degradation and Stability* 61, S. 499-505.

(Öko-Institut et al. 2008)

Öko-Institut, FH Mainz, IGW (Hg.) (2008): Optimierung der Abfallwirtschaft in Hamburg unter dem besonderen Aspekt des Klimaschutzes. Freiburg. <http://www.hamburg.de/content-blob/2986416/7fdd8a1834412e62c11ce03cc3300930/data/gutachten-klima.pdf;jsessionid=BCD7E4D809F1F821315225620D5168D2.liveWorker2>. Aufgerufen am 20.03.2018.

(Ong und Sudesh 2016)

Ong, Su Yean; Sudesh, Kumar (2016): Effects of polyhydroxyalkanoate degradation on soil microbial community. In: *Polymer Degradation and Stability* 131, S. 9-19. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.024.

(Pauli et al. 2017)

Pauli, Nora-Charlotte; Petermann, Jana S.; Lott, Christian; Weber, Miriam (2017): Macrofouling communities and the degradation of plastic bags in the sea. An in situ experiment. In: *Royal Society open science* 4 (10), S. 170549. DOI: 10.1098/rsos.170549.

(PlasticsEurope 2016)

PlasticsEurope (Hg.) (2016): Plastics - the Facts 2016. An analysis of European plastics production, demand and waste data. Brüssel. <http://www.plasticseurope.org/application/files/4315/1310/4805/plastic-the-fact-2016.pdf>. Aufgerufen am 16.02.2018.

(Qi et al. 2017)

Qi, Xiang; Ren, Yiwei; Wang, Xingzu (2017): New advances in the biodegradation of Poly(lactic) acid. In: *International Biodeterioration & Biodegradation* 117, S. 215-223. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.01.010.

(Rossi et al. 2015)

Rossi, Vincent; Cleeve-Edwards, Nina; Lundequist, Lars; Schenker, Urs; Dubois, Carole; Humbert, Sebastien; Joliet, Oliver (2015): Life cycle assessment of end-of-life options for two biodegradable packaging materials: sound application of the European waste hierarchy. In: *Journal of Cleaner Production*. 86, S. 132-145.

(Rudnik und Briassoulis 2011)

Rudnik, E.; Briassoulis, D. (2011): Degradation behaviour of poly(lactic acid) films and fibres in soil under Mediterranean field conditions and laboratory simulations testing. In: *Industrial Crops and Products* 33 (3), S. 648-658. DOI: 10.1016/j.indcrop.2010.12.031.

(Schlegel 2018)

Schlegel, K. (2018): Hintergrundpapier zu Abbaumechanismen von bioabbaubaren Kunststoffen. Hg. v. BASF SE.

(Schmidt 2016)

Schmidt, H. (2016): Praxisversuch zur Steigerung der Bioabfallerfassung in München. „Neuhausens wertvollste Sammlung“. Abfallwirtschaftsbetriebe München. Präsentation.

(Sekiguchi et al. 2011)

Sekiguchi, Takayoshi; Saika, Azusa; Nomura, Koji; Watanabe, Toshihiro; Watanabe, Toru; Fujimoto, Yu et al. (2011): Biodegradation of aliphatic polyesters soaked in deep seawaters and isolation of poly(ϵ -caprolactone)-degrading bacteria. In: *Polymer Degradation and Stability* 96 (7), S. 1397-1403. DOI: 10.1016/j.polymdegrad-stab.2011.03.004.

(SFEP 2011)

Science for Environment Policy (Hg.) (2011): Plastic waste: redesign and biodegradability, DG Environment News Alert Service. 01.

(Shah et al. 2014)

Shah, Aamer Ali; Kato, Satoshi; Shintani, Noboru; Kamini, Numbi Ramudu; Nakajima-Kambe, Toshiaki (2014): Microbial degradation of aliphatic and aliphatic-aromatic co-polyesters. In: *Applied microbiology and biotechnology* 98 (8), S. 3437-3447. DOI: 10.1007/s00253-014-5558-1.

(Shin et al. 2004)

Shin, Boo-Young; Lee, Sang-II; Shin, Young-Sub; Balakrishnan, Sunder; Narayan, Ramani (2004): Rheological, mechanical and biodegradation studies on blends of thermoplastic starch and polycaprolactone. In: *Polym Eng Sci* 44 (8), S. 1429-1438. DOI: 10.1002/pen.20139.

(Showa Denko K.K. 2015)

Showa Denko K.K. (2015): Bionolle™ aliphatic polyester.

(Solaro et al. 1998)

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

(Tabasi et al. 2015)

Tabasi, Ramin Yousefzadeh; Ajji, Abdellah (2015): Selective degradation of biodegradable blends in simulated laboratory composting. In: *Polymer Degradation and Stability* 120, S. 435-442. DOI: 10.1016/j.polymdegrad-stab.2015.07.020.

(Tachibana et al. 2013)

Tachibana, Koichiro; Urano, Yuichi; Numata, Keiji (2013): Biodegradability of nylon 4 film in a marine environment. In: *Polymer Degradation and Stability* 98 (9), S. 1847-1851. DOI: 10.1016/j.polymdegrad-stab.2013.05.007.

(Thielen 2012)

Thielen, Michael (2012): Biokunststoffe. Grundlagen, Anwendungen, Märkte. 1. Auflage. Polymedia Publ. Mönchengladbach.

(Tokiwa und Calabia 2006)

Tokiwa, Yutaka; Calabia, Buenaventurada P. (2006): Biodegradability and biodegradation of poly(lactide). In: *Applied microbiology and biotechnology* 72 (2), S. 244-251. DOI: 10.1007/s00253-006-0488-1.

(Tokiwa und Calabia 2009)

Tokiwa, Yutaka; Calabia, Buenaventurada P.; Ugwu, Charles U.; Aiba, Seiichi (2009): Biodegradability of plastics. In: *International journal of molecular sciences* 10 (9), S. 3722-3742. DOI: 10.3390/ijms10093722.

(Tosin et al. 2012)

Tosin, Maurizio; Weber, Miriam; Siotto, Michela; Lott, Christian; Degli Innocenti, Francesco (2012): Laboratory test methods to determine the degradation of plastics in marine environmental conditions. In: *Frontiers in microbiology* 3, S. 225. DOI: 10.3389/fmicb.2012.00225.

(Tosin et al. 2016a)

Tosin, M.; Pognani, M.; Degli Innocenti, F.; Lott, C.; Weber, M.; Makarow, D. et al. (2016a): Marine degradation test lab assessment: Marine degradation test of bio-based materials at laboratory and mesocosm scale assessed. Deliverable N° 5.7 (Open-BIO: Opening bio-based markets via standards, labelling and procurement; Work package 5, In situ biodegradation). Online verfügbar unter <http://www.biobasedeconomy.eu/projects/open-bio/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.

(Tosin et al. 2016b)

Tosin, M.; Pognani, M.; F. Degli Innocenti (Novamont S.p.A.); Weber, M.; Lott, C.; Makarow, D. et al. (2016b): Validation of lab and mesocosm tests against field experiments. Deliverable N° 5.6 (Open-BIO: Opening bio-based markets via standards, labelling and procurement; Work package 5, In situ biodegradation). Online verfügbar unter <http://www.biobasedeconomy.eu/projects/open-bio/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.

(Tosin et al. 2016c)

Tosin, M.; Pognani, M.; F. Degli Innocenti (Novamont S.p.A.); Wilde, B. De; N. Mortier (OWS nv); Briassoulis, D. et al. (2016c): Draft test methods and specifications on marine degradation of bio-based materials. Deliverable N° 5.9 (Open-BIO: Opening bio-based markets via standards, labelling and procurement; Work package 5, In situ biodegradation). Online verfügbar unter <http://www.biobasedeconomy.eu/projects/open-bio/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.

(UBA 2012)

Umweltbundesamt (Hg) (2012): Handbuch Bioabfallbehandlung. Erfassung des Anlagenbestands Bioabfallbehandlung. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4324.pdf>. Aufgerufen am 29.01.2018.

(UBA 2016a)

Umweltbundesamt (Hg.) (2016): Abfallrecht. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallrecht>. Aufgerufen am 29.01.2018.

(UBA 2016b)

Umweltbundesamt (Hg.) (2016): Bioabfälle. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bioabfaelle#textpart-1>. Aufgerufen am 29.01.2018.

(UBA 2016c)

Umweltbundesamt (Hg.) (2016): Kompost, Eigenkompostierung. <https://www.umweltbundesamt.de/umwelt-tipps-fuer-den-alltag/garten-freizeit/kompost-eigenkompostierung#textpart-1>. Aufgerufen am 20.03.2018.

(UMSICHT et al. 2017)

Fraunhofer UMSICHT, IAP, IVV, WKI; Technische Universität Chemnitz; Knoten Weimar; IfBB; Bösel Plastic Management GmbH (Hg.) (2017): PLA in the Waste Stream. <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/berichte/2017/ergebnisbericht-pla-abfaelle-im-abfallstrom.pdf>. Aufgerufen am 20.02.2018.

(Vincotte 2017a)

Vincotte (2017a): Liste der Zertifikat-Inhaber für OK biodegradable MARINE, OK biodegradable SOIL, OK biodegradable WATER. Online verfügbar unter <http://www.okcompost.be/en/download-documentation/>, zuletzt aktualisiert am 20.09.2017, zuletzt geprüft am 28.01.2018.

(Vincotte 2017b)

Vincotte (2017b): Liste der Zertifikat-Inhaber für OK Compost. Online verfügbar unter <http://www.okcompost.be/en/download-documentation/>, zuletzt aktualisiert am 27.09.2017, zuletzt geprüft am 28.01.2018.

(Vincotte 2017c)

Vincotte (2017c): Liste der Zertifikat-Inhaber für OK Compost HOME. Online verfügbar unter <http://www.okcompost.be/en/download-documentation/>, zuletzt aktualisiert am 27.09.2017, zuletzt geprüft am 28.01.2018.

(Volova et al. 2007)

Volova, T. G.; Gladyshev, M. I.; Trusova, M. Y.; Zhila, N. O. (2007): Degradation of polyhydroxyalkanoates in eutrophic reservoir. In: *Polymer Degradation and Stability* 92 (4), S. 580-586. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.01.011.

(Volova et al. 2010)

Volova, T. G.; Boyandin, A. N.; Vasiliev, A. D.; Karpov, V. A.; Prudnikova, S. V.; Mishukova, O. V. et al. (2010): Biodegradation of polyhydroxyalkanoates (PHAs) in tropical coastal waters and identification of PHA-degrading bacteria. In: *Polymer Degradation and Stability* 95 (12), S. 2350-2359. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.08.023.

(Weng et al. 2011)

Weng, Yun-Xuan; Wang, Xiu-Li; Wang, Yu-Zhong (2011): Biodegradation behavior of PHAs with different chemical structures under controlled composting conditions. In: *Polymer Testing* 30 (4), S. 372-380. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2011.02.001.

(Weng et al. 2013)

Weng, Yun-Xuan; Jin, Yu-Juan; Meng, Qing-Yang; Wang, Lei; Zhang, Min; Wang, Yu-Zhong (2013): Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions. In: *Polymer Testing* 32 (5), S. 918-926. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.05.001.

(WFBR 2017)

Wageningen Food & Biobased Research (2017): Bio-based and biodegradable plastics - Facts and Figures- Focus on food packaging in the Netherlands. Wageningen.

(Wilde et al. 2016a)

Wilde, B. De; Mortier, N.; Tosin, M.; Pognani, M.; Degli Innocenti, F. (2016a): Environmental safety of biodegradation residuals of polymers (Open-BIO: Opening bio-based markets via standards, labelling and procurement;

Work package 5, In situ biodegradation). Online verfügbar unter <http://www.biobasedeconomy.eu/projects/open-bio/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.

(Wilde et al. 2016b)

Wilde, B. De; N. Mortier (OWS nv); Tosin, M.; Pognani, M.; F. Degli Innocenti (Novamont S.p.A.); D et al. (2016b): Round robin test on freshwater biodegradation. Deliverable N° 5.2 (Open-BIO: Opening bio-based markets via standards, labelling and procurement; Work package 5, In situ biodegradation). Online verfügbar unter <http://www.biobasedeconomy.eu/projects/open-bio/>, zuletzt geprüft am 25.01.2018.

(Witt et al. 2001)

Witt, U.; Einig, T.; Yamamoto, M.; Kleeberg, I.; Deckwer, W.-D; Müller, R.-J (2001): Biodegradation of aliphatic-aromatic copolyesters. Evaluation of the final biodegradability and ecotoxicological impact of degradation intermediates. In: *Chemosphere* 44 (2), S. 289-299. DOI: 10.1016/S0045-6535(00)00162-4.

(Xu und Guo 2010)

Xu, Jun; Guo, Bao-Hua (2010): Poly(butylene succinate) and its copolymers. Research, development and industrialization. In: *Biotechnology journal* 5 (11), S. 1149-1163. DOI: 10.1002/biot.201000136.

(Yagi et al. 2009)

Yagi, Hisaaki; Ninomiya, Fumi; Funabashi, Masahiro; Kunioka, Masao (2009): Anaerobic biodegradation tests of poly(lactic acid) and polycaprolactone using new evaluation system for methane fermentation in anaerobic sludge. In: *Polymer Degradation and Stability* 94 (9), S. 1397-1404. DOI: 10.1016/j.polymdegrad-stab.2009.05.012.

(Yagi et al. 2013)

Yagi, Hisaaki; Ninomiya, Fumi; Funabashi, Masahiro; Kunioka, Masao (2013): Thermophilic anaerobic biodegradation test and analysis of eubacteria involved in anaerobic biodegradation of four specified biodegradable polyesters. In: *Polymer Degradation and Stability* 98 (6), S. 1182-1187. DOI: 10.1016/j.polymdegrad-stab.2013.03.010.

A Anhang

A.1 Fragebogen

1

Fragebogen „Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe“

Definition biologisch abbaubare Kunststoffe

Im Forschungsvorhaben geht es um den Umgang und die Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe. Der Begriff „biologisch abbaubarer Kunststoff“ ist oftmals nicht klar abgegrenzt.

1. Welche Definition erscheint Ihnen geeignet?

...

2. Welche Kriterien der Festlegung legen Sie dieser Definition zugrunde?

...

Teil A: Überblick biologisch abbaubare Kunststoffe

1. Wo werden biologisch abbaubare Kunststoffe in Ihrem Land hauptsächlich eingesetzt (z.B. Bioabfalltüten, Verpackungen, Landwirtschaftsfolien, Bedarfsgegenstände, Spielzeug o.Ä.) und in welchen Mengen (Schätzung)?

Produkt	Menge
...	...

2. Werden auf diese Produkte Standards/Labels angewandt – wenn ja welche (compostable, home compostable etc.)?

Produkt	Standard
...	...

Teil B: Rechtliche Regelungen zu biologisch abbaubaren Kunststoffen in Ihrem Land

1. Gibt es spezielle Regelungen für biologisch abbaubare Kunststoffe im Zusammenhang mit der Umsetzung zur Richtlinie (EU) 2015/720 - Verpackungsrichtlinie zur Verringerung des Verbrauchs von leichten Kunststofftragetaschen?

...

2. Gibt es gesetzliche Regelungen zur industriellen Kompostierung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle?

...	
Falls Ja: Ist dazu eine bestimmte Zertifizierung gefordert?	...
Falls Ja: Sind spezielle Produkte zugelassen/verboten?	...
Falls Ja: Gibt es weitere Vorgaben?	...
Falls Nein: Wo sind Regelungen zur allgemeinen biologischen Abfallbehandlung festgelegt?	...

3. Gibt es gesetzliche Regelungen zur Heim- und Gartenkompostierbarkeit biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle?

...	
Falls Ja: Ist eine bestimmte Zertifizierung gefordert?	...
Falls Ja: Sind spezielle Produkte zugelassen/verboten?	...
Falls Ja: Gibt es weitere Vorgaben?	...

4. Gibt es weitere gesetzliche Regelungen zu biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen bzw. zur Behandlung dieser?

...

5. Gibt es finanzielle Vorteile für den Einsatz biologisch abbaubarer Kunststoffe (z.B. in Form niedrigerer Recyclinggebühren o.Ä.)?

...

Teil C: Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen in Ihrem Land

1. Mit welchen Fraktionen werden biologisch abbaubare Kunststoffe gesammelt?

	Bitte entsprechendes Feld ankreuzen [X] und Produkttyp angeben
Bioabfall	...
Restmüll	...
Kunststoffabfall	...
Weitere	...

2. Wie gestaltet sich der Verwertungs- bzw. Entsorgungsweg der einzelnen Fraktionen und werden darin enthaltene biologisch abbaubare Kunststoffe vor/während der Behandlung aussortiert?

	Verwertungsweg / Entsorgungsweg	Wird bei der Sortierung eine Fraktion biologisch abbaubarer Kunststoffe erzeugt? Bitte entsprechendes Feld ankreuzen [X]
Bioabfall		
Restmüll		
Kunststoffabfall		
Weitere		

3. Gibt es biologisch abbaubare Kunststoffprodukte die separat gesammelt werden?

...	
Falls Ja: Wer ist verantwortlich für die Sammlung?	...
Falls Ja: Wer ist verantwortlich für die Entsorgung?	...

Kompostierung / Vergärung

4. Besteht eine Verwechslungsgefahr zwischen biologisch abbaubaren und konventionellen Kunststoffen, welche sich nachteilig auf die Inputströme für Kompostierungsanlagen auswirken?

...

5. Wie lange dauert ein Kompostierzyklus in industriellen Kompostieranlagen im Durchschnitt?

...

6. Welche biologisch abbaubaren Kunststoffabfälle finden den Weg in eine industrielle Kompostieranlage (Produkttyp und Mengenabschätzung)?

Produkt	Mengenabschätzung
...	...

7. Werden biologisch abbaubare Kunststoffabfälle vor der tatsächlichen Kompostierung aussortiert?

...	
Falls Ja: Was sind die Gründe für die Aussortierung (z.B. Kosten, Kompostqualität)?	...
Falls Ja: Was müsste für eine effektive Kompostierung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle verändert werden?	...
Falls Ja: Was passiert mit den aussortierten Abfällen?	...
Falls Nein: Gibt es Probleme mit biologisch abbaubaren Kunststoffe bei	...

der industriellen Kompostierung (z.B. Diskrepanz mit Vorgaben des Standards EN13432)	
Falls Nein: Beeinträchtigen Reste biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle die Düngemittelqualität?	...

8. Werden biologisch abbaubare Kunststoffabfälle Vergärungsanlagen zugeführt?

...	
Falls Ja: Um welche Produkte handelt es sich dabei und aus welcher Quelle stammen diese?	...
Falls Ja: Gibt es Probleme bei der Vergärung biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle?	...
Falls Ja: Welche Vorteile sehen Sie in der Vergärung biologisch abbaubare Kunststoffabfälle?	...
Falls Nein: Was sind die Gründe für die Entscheidung gegen eine Vergärung?	...

Recycling

9. Welche biologisch abbaubaren Kunststoffabfälle finden den Weg in eine Recyclinganlage (Produkttyp, Quelle und Mengenabschätzung)?

Produkt	Fraktion/Quelle	Mengenabschätzung
...	...	...

10. Werden oben genannte Produkte tatsächlich recycelt?

...	
Falls Ja: Gibt es Probleme beim Recycling biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle. Welche sind diese?	...
Falls Ja: Welche Vorteile sehen Sie im Recycling biologisch abbaubarer Kunststoffabfälle?	...
Falls Ja: Welche Produkte werden aus Rezyklaten von biologisch abbaubaren Kunststoffen erzeugt? Sind diese biologisch abbaubar?	...
Falls Nein: Was sind die Gründe für eine Entscheidung gegen das Recycling?	...

11. Sind Ihnen Fälle bekannt, in denen biologisch abbaubare Kunststoffabfälle den Recyclingprozess bzw. das Recyclingergebnis konventioneller Kunststoffe (PET, PE, PP, PS) beeinträchtigt haben?

....

Mechanisch-biologische Abfallbehandlung

12. Welche biologisch abbaubaren Kunststoffabfälle finden den Weg in eine MBT (Produkttyp, Quelle und Mengenabschätzung)?

Produkt	Fraktion/Quelle	Mengenabschätzung
...	...	...

13. Sind Ihnen Fälle bekannt, in denen biologisch abbaubare Kunststoffabfälle den Prozess der Mechanisch-biologischen Abfallbehandlung beeinträchtigt haben?

...

Energetische Verwertung

14. Welche biologisch abbaubaren Kunststoffabfälle werden energetische verwertet (Produkttyp, Quelle und Mengenabschätzung)?

Produkt	Fraktion/Quelle	Mengenabschätzung
...	...	...

Deponierung

15. Welche biologisch abbaubaren Kunststoffabfälle werden abgelagert (Produkttyp, Quelle und Mengenabschätzung)?

Produkt	Fraktion/Quelle	Mengenabschätzung
...	...	...

Littering (achtlose Entsorgung in die Umwelt)

16. Gibt es ein Problem mit Littering durch Kunststoffe bzw. speziell durch biologisch abbaubare Kunststoffe?

...

Teil D: Herausforderungen und Empfehlungen

1. Halten Sie den Einsatz biologisch abbaubarer Kunststoffe grundsätzlich für sinnvoll? Begründen Sie bitte Ihre Antwort.

....

2. Was sehen Sie als größte Herausforderungen/Probleme im Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen?

...

3. Haben Sie Empfehlungen zum Umgang mit biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen?

...

4. Weitere Anmerkungen

...

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!!