

BIOLOGISCH ABBAUBARE KUNSTSTOFFE

LITERATUR- UND INTERNETRECHERCHE
SOWIE BETRACHTUNGEN ZUM IST-ZUSTAND IN LUXEMBURG

D'ËMWELTVERWALTUNG

Am Déngscht vu Mënsch an Ëmwelt

DÉCHETS ET RESSOURCES



LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Environnement, du Climat
et du Développement durable

Administration de l'environnement

Biologisch abbaubare Kunststoffe

Eigenschaften, Verwendungsfelder, Entsorgung und
Verwertung

Ergebnisse einer Literatur- und Internetrecherche sowie Betrachtungen zum
Ist-Zustand in Luxemburg



ECO-Conseil s.à.r.l.

I M P R E S S U M

BEAUFTRAGUNG	Administration de l'Environnement Unité Stratégies et Concepts 1, avenue du Rock'n'Roll L-4361 Esch-sur-Alzette Tel.: (00352) 40 56 56 – 614 Fax: (00352) 49 62 56 E-mail: stephanie.goergen@aev.etat	
AUSFÜHRUNG	ECO-Conseil s.à r.l. 12, Mounereferstrooss L-5441 Remerschen Tel.: (00352) 46 17 08 + 26 67 55 – 01 Fax: (00352) 22 31 40 + 26 67 55 – 20 E-Mail: info@eco-conseil.lu	
BEARBEITUNG	Steff Schaeler Dipl.-Agraringenieur Gerd Winter	(ECO-Conseil; Projektverantwortlicher) (ECO-Conseil; Projektdelegierter)
AUSFERTIGUNG	Dezember 2018	

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

INHALTSVERZEICHNIS	Seite	3
Abkürzungsverzeichnis		5
Glossar		6
1. Einführung		9
2. Allgemeine Eigenschaften und Abgrenzung der biologisch abbaubaren Kunststoffe		10
2.1	Biologische Abbaubarkeit	10
2.2	Kompostierbarkeit	10
2.3	Abgrenzung Biokunststoffe	11
3. Arten, Marktsituation und Verwendungsfelder biologisch abbaubarer Kunststoffe		16
3.1	Unterscheidung biologisch abbaubarer Kunststoffe nach Rohstoffart	16
3.1.1	Biologisch abbaubare Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen	16
3.1.1.1	Rohstoffe aus mikrobieller Umwandlung	17
3.1.1.2	Rohstoffe pflanzlichen Ursprungs	17
3.1.2	Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen	18
3.2	Old- und New Economy Kunststoffe	19
3.3	Produktionskapazitäten und Marktanteile biologisch abbaubarer Kunststoffe	20
3.4	Verwendungsfelder	22
3.5	Beispiele für biologisch abbaubare Kunststoffe auf dem luxemburgischen Markt	23
3.5.1	Verpackungen	23
3.5.2	Kunststofftüten	25
3.5.3	Mulchfolien und andere Produkte für die Anwendung in der Land- und Forstwirtschaft	30
3.6	Zusammenfassende Übersicht	31
4. Abbauverhalten in natürlichen Milieus u. technischen Anlagen zur Abfallbehandlung		34
4.1	Abbauverhalten in der Natur	35
4.1.1	Abbau im Boden	36
4.1.2	Abbau im Süßwasser	39
4.1.3	Abbau im Meer	40
4.1.4	Abbauverhalten in Anlagen der Abfallverwertung und -entsorgung	41
4.1.4.1	Kompostierungsanlagen	41
4.1.4.2	Gartenkompostierung	46
4.1.4.3	Vergärungsanlagen	48

4.1.4.4	Deponie	48
4.1.4.5	MBA.....	48
4.1.4.6	Verbrennungsanlage	49
4.1.4.7	Anlagen zur Aufbereitung und stofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen.....	49
4.1.4.8	Zusammenfassende Darstellung des Abbauverhaltens von biologisch abbaubaren Kunststoffen in der Natur und in Verwertungsanlagen für organische Abfälle.....	50
5.	Behandlung von biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen	53
5.1	Kompostierung	53
5.1.1	Grundlegende Aspekte.....	53
5.1.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	55
5.1.3	Erfahrungen in der Praxis	59
5.2	Vergärung	61
5.2.1	Grundlegende Aspekte.....	61
5.2.2	Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	61
5.2.3	Erfahrungen in der Praxis	62
5.3	Entsorgung mit dem Restabfall	62
5.4	Recycling.....	62
6.	Ökobilanzielle Betrachtung.....	64
7.	Sozioökonomische Aspekte	68
7.1	Flächenkonkurrenz	68
7.2	Gentechnik	71
8.	Zusammenfassung.....	71

Abkürzungsverzeichnis

AS:	Australian Standard (Australischer Standard)
ASTM:	American Society for Testing and Materials
BAK:	Biologisch abbaubarer Kunststoff
BAW:	Biologisch abbaubarer Werkstoff
bzw.:	beziehungsweise
ca.:	circa
CEN:	European Committee for Standardisation (Europäisches Komitee für Normung)
d.h.:	das heißt
DIN:	Deutsches Institut für Normung
EN:	Europäische Norm; europäische Normen müssen wenn sie von den nationalen Mitgliedern der CEN (Normungsinstitute z.B. DIN oder NF) übernommen werden, unverändert übernommen werden; sie werden dann folgendermaßen bezeichnet: Beispiel Deutschland: DIN EN + Nummer der EN-Norm; Beispiel Frankreich: NF + Nummer der EN-Norm
et al:	et alteri, und andere
EUBP:	European Bioplastics
i.d.R.:	in der Regel
ISO:	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
Mg:	Megagramm (t: metrische Tonne)
NF:	Normes Françaises (Französischer Standard)
PA:	Polyamid
PBAT:	Polybutylenadipat-Terephthalat
PBS:	Polybutylensuccinat
PCL:	Polycaprolacton
PE:	Polyethylen
PET:	Polyethylenterephthalat
PHA:	Polyhydroxyalkanoate
PLA:	Polylactid (Polymilchsäure)
rd.:	rund
TPS:	Thermoplastische Stärke
u.a.:	und andere
z.B.:	zum Beispiel

Glossar

Additive:	Additive sind Hilfsstoffe oder Zusatzstoffe, die Produkten in geringen Mengen zugesetzt werden, um bestimmte Eigenschaften zu erreichen oder zu verbessern (z.B. Farbstoffe, Flammschutzmittel, Lichtschutzmittel, Haftvermittler, Biozide, Füllmittel etc.)
ASTM:	American Society for Testing and Materials; Verfasser von Prüfstandards für die biologische Abbaubarkeit von Kunststoffen
bioabbaubar:	Materialien und Chemikalien, die biologisch, d.h. durch Lebewesen oder deren Enzyme mineralisiert werden, sind bioabbaubar.
biobasiert:	biobasiert bedeutet, dass ein Produkt ganz oder teilweise aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird.
biokompatibel:	Werkstoffe, die bei Kontakt oder bei Aufnahme in den Körper keine negativen physiologischen Auswirkungen haben
Biokunststoff:	keine eindeutige Begriffsdefinition; der Begriff wird für synthetische, biobasierte oder bioabbaubare Kunststoff verwendet (vgl. Definition Biopolymer)
Biopolymer:	keine eindeutige Begriffsdefinition; ein Biopolymer kann ein Polymer sein, das in der Zelle eines Lebewesens synthetisiert wird (z.B. Lignin, Cellulose, Chitin); heute wird der Begriff aber auch für synthetische, biobasierte oder bioabbaubare Kunststoff verwendet.
Blends:	Mischungen aus zwei oder mehreren Polymeren; durch Blending von Biokunststoffen können je nach Anforderung Kunststoffe mit deutlich verbesserten Eigenschaften entstehen. Die häufigsten Blends bei biologisch abbaubaren Kunststoffen basieren auf Stärke, PBAT oder PLA.
Cellulosederivat:	entstehen durch die Veresterung von Cellulose mit organischen Säuren
Cellulose-regenerat:	Wenn Cellulose chemisch gelöst und neu in Form von Fasern oder Folien zusammengesetzt wird, spricht man von Celluloseregeneraten
Copolymer:	Copolymere sind Polymere, die aus zwei oder mehr unterschiedlichen Monomeren zusammengesetzt sind.
Desintegration:	bezeichnet allgemein die Spaltung und Auflösung eines Ganzen in seine Teile; im engeren Sinne bezeichnet der Begriff hier die Zerlegung von Kunststoffen in sehr kleine Fragmente.
DIN EN 13432:	Europäische Norm für Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau.
DIN EN 14855:	Festlegung eines Verfahrens vollständigen aeroben Bioabbaubarkeit von Kunststoff-Materialien unter den Bedingungen kontrollierter Kompostierung
DIN EN 14995:	Europäische Norm für Anforderungen hinsichtlich der Kompostierung von Kunststoffen.
Drop-In:	Bei Drop-In-Biokunststoffen werden die Rohstoffkomponenten von petrochemisch hergestellten Kunststoffen, durch biobasierte Rohstoffkomponenten ersetzt. Bei Bio-Polyethylen wird beispielweise Ethylen aus Rohöl durch aus Bio-Ethanol gewonnenem Ethylen ersetzt

- Keimling-Logo:** = Seedling-Logo; durch TÜV AUSTRIA oder DIN CERTCO vergebenes Logo zum Nachweis der Zertifizierung (Prüfsiegel) eines Produktes nach DIN EN ISO 13432; das Logo wurde von European Bioplastics entwickelt
- Mikroplastik:** Plastikpartikel < 5mm, die mit bloßem Auge kaum noch erkennbar sind; als primäres Mikroplastik wird Kunststoff bezeichnet, der als solches bewusst hergestellt und genutzt wird, da die Größe für seinen Verwendungszweck erforderlich ist; sekundäres Mikroplastik entsteht durch den Zerfall von Kunststoffen in immer kleinere Teile z.B. durch Witterungseinflüsse, Sonnenlicht oder mechanische Einwirkungen (Abrieb).
- Mineralisierung:** Bezeichnet den vollständigen Abbau von organischen Substanzen zu Wasser und Mineralien sowie Kohlendioxid unter aeroben Bedingungen bzw. Kohlendioxid und Methan unter anaeroben Bedingungen.
- Modifizierte Cellulose:** Cellulose wurde bereits vor über 100 Jahren zu den ersten Biokunststoffen modifiziert. Auch für moderne Biokunststoffe stellt das Biopolymer Cellulose eine kostengünstige und gut verfügbare Rohstoffquelle dar. Aus Cellulose können sowohl Celluloseregenerate als auch Cellulosederivate gewonnen werden. Bekannte Beispiele für Celluloseregenerate sind Viskose, Lyocell, Modal, Rayon, Zellglas, Cellulosehydrat (CH) oder Cellophan. Celluloid und Celluloseacetat (CA) sind ein bekannter Vertreter der Cellulosederivate.
- Monokunststoff:** Kunststoff, der nur aus einem (einheitlichen) Kunststoff besteht; Kunststoffe, die aus einer Mischung verschiedener Kunststoffe bestehen sind → Blends
- Nachwachsende Rohstoffe:** organische Rohstoffe, welche aus land- und forstwirtschaftlicher Produktion stammen; sie werden vom Menschen entweder zielgerichtet für Anwendungszwecke außerhalb des Nahrungsmittel- oder Futtermittelbereichs angebaut oder fallen als Abfall und Nebenprodukt beim Anbau oder der Veredlung von agrarischen oder forstlichen Produkten an.
- Oxoabbaubare-: Kunststoffe** unter „oxo-abbaubaren Kunststoffen“ versteht man konventionelle Kunststoffe, zum Beispiel Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP), die mit speziellen Additiven bei der Kunststoffverarbeitung ausgestattet werden. Die Additive sollen den Zerfall von daraus hergestellten Produkten in kleine Bruchstücke (Fragmente) begünstigen
- PBAT:** Polybutylenadipaterephthalat, biologisch abbaubarer Kunststoffe gehört zur Gruppe der biologisch abbaubaren Polyester
- PBS:** Polybutylensuccinat, biologisch abbaubarer Kunststoffe gehört zur Gruppe der biologisch abbaubaren Polyester
- PCL:** Polycaprolacton, biologisch abbaubarer Kunststoffe gehört zur Gruppe der biologisch abbaubaren Polyester
- PHA:** Polyhydroxyalkanoate bzw. Polyhydroxyfettsäuren sind natürlich vorkommende Biopolymere, die von Bakterien als Speicherstoffe synthetisiert werden. Sammelbegriff für verschiedene Biokunststoffe wie z.B. PHP , PHB (Polyhydroxybutyrat), PHV (Poly[3-hydroxyvalerat]), PHH (Poly[3-hydroxyheptanoat]), PHO (Poly[3-hydroxyoctanoat]), PHBHV (Polyhydroxybutyrat-co-hydroxyvalerat)
- PLA:** Polylactide oder Polymilchsäuren sind biologisch abbaubarer Kunststoffe und bestehen aus chemisch aneinandergebundene Milchsäuremolekülen
- Stärkeblends:** Mischungen aus Thermoplastischer Stärke (TPS) und Kunststoffen. Letztere können entweder auf Erdöl oder auf Nachwachsenden Rohstoffen basieren. Der stärkebasierte Werkstoffanteil kann dabei zwischen 25 und 70 % betragen. Diese

Blends stellen international einen der größten Anteile der Biokunststoffe dar und variieren je nach Zusammensetzung in ihren Eigenschaften.

TPS: thermoplastische Stärke; aktuell einer der wichtigsten und gebräuchlichsten Vertreter der Biokunststoffe. Sie stellt wiederum einen Rohstoff für verschiedene Stärke-Blends dar

Zersetzung: Wird oft synonym mit dem Begriff → Desintegration verwendet; er bezeichnet hier die Zerlegung von Kunststoffen in kleine Partikel, die wenn sie kaum noch mit bloßem Auge erkennbar sind, als → Mikroplastik bezeichnet werden. Die EN-Normen für kompostierbare Kunststoffe legen fest, dass 90 % des Materials nach einer vorgegebenen Zeit und unter definierte Bedingungen zu Partikeln < 2mm desintegriert = zersetzt sein muss.

1. Einführung

Biologisch abbaubare Kunststoffe sind solche Kunststoffe, die ganz oder teilweise durch spezielle Mikroorganismen, deren Enzyme die Polymerketten des Materials in kleine Teile zerlegen, zersetzt werden. Die Bruchstücke (z.B. Monomere als Grundelement der Polymerketten oder Additive) können dann von Bakterien – ggf. auch zusammen mit anderem organischen Material – weiter abgebaut werden. Nach dem Abbau bleiben vom Kunststoff selbst im Wesentlichen nur Wasser und Kohlendioxid übrig (Wissenschaftlicher Dienst des Bundestages, 2015). Es bestehen keine rechtlich verbindlichen oder allgemein anerkannten Definitionen der biologischen Abbaubarkeit von Kunststoffen, die beispielsweise den Zeitraum des Abbaus, die Abbaubedingungen (z.B. Umweltmilieu, Temperatur) oder den Grad des Abbaus exakt festlegen. Es existieren Zertifizierungssysteme, die Kriterien für die Abbaubarkeit und stoffliche Beschaffenheit von biologisch abbaubaren Kunststoffen festlegen. Sie beziehen sich nicht auf eine generelle Abbaubarkeit, sondern definieren diese für bestimmte Behandlungsverfahren (z.B. Kompostierung) oder bestimmte Umweltmilieus (z.B. Boden) oder bestimmte Kunststoffprodukte (z.B. Verpackungen oder Mulchfolien). Die Zertifizierung erfolgt teilweise auf Basis von europäischen Normen oder von Normen, die von nationalen Normungsinstituten entwickelt wurden, oder bezieht sich auf eigene von den jeweiligen Zertifizierungsstellen festgelegte Kriterien.

Die Eigenschaft „biologisch abbaubar“ zu sein allein lässt keine generelle Bewertung der Kunststoffe im Hinblick auf ihre ökologischen oder klimarelevanten Auswirkungen zu. Hierzu sind weitere Merkmale näher zu betrachten. Bezüglich ihres Verhaltens in der Umwelt nach ihrem Gebrauch sind beispielsweise die für den Abbau erforderlichen Bedingungen, die Gehalte und die Eigenschaften von Additiven und Anhaftungen und das Abbauverhalten in verschiedenen Medien zu untersuchen. Im Hinblick auf Klimawirkung und sonstige Umwelteinflüsse ist die gesamte „Ökobilanz“ von der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung über die Produktherstellung und -verwendung bis zur Behandlung nach der Nutzung zu beachten.

Biologisch abbaubare Kunststoffe werden häufig zu den sogenannten Biokunststoffen gerechnet, wobei dieser Begriff ebenfalls nicht eindeutig definiert ist. Unter ihm werden sowohl die biologisch abbaubaren Kunststoffe -unabhängig davon, ob sie aus regenerativen oder fossilen Rohstoffen hergestellt werden - als auch Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen – unabhängig davon, ob sie biologisch abbaubar sind oder nicht – subsumiert.

Biokunststoffe und biologisch abbaubare Kunststoffe werden als Alternativen für konventionelle Kunststoffe diskutiert. Hintergrund bilden dabei u.a. Fragen im Zusammenhang mit der Entwicklung der zirkulären Wirtschaft (circular economy) und dem Ausstieg aus der fossilen Wirtschaft sowie der weltweiten Verschmutzung von Meeren, Fließgewässern und Landökosystemen durch Plastik und die daraus resultierenden Folgen für Gesundheit und Umwelt. Ein wichtiger Aspekt im Rahmen dieses Kontexts ist der Umgang mit den Abfällen dieser „neuen“ Kunststoffgruppe. Die häufig kontrovers geführte Diskussion wird durch die unklaren Begrifflichkeiten und die Vielzahl von unterschiedlichen Kunststofftypen und Produktgruppen, die als Biokunststoff oder biologisch abbaubarer Kunststoff bezeichnet werden, verkompliziert. Dies erschwert allgemeingültige Aussagen zur ökologischen Vorteilhaftigkeit, der Praktikabilität und zur Qualität biologisch abbaubarer Kunststoffe (Umweltbundesamt, 2018).

Ziel der hier vorgelegten Recherche, mit der ECO-Conseil s.à.r.l. durch die Administration de l'Environnement beauftragt wurde, ist eine Zusammenfassung des aktuellen wissenschaftlichen Diskussionsstandes bezüglich ökologischer Eigenschaften und Auswirkungen der Verwendung biologisch abbaubarer Kunststoffe im Allgemeinen und der Behandlungsmöglichkeiten der aus ihnen

resultierenden Kunststoffabfälle im Rahmen der luxemburgischen abfallwirtschaftlichen Strukturen im Besonderen.

2. Allgemeine Eigenschaften und Abgrenzung der biologisch abbaubaren Kunststoffe

2.1 Biologische Abbaubarkeit

Die allgemeine Definition, die eingangs der vorstehenden Einführung für **Biologisch abbaubare Kunststoffe** (nachfolgend verwendete Abkürzung BAK) gegeben wurde, stellt als „kleinsten gemeinsamen Nenner“ der zu dieser Werkstoffgruppe gerechneten Materialien die mindestens teilweise **Abbaubarkeit durch Mikroorganismen** heraus.

Ob jedoch ein Kunststoff teilweise oder komplett abgebaut werden kann, ist für die weitere Betrachtung und Beurteilung seiner Umwelteigenschaften und möglicher Verwertungs- und Entsorgungswege wichtig. Ein nicht vollständig abbaubarer Kunststoff, bei dem z.B. Additive oder Monomere bzw. Monomerbruchstücke zurückbleiben, würde generell zur Anreicherung von Inhaltsstoffen in der Umwelt führen, wenn er direkt oder auf „dem Umweg“ über eine Kompostierung in Boden, Wasser oder Luft gelangen würde. Bei vollständig abbaubaren Kunststoffen wäre dies hingegen nicht der Fall.

Weitere Definitionen für die Biologische Abbaubarkeit bzw. Biologisch abbaubare Kunststoffe, die zeigen, dass die Begriffe nicht eindeutig festgelegt sind und demnach für Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften verwendet werden können, sind:

- Die biologische Abbaubarkeit umfasst die Eigenschaft eines Stoffes, durch Mikroorganismen in Anwesenheit von Luftsauerstoff zu Kohlendioxid, Wasser, Biomasse und Mineralien sowie unter Luftabschluss zu Kohlendioxid, Methan, Biomasse und Mineralien zersetzt zu werden, wobei kein Zeitraum definiert ist (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2011);
- Biologisch abbaubare Kunststoffe sind Kunststoffe oder „Naturstoffe“ aus natürlichen oder synthetischen Bausteinen, die biologischen Reaktionen zugänglich sind. Sie zersetzen sich unter Einwirkung von Mikroorganismen (*Niedersächsisches Umweltministerium, 1999*);
- Laut Definition des Branchenverbands European Bioplastics sind biologisch abbaubare Kunststoffe neben Kunststoffen, die auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden, die zweite Produktklasse innerhalb der Gruppe der sogenannten Biokunststoffe. Kennzeichnend für diese Produktklasse ist die Erfüllung aller Kriterien von wissenschaftlich anerkannten Normen zum Nachweis der biologischen Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit von Kunststoffen bzw. Kunststoffprodukten.

2.2 Kompostierbarkeit

Im Unterschied zur allgemeinen Eigenschaft der „Biologischen Abbaubarkeit“¹ bestehen für die Eigenschaft der „Kompostierbarkeit“ Normen und Regelwerke sowie technische Prüfsysteme, die exakte Kriterien definieren, die von Kunststoffen, die ein entsprechendes Zertifizierungslabel für

¹ Für die biologische Abbaubarkeit von BAK in bestimmten Umweltmilieus (z.B. Boden, Süßwasser, Meer) bestehen eigene Prüfsysteme der Zertifizierungsgesellschaft TÜV AUSTRIA, die sich aber nicht auf eine spezifische Norm referieren; eine europäische Norm besteht seit 2018 für die biologische Abbaubarkeit von Mulchfolien im Boden, die zum Einsatz in Gartenbau und Landwirtschaft bestimmt sind.

Kompostierbarkeit erhalten, erfüllt werden müssen. Kompostierbare Kunststoffe sind zwar stets auch biologisch abbaubar, umgekehrt gilt die Aussage aber nicht. Während (zertifizierte) kompostierbare Kunststoffe unter definierten aeroben Bedingungen zu einem vorgegebenen Grad und innerhalb festgelegter Zeitspannen durch Mikroorganismen zu Kohlendioxid, Wasser, Biomasse und Mineralien zersetzt werden müssen, gilt dies für biologisch abbaubare Kunststoffe unabhängig von den Umweltbedingungen und ohne Zeitvorgabe.

Die europäische Richtlinie DIN EN 13432² „Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau - Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackung“ legt Eigenschaften fest, die das jeweilige Material haben muss, um als „kompostierbar“ zu gelten. Sie bezieht sich ausschließlich auf Verpackungen und schließt Kunststoffe aus, die nicht als Verpackungsmaterial verwendet werden (z.B. Kunststoffe, die in der Landwirtschaft oder in Form von Sammelbeuteln bei der Bioabfallerfassung eingesetzt werden). Für Nicht-Verpackungskunststoffe regelt die DIN EN 14995-Richtlinie³ die Anforderungen an ihre Kompostierbarkeit. Aus technischer Sicht sind die Normen für Verpackungskunststoffe und sonstige Kunststoffe identisch, d.h. jedes Kunststoffmaterial, das die Vorgaben der DIN EN 13432-Richtlinie erfüllt, entspricht auch der DIN EN 14995-Richtlinie. Diese Richtlinien sind die wichtigsten technischen Bezugspunkte für die Hersteller, Kompostproduzenten, Verwaltungen, Zertifizierungsstellen und Verbraucher. Neben den genannten europäischen Normen bestehen die US-amerikanische Norm ASTM D6400⁴ und die australische NORM AS4736⁵ für kompostierbare Kunststoffe.

Auf die Inhalte der verschiedenen Normen und die bestehenden diesbezüglichen Prüf- und Zertifizierungssysteme wird unter Punkt 4.1.4.1 ausführlich eingegangen.

2.3 Abgrenzung Biokunststoffe

Biokunststoff ist kein definierter oder geschützter Begriff. Die Vorsilbe „Bio“ ist positiv konnotiert und suggeriert eine natürliche Herkunft eines solchen Stoffes und Umweltvorteile gegenüber anderen „Nichtbio“-Werkstoffen.

Unter dem Begriff werden heute eine Vielzahl von Kunststoffen subsumiert, die sich sowohl bezüglich der Art und Herkunft ihrer Rohstoffe als auch bezüglich ihres Abbauverhaltens in der Natur grundsätzlich voneinander unterscheiden können.

Zum einen werden Kunststoffe, die ganz oder zum Teil aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden, als Biokunststoffe bezeichnet. Bei der Verwendung des Begriffs in diesem Sinne wird der Aspekt der Bioabbaubarkeit außer Acht gelassen, d.h. aufgrund ihrer Rohstoffherkunft als solche bezeichnete Biokunststoffe können sowohl biologisch abbaubar sein als auch nicht.

Zum anderen werden ganz oder teilweise biologisch abbaubare Kunststoffe als Biokunststoffe bezeichnet. Bei der Verwendung des Begriffs in diesem Sinne wird der Aspekt der

² DIN EN 13432:2000-12 Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau. Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackung (bzw. NF EN 13432 Novembre 2000; Emballage - Exigences relatives aux emballages valorisables par compostage et biodégradation - Programme d'essai et critères d'évaluation de l'acceptation finale des emballages)

³ DIN EN 14995:2007-03 Kunststoffe - Bewertung der Kompostierbarkeit - Prüfschema und Spezifikationen (bzw. NF EN 14995 Février 2007 Matières plastiques - Évaluation de la compostabilité - Programme d'essais et spécifications)

⁴ ASTM D6400 – 12; Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities

⁵ Australian Standard®; Biodegradable plastics — Biodegradable plastics suitable for composting and other microbial treatment

Rohstoffherkunft nicht berücksichtigt, d.h. aufgrund ihres Abbauverhaltens als solche bezeichnete Biokunststoffe, können aus nachwachsenden oder fossilen Rohstoffen oder einem Mix beider Rohstoffarten bestehen.

Sinnvollerweise sollte deshalb nicht pauschal von Biokunststoffen gesprochen werden. Es wird vorgeschlagen zur Differenzierung und Abgrenzung die Begriffe **Biobasierte Kunststoffe** und **Biologisch abbaubare Kunststoffe** zu verwenden:

- **Biobasierte Kunststoffe**

Sie werden ganz oder teilweise aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen. Das sind sowohl stärke- und zellulosebasierte Rohstoffe aus Mais, Zuckerrohr, Zuckerrüben, Holz u.a. als auch Rohstoffe auf Basis von Ölsaaten, wie Raps, Sonnenblumen, Ölpalmen (Umweltbundesamt, 2017). Biobasierte Kunststoffe können biologisch abbaubar sein, sind es aber in der überwiegenden Anzahl nicht, weil ihre Grundbestandteile oftmals chemisch identisch mit solchen von konventionellen, fossil basierten Kunststoffen sind. Die chemisch identischen Kunststoffe werden als Drop-In bezeichnet und haben den höchsten Marktanteil aller Biokunststoffe. Beispiele sind Bio-PE oder Bio-PET, wobei die Vorsilbe „Bio“ für die biobasierte Herkunft, nicht aber für die biologische Abbaubarkeit steht.

Weiter unterscheiden lassen sich biobasierte Kunststoffe in:

- Blends

Bei ihnen handelt es sich, um Mischungen aus verschiedenen Kunststoffen. Ein Produkt kann z.B. zu 70% aus biobasierten Materialien bestehen, während es sich bei den verbleibenden 30% um einen konventionellen Kunststoff auf Mineralölbasis handelt. Es gibt dabei keine Vorgabe, wie hoch der Anteil an Kunststoff aus nachwachsenden Rohstoffen sein muss, um das Material als Biokunststoff bezeichnen zu können (Wissenschaftlicher Dienst des Bundestages, 2015). Die Gesellschaft DIN CERTCO der TÜV Rheinland AG und des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. bietet für Blends Zertifizierungen an, bei denen der biobasierte Anteil in Prozentintervallen ausgewiesen wird (DIN CERTCO, 2018).

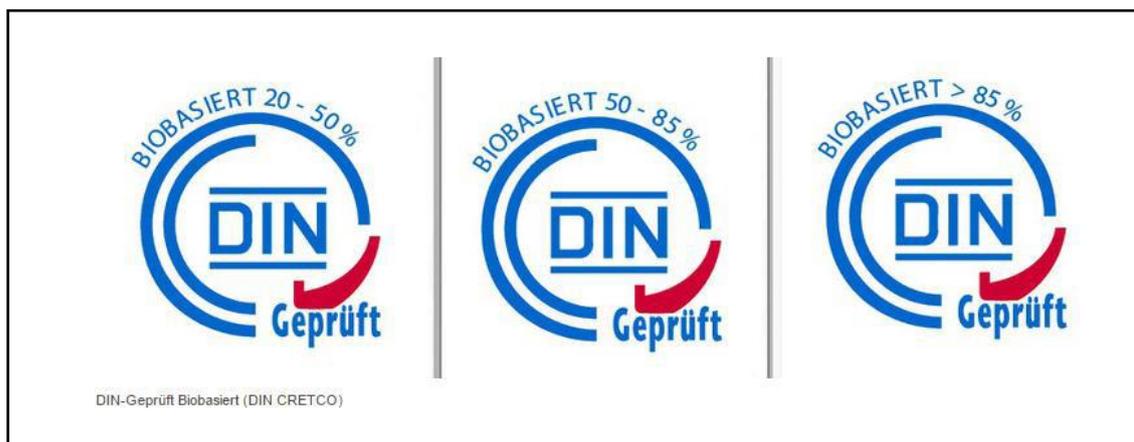


Abbildung 1: Prüfsiegel (Zertifikate) der DIN CERTCO e.V.-Gesellschaft für Produkte mit Anteilen an biobasiertem Kunststoff

- Drop-In

Als Drop-Ins werden biobasierte (und teil-biobasierte) Standardkunststoffe, wie Bio-Polyethylen (PE), Bio-Polyamid (PA) oder Bio-Polyethylenterephthalat (PET) bezeichnet. Die Drop-Ins weisen die gleichen Eigenschaften auf, wie Kunststoffe auf Erdölbasis. Sie sind i.d.R.

nicht biologisch abbaubar, können aber werkstofflich verwertet werden. Drop-Ins dominieren heute den Markt der biobasierten Kunststoffe.

- **Biologisch abbaubare Kunststoffe**

Der Begriff biologisch abbaubare Kunststoffe und seine **nicht eindeutige Definition**, wurden bereits oben erläutert.

An dieser Stelle sollen zwei Gesichtspunkte, die für eine differenzierte Diskussion und Erörterung ökologischer Auswirkungen von BAK relevant sind, betont werden:

- Zu den biologisch abbaubaren Kunststoffen zählen **kompostierbare Kunststoffe**. Für letztere gibt es verschiedene Normen und Prüfsysteme. Zertifizierte kompostierbare Kunststoffe erfüllen exakt definierte Anforderungen an die mikrobielle Abbaubarkeit unter vorgegebenen Bedingungen und Zeiten. Nicht alle biologisch abbaubaren Kunststoffe sind gemäß den Normvorgaben kompostierbar.
- Biologisch abbaubare Kunststoffe und kompostierbare Kunststoffe können sowohl biobasierte Kunststoffe (ganz oder nur in Anteilen aus nachwachsenden Rohstoffen bestehend) als auch fossilen Grundstoffen bestehen.

Abbildung 2 gibt ein Schema zur Einteilung und Abgrenzung der Biokunststoffe wieder, das die hier vorgeschlagenen Begrifflichkeiten zur Unterscheidung der verschiedenen Materialien aufgreift und in dieser oder etwas abgewandelter Form in fast allen einschlägigen Veröffentlichungen zum Themenfeld wiedergegeben wird.

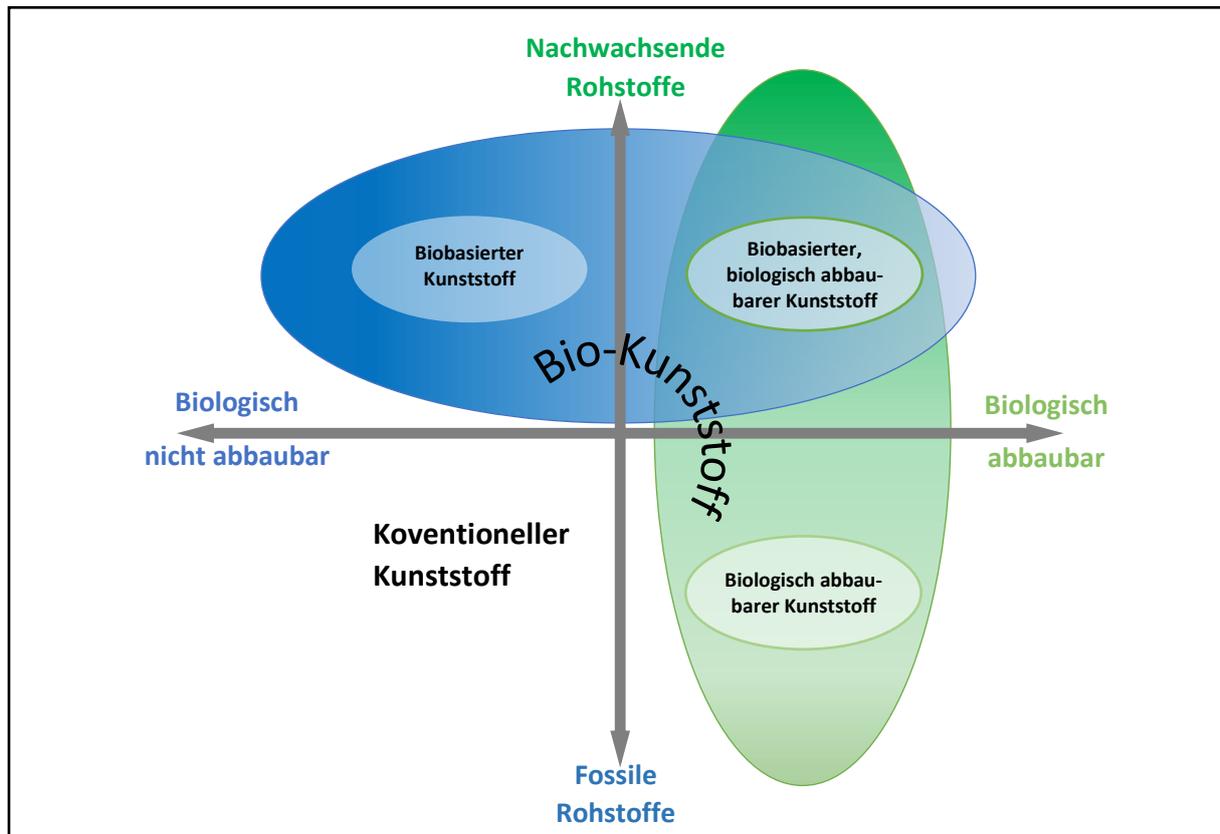


Abbildung 2: Stoffliche und funktionelle Eigenschaften von Biokunststoffen (Eigene Darstellung in Anlehnung an Umweltbundesamt, 2018 und Wissenschaftlicher Dienst des Bundestages, 2015)

Abgrenzung Oxo-abbaubare Kunststoffe

Neben Kunststoffen, die von Mikroorganismen abgebaut werden können, existieren auch Kunststoffe, die in der Umwelt durch Einwirkung von Sauerstoff und anderen Faktoren, wie Licht, Wärme und mechanischen Kräften zerkleinert werden. Sie werden als oxo-abbaubare oder oxo-fragmentierbare Kunststoffe bezeichnet und können aus fossilen und/oder nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Sie enthalten Additive, welche das Auseinanderfallen der Polymere beschleunigen. Oxoabbaubare Kunststoffe werden jedoch in der Regel **nicht vollständig abgebaut und zerfallen nur in kleine und kleinste Bruchstücke**. Damit tragen sie zu einer Verschärfung der Problematik der **Anreicherung von Mikroplastik** in der Umwelt bei.

Die EU-Kommission hat in ihrer im Januar 2018 vorgestellten Strategie für Kunststoffe mitgeteilt, dass sie eine Beschränkung der Verwendung von „Oxo-Plastik“ anstrebt und entsprechende Regelungen vorbereitet (Europäische Kommission, 2018). Frankreich hat die Herstellung und Verwendung von Verpackungen und Kunststofftüten aus oxo-abbaubaren Kunststoff bereits 2015 verboten (*Loi n° 2015-992, 2015*)

In Übersicht 1 werden die biologisch abbaubaren Kunststoffe, mit denen sich der hier vorgelegte Bericht ausschließlich befasst, beschrieben und von anderen Kunststoffen abgegrenzt. Auf die weitere Untergliederung und Typisierung der BAK wird im nachfolgenden Kapitel eingegangen.

Übersicht 1: Einordnung und Abgrenzung biologisch abbaubarer Kunststoffe (BAK)

KUNSTSTOFF		
KONVENTIONELLER KUNSTSTOFF	Rohstoff: fossil (Erdöl, Erdgas)	Abbaubarkeit nicht biologisch <i>Untergruppe: OXOABBAUBARE KUNSTSTOFFE bei Einwirkung physikalischer Kräfte (Licht, Wärme, Reibung)</i>
BIOKUNSTSTOFF		
Keine einheitliche Definition, kein geschützter Begriff		
Untergruppe BIOBASIERTER KUNSTSTOFF	ganz oder teilweise nachwachsend (z.B. Zucker, Stärke, Cellulose)	kein Unterscheidungskriterium <i>Untergruppe: nicht biologisch abbaubar</i> DROP-IN: weisen gleiche chemische Eigenschaften auf wie konventionelle Standardkunststoffe; biologisch nicht abbaubar BLENDS: Mischungen verschiedener Kunststoffe (biobasierte Kunststoffe oder biobasierte und konventionelle Kunststoffe) <i>Untergruppe: biologisch abbaubar</i>
Untergruppe BIOLOGISCH ABBAUBARER KUNSTSTOFF	kein Unterscheidungskriterium <i>Untergruppe: aus fossilen Rohstoffen</i> - aus einer Kunststoffart (MONOKUNSTSTOFF) - Mischungen aus verschiedenen Kunststoffarten (BLEND) <i>Untergruppe: aus nachwachsenden Rohstoffen</i> - aus einer Kunststoffart (MONOKUNSTSTOFF) - Mischungen aus verschiedenen Kunststoffarten (BLEND) <i>Untergruppe: Mischung (BLEND) Kunststoffe aus biobasierten und fossil basierten Rohstoffen</i>	biologisch, das heißt durch Lebewesen und deren Enzyme abbaubar

EXKURS MEHRWEGBECHER AUS BIOKOMPOSITEN

1. Vorbemerkung

Ökobilanzen und ökobilanzielle Betrachtungen von Einweg- und Mehrweggetränkebechern kommen zu dem eindeutigen Schluss, dass Mehrwegsysteme einen deutlichen Umweltvorteil gegenüber allen Einwegsystemen aufweisen, wenn sie regelmäßig und häufig genutzt werden. Dies trifft zunächst unabhängig von dem Material, aus dem marktgängige Bechertypen hergestellt werden, zu. So weisen auch Einwegbecher aus biobasierten Kunststoffen, ob biologisch abbaubar oder nicht, im Vergleich zu Mehrwegbechern keine ökologischen Vorteile auf⁶.

Im Segment der Mehrwegbecher werden, neben Bechern aus konventionellem Kunststoff, Keramik, Metall oder Glas, auch Becher aus ganz oder teilbiobasierten Kunststoffen bzw. **Verbundmaterialien (Biokomposite)** angeboten. Diese werden von den Anbietern häufig aufgrund dieser Eigenschaft als besonders umweltfreundlich dargestellt (siehe Abbildung 1). Nachfolgend soll in einer kurzen Zusammenfassung die derzeitige Einschätzung der ökologischen Eigenschaften der Becher aus Biokompositen, wie sie in der Literatur zu finden ist, dargestellt werden.



Abbildung: Werbeanzeige für Mehrwegbecher (Quelle: Muselzeitung Ausgabe Dezember (?) 2018)

⁶ Österreichisches Ökologie-Institut, Firma Carbotech AG, Öko-Institut e.V. Deutschland; Vergleichende Ökobilanz verschiedener Bechersysteme beim Getränkeausschank an Veranstaltungen, 2008

2. Biobasierte oder teilbiobasierte Werkstoffe zur Herstellung von Mehrweggetränkebechern

Die Anforderungen an Werkstoffe für mehrfach nutzbare Getränkebecher werden durch ihren Verwendungszweck bestimmt. Sie müssen chemisch beständig sein, d.h. es dürfen sich weder durch die Eigenschaften der Getränke (Temperatur, Säuregehalt, Alkoholgehalt etc.) noch durch die Behandlung beim Reinigen (Spülen) Komponenten lösen noch dürfen sich Inhaltsstoffe von Getränken oder Reinigungsmitteln anlagern. Des Weiteren müssen die Becher Mindestanforderungen bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften (z.B. Steifigkeit, Standfestigkeit) aufweisen.

Diese Anforderungen lassen sich aktuell noch nicht in ausreichendem Maße mit biologisch abbaubaren Kunststoffen erreichen. Bei den geeigneten biobasierten bzw. teilbiobasierten Werkstoffen handelt es sich also um solche, die beständig sind und sich i.d.R. weder unter natürlichen Umweltbedingungen noch bei einer Kompostierung leicht zersetzen.

Heute als „umweltfreundlich und innovativ“ angebotene Mehrwegbecher werden oft aus sogenannten Biokompositen oder aus biobasierten, in der Regel aber nicht biologisch abbaubaren Kunststoffen (z.B. Bio-PET oder Bio-PP), die die gleichen chemischen Eigenschaften haben wie konventionelle Kunststoffe, hergestellt.

Becher aus Biokompositen bestehen aus einer „Trägersubstanz“, die ihnen die nötige Festigkeit und Stabilität verleiht, und einem „Bindematerial“, das die Komponenten der Trägersubstanz zusammenhält und dem Becher seine Form gibt. Trägersubstanz sind entweder Naturfasern oder natürlich vorkommende Mineralien, wie Bambus oder Bagasse (faserige Überreste von Zuckerrohr; fällt bei der Zuckerproduktion an). Bei dem Bindematerial handelt es sich oft um Melaminharz, das aus Melamin⁷ und Formaldehyd hergestellt wird. Melaminharz, also ein nicht biologisch abbaubarer und nicht biobasierter Kunststoff, ist bei vielen Bechern die Hauptkomponente. Bei der Werbung für die Becher wird oftmals nicht auf diesen Kunststoffanteil hingewiesen bzw. es werden andere teilweise irreführende Begriffe für das Melaminharz verwendet, z.B. Resin⁸ oder natürliches Harz⁹. Mehrwegbecher aus Biokompositen haben insbesondere dann, wenn sie als sogenannte Coffee-to-go-Becher angeboten und genutzt werden, zudem noch einen Deckel und einen Griffing, der meistens aus Silikon (synthetischer, nicht bioabbaubarer Kunststoff) oder einem anderen konventionellen Kunststoff besteht.

Es gibt auch Becher, bei denen das Melaminharz oder andere Kunstharze durch den biologisch abbaubaren Kunststoff Polylactid (PLA) ersetzt sind¹⁰. Verschiedene Becher auf Basis von Bagasse oder Bambusfasern und PLA sind als industriell kompostierbar nach der DIN 13432 zertifiziert. Bei ihnen handelt es sich, soweit aus Daten auf der Internetseite des Zertifizierers¹¹ und der Hersteller¹² erkennbar, überwiegend um Becher für Kaltgetränke und für einen einmaligen Gebrauch.

Übersicht 1 enthält Beispiele für Mehrwegbecher aus Biokompositen.

⁷ Melamin ist eine aromatische Verbindung, die großtechnisch aus Harnstoff gewonnen wird und aus der u.a. Duroplast-Kunststoffe hergestellt werden

⁸ Resine sind Extraktstoffe aus dehydrierten Naturharzen, die durch einen chemischen Umwandlungsprozess gewonnen werden (Quelle: www.chemie.de); im Englischen bezeichnet resine sowohl natürliche (Baum)harze als auch Kunstharze in der Industrie (<https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english>)

⁹ Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt Stuttgart; <http://www.cvuas.de>, 2017

¹⁰ SWR-Rundfunk, <https://www.swr.de/wissen/wie-oekologisch-sind-bambusbecher>

¹¹ DIN Certco

¹² Guangxi Qiaowang Pulp Packing Products Co., Ltd. (Becher auf Basis von Bagasse); Suzhou Tianzhuo Green Packaging Material Ltd. (Becher auf Basis von Bambus und Bagasse)

Übersicht: Beispiele für Mehrwegbecher aus Biokompositen

Rohstoffe (Angaben der Hersteller bzw. Anbieter)	Beispiel
Bambusfaser, Maisstärke, Kunstharz, Farbstoffe, Silikon für Deckel und Griffing	Hersteller Zuperzozial
Bambusfaser(45%), Maisstärke (35%), Melamin (20%) mit Schraubdeckel aus gleichem Material und Griffing aus Silikon	YogiCup 2 Go; Vertrieb Bodynova
Bambusfaser, Maismehl, Harz aus Aminosäuren	eCoffee Cup; Vertrieb: LS-Lebenstil
Weizen u. Stroh, Reisfaser, PP, PLA	Coffee Cup 400ml Vertrieb: LS-Lebenstil

3. Eignung als Lebensmittelverpackung

Untersuchungen des Untersuchungsamtes für Lebensmittelüberwachung und Tiergesundheit in Stuttgart aus dem Jahr 2014 zeigten, dass aus Bambusgeschirr bei bestimmungsgemäßen Gebrauch Melamin freigesetzt wird. Melamin gilt als krebserregend. Teilweise wurden die zulässigen Migrationswerte¹³ überschritten.

Bei Bambusprodukten mit PLA zeigte sich nach Einwirken der Testsubstanz (dreiprozentige Essigsäure, 70 °C, 2 h) eine Veränderung der Oberfläche des Geschirrs. Die Produkte sind somit nicht für warme und saure Lebensmittel, wie Kaffee, geeignet¹⁴, da eine beschädigte Oberfläche dazu führen kann, dass sich leichter Rückstände aus Lebensmitteln oder von Spülmitteln anlagern können. Zudem können sich leichter Substanzen aus dem Bechermaterial lösen.

Weitere umfangreiche Untersuchungen nach 2014 mit Schwerpunkt auf den sogenannten Coffee-to-go-Bechern bestätigten die ersten Resultate. Bei 11 von 35 getesteten Produkten (aus Melamin- oder anderen Kunstharzen und Bambus) wurde festgestellt, dass Melamin und/oder Formaldehyd in Mengen über den zulässigen Werten in Lebensmittel übergangen¹⁵. Aufgrund ähnlicher Materialeigenschaften von Bechern aus anderen Naturfaserverbundstoffen (z.B. Bagasse-Becher) wird davon ausgegangen, dass diese ähnlich hohe Kunstharzanteile aufteilen und zum Teil ebenfalls Stoffe freisetzen.

4. Ökobilanz

Wie erwähnt zeigen die Ökobilanzen, in denen Einwegbecher mit Mehrwegbechern verglichen werden, deutliche Umweltvorteile für die Mehrweglösung. Diese Studien beziehen sich allerdings nicht auf den typischen Coffee-to-go-Becher, sondern z.B. auf den Einsatz der Becher bei Großveranstaltungen. Hierauf weist die Frankfurter Allgemeine Zeitung in einem Artikel hin und merkt an, dass bestimmte spezifische Aspekte, wie das Spülen oder der Transport relativ schwerer Mehrwegbecher deutlichen Einfluss auf die Ökobilanz haben könnten¹⁶.

Auch ist keine Studie bekannt, die Mehrwegbecher aus verschiedenen Materialien miteinander vergleicht. Hier würden die unter Punkt 3 dargestellten Untersuchungsergebnisse sicherlich zu einer

¹³ Der spezifische Migrationswert legt fest, wieviel von einer Substanz höchstens aus der Verpackung eines Lebensmittels in das Lebensmittel übergehen (migrieren) darf (Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Verbraucherschutz, D, https://www.bvl.bund.de/DE/Home/homepage_node.html)

¹⁴ Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt Stuttgart
http://www.cvuas.de/pub/beitrag.asp?subid=1&Thema_ID=3&ID=1981&Pdf=No&lang=DE

¹⁵ Chemisches und Veterinäruntersuchungsamt Stuttgart; <http://www.cvuas.de>, 2017

¹⁶ Bernau, P.; Coffee to go – Verschlimmbechert, Frankfurter Allgemeine Zeitung, 23.05.2017
<https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftspolitik/coffee-to-go-umweltanalysen-von-mehrwegbechern-und-einweg-15029225.html>

schlechteren Bewertung der Becher aus Biokompositen im Vergleich zu chemisch „stabileren“ Materialien, wie Keramik, Glas oder Metall in der Wirkungskategorie Direkte Gesundheitsschädigungen führen.

Generell liegt es auf der Hand, dass ein Mehrwegbecher eine umso bessere Ökobilanz aufweist, je öfter er benutzt wird. Auch die Art und Weise des Spülens und der Herstellungsaufwand (Energie- und Rohstoffverbrauch) spielen eine Rolle.

Nach Einschätzung des Wuppertal Institutes lohnt sich ein Mehrwegbecher nach spätestens zwei Monaten. Ab dann sei es ökologisch besser den Mehrwegbecher aufzufüllen als einen Einwegbecher zu verwenden¹⁷. Es ist fraglich, ob Mehrwegbecher aus Biokompositen, bei denen mit einer Veränderung der Oberfläche bei längerem Gebrauch zu rechnen ist (s. Punkt 3), bei täglichem Gebrauch diese Nutzungsdauer erreichen.

Bei einer Ökobilanz von Biokompositbechern wären auch die zusätzliche Ausstattung, wie Deckel und Griffiring mit in die Bewertung einzubeziehen.

¹⁷ Speck M., Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie zitiert in Zeit online;
<https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2017-08/kaffeebecher-pfand-nachhaltigkeit-umweltschutz>

3. Arten, Marktsituation und Verwendungsfelder biologisch abbaubarer Kunststoffe

Biologisch abbaubare Kunststoffe können, wie bereits erläutert, aus nachwachsenden Rohstoffen und fossilen Rohstoffen hergestellt werden. Nachfolgend werden die Grundtypen biologisch-abbaubarer Kunststoffe beschrieben und ihr aktueller Marktanteil dargestellt. Anschließend wird auf mögliche Verwendungsfelder und Beispiele für Produkte aus BAK näher eingegangen.

3.1 Unterscheidung biologisch abbaubarer Kunststoffe nach Rohstoffart

Abbildung 3 zeigt das Schema einer möglichen Untergliederung der biologisch abbaubaren Kunststoffe nach der Art ihrer Rohstoffbasis.

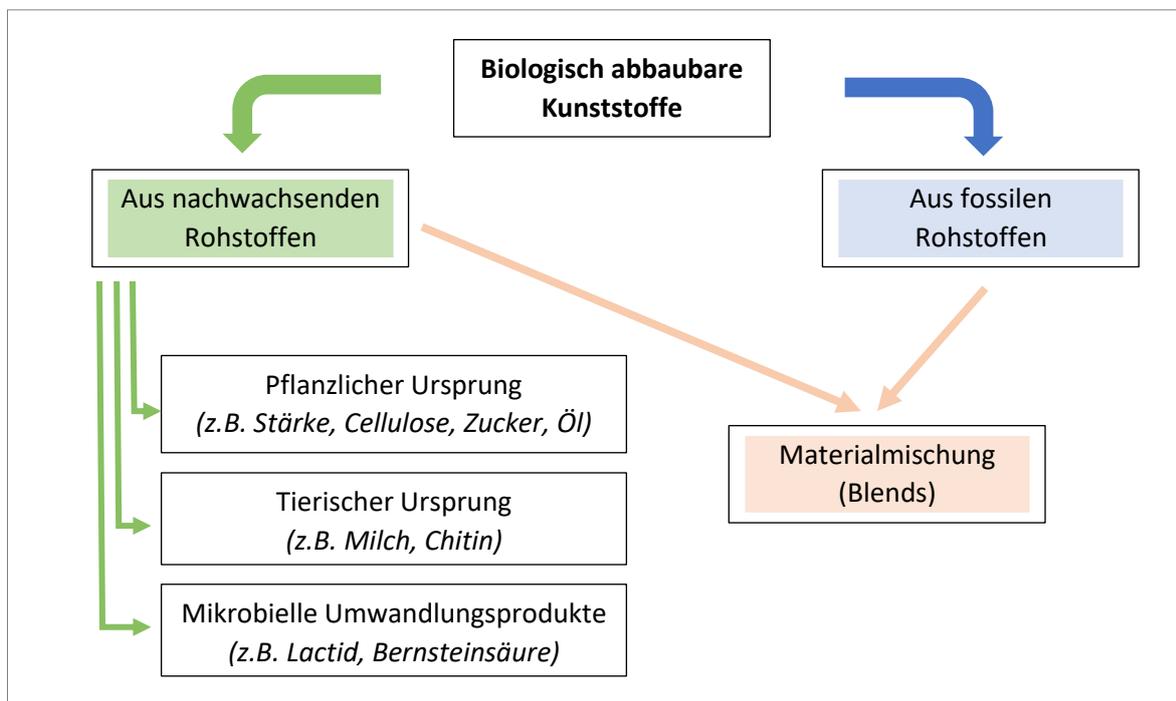


Abbildung 3: Rohstoffe für biologisch abbaubare Kunststoffe (nach Umweltbundesamt, 2009)

3.1.1 Biologisch abbaubare Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen

An den bestehenden Produktionskapazitäten für biologisch abbaubare Kunststoffe haben Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe einen Anteil von 68 % und solche aus fossilen Rohstoffen von 32 %. Von den Kapazitäten für BAK aus nachwachsenden Rohstoffen entfallen 57 % auf diejenigen, die durch Fermentierung unter Einwirkung von Mikroorganismen gewonnen werden und 43 % auf diejenigen,

die auf Grundlage extrahierter Pflanzeninhaltsstoffe gewonnen werden (IfBB, 2017)¹⁸. Die Produktion von BAK aus Rohstoffen tierischen Ursprungs ist marginal und wird nicht weiter betrachtet.

3.1.1.1 Rohstoffe aus mikrobieller Umwandlung

Gemessen an den Marktanteilen der aus ihnen gewonnenen Kunststoffe sind die wichtigsten Rohstoffe aus mikrobieller Umwandlung Lactid und Polyhydroxyalkanoate.

- Lactid ist das Monomer von Polymilchsäure (Polylactid, PLA). Chemisch gesehen ist es ein ringförmiger Zusammenschluss von zwei Milchsäuremolekülen, aus der es durch Dehydration gewonnen wird. Milchsäure wird heute i.d.R. mittels mikrobieller Fermentation hauptsächlich aus Zucker aber auch aus Stärke gewonnen. Wichtigste Ausgangspflanzen zur Produktion von Zucker sind Zuckerrohr und Zuckerrübe und zur Gewinnung von Stärke Weizen, Mais und Kartoffeln (*chemie.de, 2018 und IfBB, 2017*).
- Polyhydroxyalkanoate (= Polyhydroxyfettsäuren PHA) sind natürlich vorkommende Polyester, die von einer Vielzahl von Bakterien gebildet werden können und diesen als Reservestoff dienen. Im großtechnischen Maßstab wird PHA aus Zucker oder Stärke gewonnen. Der bekannteste und am weitesten verbreitete zur Kunststoffproduktion genutzte Vertreter der Materialgruppe ist die Polyhydroxybuttersäure (PHB) (*chemie.de, 2018 und IfBB, 2017*).
- Rohstoffe, die sowohl per mikrobieller Fermentation aus Zucker oder Stärke als auch aus petrochemischen Grundstoffen erzeugt werden können, sind Butandiol, Bernsteinsäure und Adipinsäure für Polysuccinate (PBS, PBSA).

3.1.1.2 Rohstoffe pflanzlichen Ursprungs

Bei den Rohstoffen pflanzlichen Ursprungs handelt es sich um natürlich vorkommende Polymere, die zur Herstellung biologisch abbaubarer Kunststoffe modifiziert werden.

- Thermoplastische Stärke

Thermoplastische Stärke (TPS, franz.: amidon thermoplastique, engl. starch plastic) wird aus in der Natur vorkommender Stärke¹⁹ durch chemische und physikalische Modifikation gewonnen. Bei Werkstoffen auf Basis von TPS handelt es sich meist um sogenannte Stärkeblends, d.h. eine Kombination verschiedener Stärkeformen und anderer BAK (Material Archiv, 2018).

¹⁸ Nach Angaben in (Umweltbundesamt, 2018) veröffentlichen zwei Institutionen/Verbände regelmäßig Daten zu den weltweiten Produktionskapazitäten von Biokunststoffen; es handelt sich um das Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (IfBB) der Hochschule Hannover und den Verband European Bioplastics (EUBP), der auf die Daten des nova-Instituts (nova-Institut für politische und ökologische Innovation GmbH) zurückgreift; die Daten beider Stellen weichen aufgrund unterschiedlicher Erhebungsmethoden teilweise voneinander ab; so schätzt das nova-Institut den Anteil von BAK auf Basis nachwachsender Rohstoffe auf mind. 73% gegenüber 68% (IfBB); bei der detaillierten Betrachtung der Marktanteile der verschiedenen BAK werden die Angaben beider Quellen herangezogen und gegenübergestellt

¹⁹ Stärke ist ein Reservestoff von Pflanzen, er besteht aus miteinander verketteten Glucosemolekülen und ist chemisch betrachtet daher ein Polysaccharid und Biopolymer; wichtige Stärke liefernde Kulturpflanzen sind Mais, Weizen und Kartoffeln

- Cellulose

Cellulose ist der Hauptbestandteil der Zellwände aller höheren Pflanzen in unterschiedlichen Massenanteilen. Cellulose ist unverzweigt und besteht aus mehreren hundert bis mehreren zehntausend Glucose-Molekülen bzw. Cellobiose-Einheiten. Die Cellulosemoleküle lagern sich zu höheren Strukturen zusammen, die als reißfeste Fasern in Pflanzen häufig statische Funktionen haben.

Der Anteil von Cellulose in Baumwollfasern beträgt ca. 95 %, in Hartholz 40 -75 % und in Weichholz 30-50% (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2018).

Zur Herstellung von biologisch abbaubaren Kunststoffen wird Cellulose in Form von **Celluloseregeneraten** oder **Cellulosederivaten** genutzt.

- Celluloseregenerate

Wenn Cellulose chemisch gelöst und neu in Form von Fasern oder Folien zusammengesetzt wird, spricht man von Celluloseregeneraten. Bekannte Kunststoffe aus Celluloseregeneraten sind z.B. Viskose, Cellophan und Zellglas.

- Cellulosederivate

Bei Cellulosederivaten handelt es sich hauptsächlich um Celluloseether und Celluloseester, wobei letztere die größere Bedeutung für die Kunststoffindustrie haben. Celluloseester entstehen durch die Veresterung von Cellulose mit organischen Säuren. Die technisch wichtigsten Celluloseester sind Celluloseacetat (CA), Cellulosepropionat (CP) und Cellulosebutyrat (CB) (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2018). Nicht alle Cellulosederivate sind biologisch abbaubar²⁰.

3.1.2 Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen

Die nachfolgend aufgelisteten Kunststoffe werden heute in der Regel aus Rohstoffen, die aus Erdölderivaten gewonnen werden, hergestellt. Es sind, chemisch betrachtet, größtenteils Polyester. Z.T. können ihre Grundstoffe auch aus nachwachsenden Rohstoffen (Zucker-, Stärke) synthetisiert werden (z.B. Bernsteinsäure oder 1,4 Butandiol [IfBB, 2017]).

- PBS

Polybutylensuccinat (PBS) wird aus Bernsteinsäure und 1,4-Butandiol hergestellt. PBS ist im Erdreich biologisch abbaubar, hat aber ansonsten ähnliche Eigenschaften wie die klassischen Polyolefine, beispielsweise Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) (Wacker Chemie AG, 2018).

- PBAT

Polybutylenadipat-Terephthalat (PBAT) wird aus 1,4-Butandiol, Terephthalsäure oder Adipinsäure hergestellt. PBAT weist ähnliche Eigenschaften wie PE-LD auf. Meistens wird PBAT als Compound mit anderen Polymeren verarbeitet (Material Archiv, 2018).

- PCL

Polycaprolacton (PCL) wird aus Caprolacton, das aus Capronsäure gewonnen wird, hergestellt. Es lässt sich mit fast allen anderen Kunststoffen gut verarbeiten, insbesondere auch mit Stärke.

²⁰ Cellulose ist ein Kettenmolekül aus zahlreichen Glucosemolekülen; jedes Glucosemolekül hat drei Hydroxygruppen, die durch andere Gruppen ersetzt werden können; hierdurch werden die Eigenschaften der Cellulose-Kunststoffe bestimmt; je mehr Hydroxygruppen ersetzt sind, desto schlechter bauen sich die Cellulosederivate ab.

Es findet häufig Verwendung als Blendkomponente (*chemie.de, 2018* und *Material Archiv, 2018*).

3.2 Old- und New Economy Kunststoffe

Die ersten vom Menschen hergestellten Kunststoffe basierten auf modifizierten, in der Natur vorkommenden Biopolymeren (z.B. Casein, Gelatine, Schellack, (Natur)Gummi, Zellophan, Zelluloid, Linoleum, ...) und waren damit alle biobasiert. Seit Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts wurden die meisten dieser biobasierten „alten Kunststoffe“ durch solche auf Basis von petrochemischen Produkten ersetzt. Ausnahmen, die auch heute noch in relativ großen Mengen hergestellt werden sind Cellulose, Naturkautschuk und Linoleum. Sie können als Old Economy-Biokunststoffe bezeichnet werden. Biokunststoffe, die in den letzten 30 Jahren aufgrund ökologischer Motive oder als Alternative zu Kunststoffen auf Basis der begrenzten fossilen petrochemischen Rohstoffe sowie in manchen Fällen aufgrund erwünschter neuer technologischer Eigenschaften entwickelt wurden, werden als Abgrenzung zu den ersten biobasierten Kunststoffen als New Economy Biokunststoffe bezeichnet (IfBB , 2017).

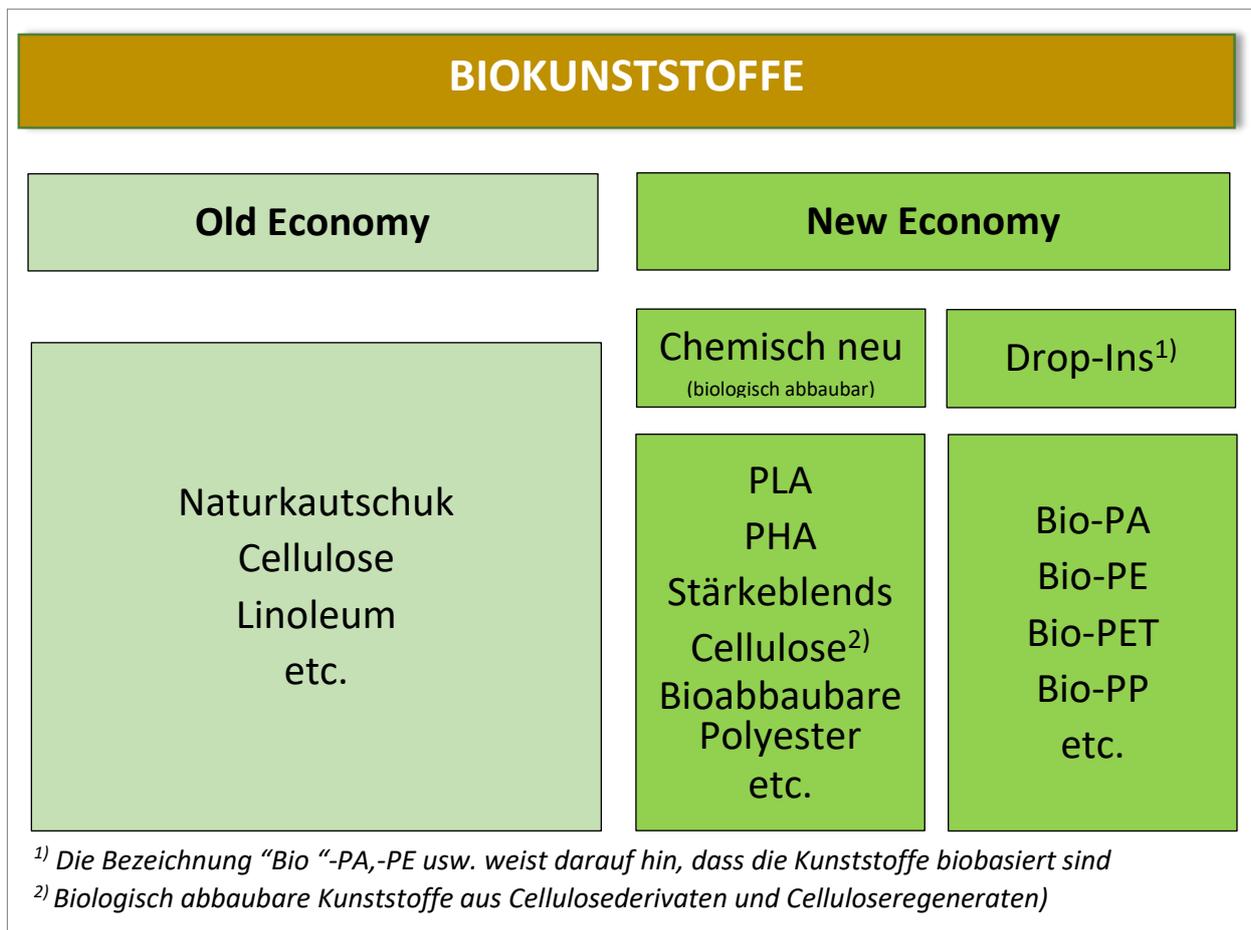


Abbildung 4: Aufteilung der Biokunststoffe in einen alten und einen neuen Typ (Old- und New Economy) nach IfBB , 2017

In dem hier vorgelegten Bericht werden nur die New Economy-BAK weiter betrachtet.

3.3 Produktionskapazitäten und Marktanteile biologisch abbaubarer Kunststoffe

Zahlen zu den aktuellen weltweiten Produktionskapazitäten von Biokunststoffen werden jährlich vom IfBB und von nova-Institute/EUBP veröffentlicht. Diese unterscheiden sich aufgrund unterschiedlicher Erfassungsmethodik in der Vergangenheit teilweise recht deutlich. Bei den letzten verfügbaren Daten mit Bezug auf die Jahre 2017 bzw. 2016 ist jedoch eine deutliche Annäherung der Zahlen festzustellen.

Die globale Produktionskapazität für biologisch abbaubare Kunststoffe wird auf 757.000 (*IfBB Bezug 2016*) bis 880.000 Tonnen (*nova-Institute/EUBP Bezug 2017*) geschätzt. Die tatsächlich nachgefragten und produzierten Mengen dürften deutlich niedriger liegen.

Diese Mengen entsprechen einem Anteil von 37 bis 43 % am Gesamtsektor der unter dem Begriff Biokunststoffe subsummierten New Economy-Kunststoffe. Bezogen auf den Gesamtsektor der Kunststoffe errechnet sich ein anteiliges Produktionsvolumen von 0,2 bis 0,3 %.

Eine Prognose von European Bioplastics und dem nova-Institute aus dem Jahr 2013 rechnete mit einer Vervierfachung der weltweiten Produktionskapazitäten für Biokunststoffe bis 2018 auf dann über 6,7 Millionen Tonnen (EUBP 2013). In einer von der gleichen Gesellschaft 2017 veröffentlichten Prognose (EUPB, 2018) wurde für 2018 nur noch eine Kapazität von knapp 2,1 Millionen Tonnen angegeben. Für 2022 wird in selbiger Prognose von einer Steigerung der Kapazitäten auf 2,4 Millionen Tonnen (davon 1,35 Mio t biobasierte, nichtabbaubare Kunststoffe und 1,09 Mio t biologisch abbaubare Kunststoffe ausgegangen). Dies entspräche einem Anwachsen der potenziellen Produktion um rund 19 % in fünf Jahren (15 % biobasierte nicht abbaubare Kunststoffe, 23 % biologisch abbaubare Kunststoffe). Ähnlich deutlich weichen die Prognosen der vergangenen Jahre und die aktuelle Prognose des IfBB-Institutes voneinander ab. Hauptgrund für die markanten Unterschiede sind offensichtlich mögliche Änderungen bei der Bio-PET-Strategie des Coca-Cola-Konzerns. Wenn Coca-Cola einen Großteil seiner Getränke, wie angedacht, in teilbiobasierten PET-Flaschen anbieten würde, könnte der Bedarf an BIO-PET bis 2022 auf bis zu 7 Mio. Tonnen anwachsen. Falls dies nicht der Fall wäre, würde die voraussichtliche Kapazität nur mit max. 1 Mio Tonnen veranschlagt (*IfBB, 2018*).

Die folgenden Abbildungen illustrieren die Marktsituation bei den Kunststoffen und die Einordnung der biologisch abbaubaren Kunststoffe.

Dass der Markt für Biokunststoffe im Allgemeinen und für biologisch abbaubare Kunststoffe im Besonderen schwierig abzuschätzen ist, zeigen die Prognosen zu seiner Entwicklung der letzten Jahre. Diese sind durch deutliche Schwankungen gekennzeichnet. Insofern werden auch die aktuellen Einschätzungen als relativ unsicher eingestuft.

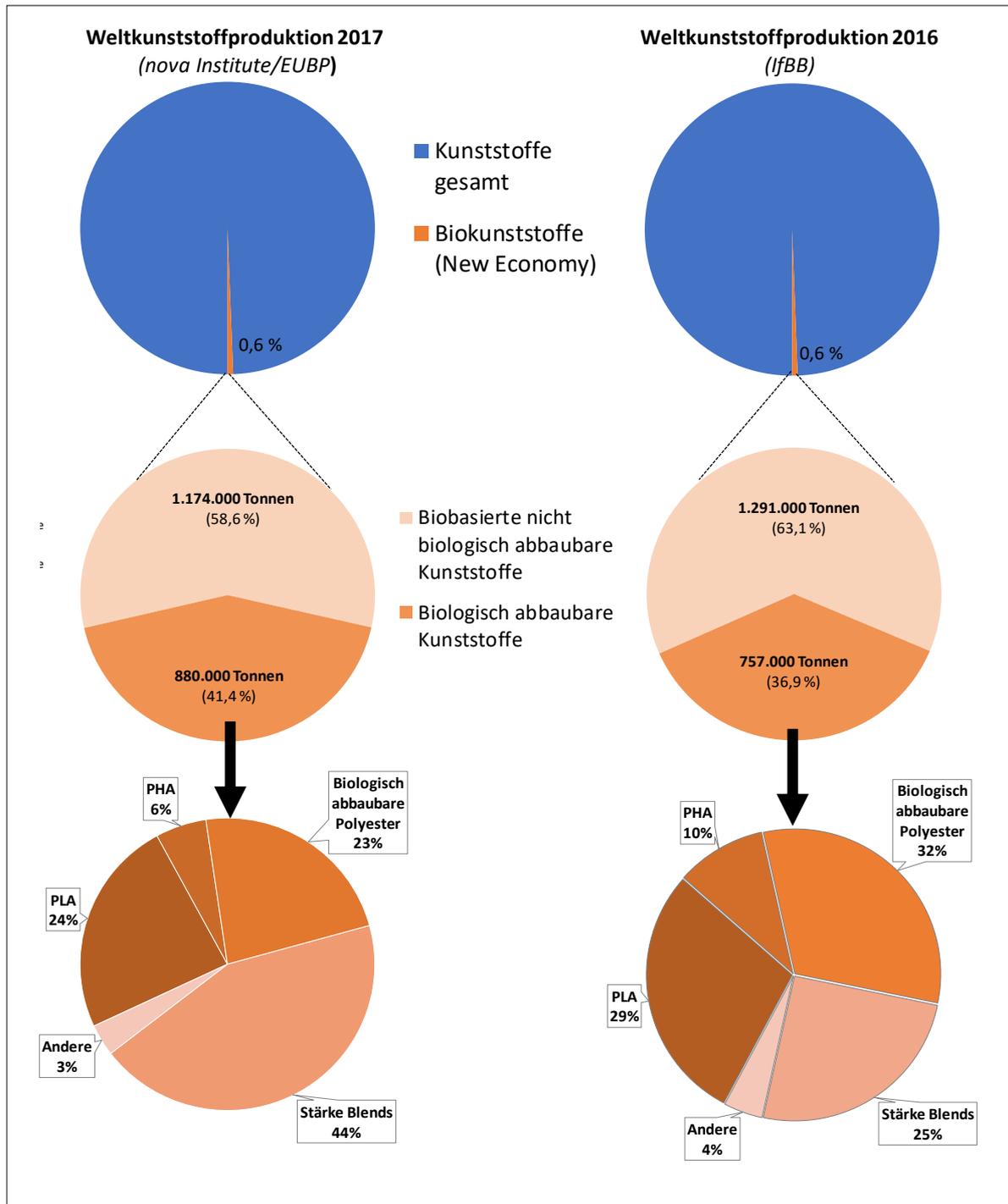


Abbildung 5: Anteil der biologisch abbaubaren Kunststoffe an der Kunststoffproduktion und prozentuale Verteilung der Produktionskapazitäten mengenmäßig relevanter Arten von biologisch abbaubaren Kunststoffen (Eigene Darstellung unter Rückgriff auf folgende Quellen: (Plastics Europe, 2018; IfBB, 2018; IfBB, 2017, EUPB, 2018)

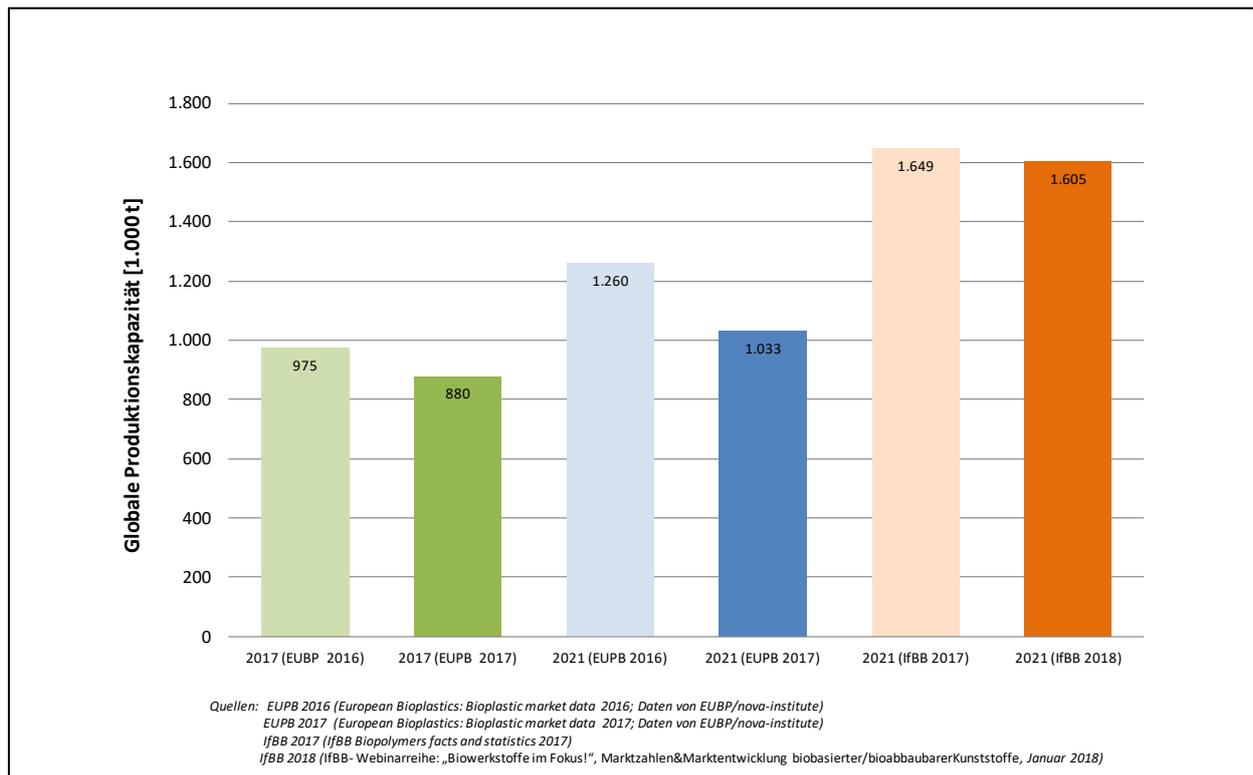


Abbildung 6: Prognosen zur Marktentwicklung (Produktionskapazitäten) biologisch abbaubarer Kunststoffe

3.4 Verwendungsfelder

Die Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten von biologisch abbaubaren Kunststoffen sind vielfältig und lassen sich kaum klar umgrenzen. Aktuell werden sie vor allem als Verpackungsmaterial eingesetzt. Zweitwichtigstes Anwendungsfeld sind Landwirtschaft und Gartenbau, wo sie vor allem als Mulch- und Schutzfolien oder Anzuchtgefäße genutzt werden.

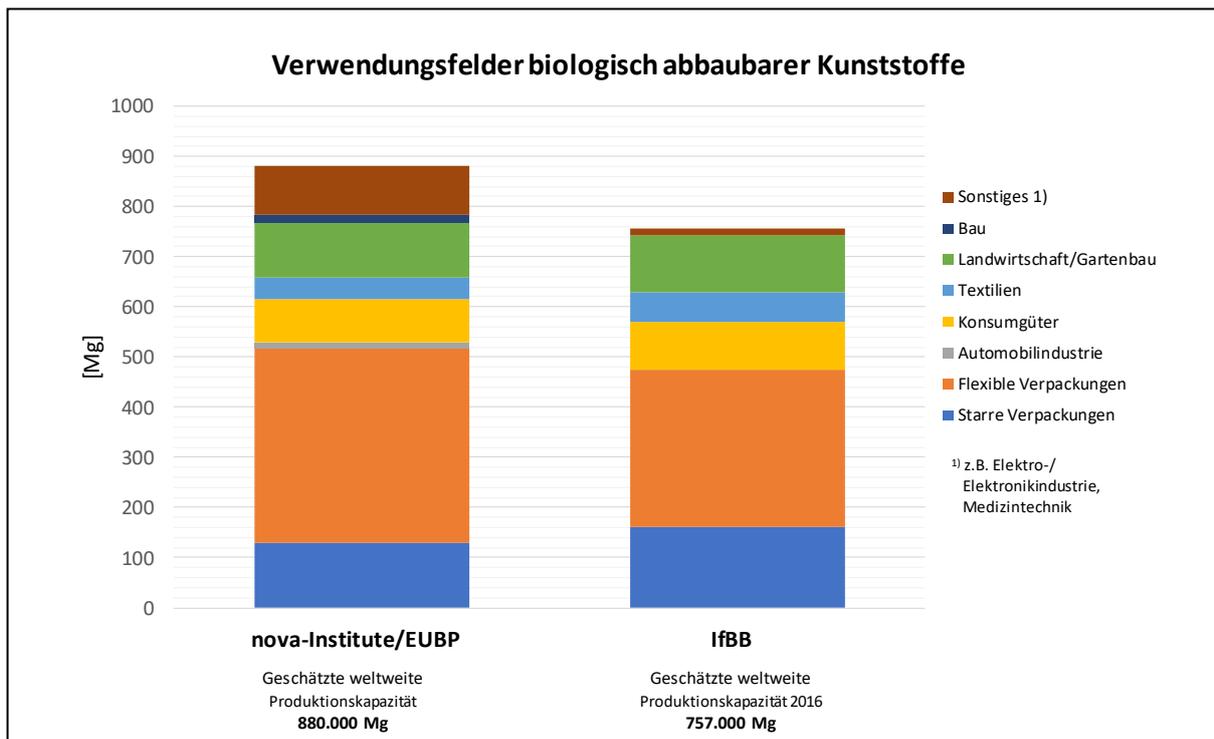


Abbildung 7: Verwendungsfelder biologisch abbaubarer Kunststoffe weltweit
Eigene Darstellung unter Verwendung von Angaben aus
(IfBB, Institute for Bioplastics and Biocomposites, 2018) und (EUPB, 2018)

3.5 Beispiele für biologisch abbaubare Kunststoffe auf dem luxemburgischen Markt

Soweit bekannt, existiert bislang keine umfassende Marktrecherche zu Produkten, die komplett oder teilweise aus biologisch abbaubaren Kunststoffen hergestellt werden und auf dem luxemburgischen Markt angeboten werden. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich daher auf Eindrücke und Einschätzungen des Autors, die teilweise bei Abfallanalysen, die allerdings nicht die Ermittlung der Arten und Anteile von Produkten aus biologisch abbaubaren Kunststoffen zum Gegenstand hatten, auf einzelne nicht systematische Sichtungen von Konsumprodukten und Verpackungen in luxemburgischen Supermärkten und sonstigen Geschäften des Einzelhandels sowie auf Befragungen von Abfallentsorgern und -verwertern.

3.5.1 Verpackungen

Ein Großteil der im luxemburgischen Einzelhandel angebotenen verpackten Lebensmittel und anderen Waren wird importiert. Das Sortiment in den Supermärkten ist „international“ und entspricht in weiten Teilen dem Standard in den Nachbarländern. Dies trifft entsprechend auch auf die Verpackungen und die für sie verwendeten Materialien zu. Insofern dürfte der Anteil biologisch abbaubarer Kunststoffverpackungen in dem im benachbarten Ausland beobachteten Bereich liegen.

In dem vom deutschen Umweltbundesamt herausgegebenen Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe (*Umweltbundesamt, 2018*) schätzen die Autoren basierend auf in Deutschland erhobenen Daten für Europa den Verbrauch von BAK für Verpackungen und andere Anwendungen sowie den resultierenden Abfallanfall. Wendet man das Berechnungsmodell auf Luxemburg an, so ergäbe sich ein Marktpotential von rund 67 bis 74 Tonnen BAK jährlich, wovon rund 55 Tonnen oder -

74 bis 82 Gew.-% auf Verpackungen entfielen. Die Abfallmenge aus Produkten aus BAK beliefe sich auf ca. 56 – 58 Tonnen im Jahr (siehe Übersicht 2)

Eine Nachfrage bezüglich der in Luxemburg auf dem Markt befindlichen Verpackungen aus BAK bei der Valorlux a.s.b.l., die die Erfassung und Verwertung der in Luxemburg durch ihre Mitglieder auf den Markt gebrachten Verpackungen organisiert, ergab, dass Verpackungen aus BAK mengenmäßig nicht gesondert registriert werden, sondern von den Inverkehrbringern unter der Sammelkategorie „Sonstige“ eingeordnet werden²¹.

Übersicht 2: Schätzung des Verbrauchs und des Aufkommens an biologisch abbaubaren Kunststoffen in Luxemburg¹⁾

Einsatzbereich ²⁾	Anteil A an Kunststoffverbrauch in		Anteil BAK an Kunststoffein-satzbereichen	Schätzung Kunststoff-verbrauch		Schätzung Verbrauch BAK		Anteil Abfall am Kunststoff-verbrauch	Schätzung Abfall BAK	
	D	EU		Luxemburg		Luxemburg			Luxemburg	
	[%]	[%]	[%]	[Mg*a]	[Mg*a]	[Mg*a]	[Mg*a]	[%]	[Mg*a]	[Mg*a]
	Sp. 1	Sp. 2	Sp. 3	Sp. 4	Sp. 5	Sp. 6	Sp. 7	Sp. 8	Sp. 9	Sp. 10
Verpackung	50,8	62,2	0,42	13.134	13.134	55,2	55,2	92,8	51,2	51,2
Haushaltswaren/ Konsumgüter	7,2	6,6	0,49	1.859	1.383	9,0	6,7	32,6	2,9	2,2
Landwirtschaft/ Gartenbau	6,5	5,1	0,25	1.677	1.086	4,1	2,7	62,7	2,6	1,7
Sonstiges (z.B. Textilien)	35,5	26,1	0,05	9.147	5.497	5,0	3,0	27,5	1,4	0,8
Gesamt				25.844	21.100	73,1	67,4		58,1	55,9

¹⁾ Eigene Berechnung unter Rückgriff auf folgende Quellen: Kunststoffverbrauch nach Einsatzbereichen D (Consultic, 2016), EU (Plastics Europe, 2018); Anteil BAK berechnet aus Angaben in (nova-Institute/narocon, 2016) und (Umweltbundesamt, Hrsg., 2018); Schätzung Kunststoffverbrauch Mengen berechnet aus der in Luxemburg von den Verpackungsverantwortlichen für 2016 deklarierten Verpackungsmenge (13.134 Tonnen) (Valorlux, 2017) und den Anteilen der Kunststoff-Einsatzbereiche (Sp. 3) am Kunststoff-Verbrauch (Spalten 1 und 2); Schätzung Verbrauch BAK berechnet aus Daten der Spalten 3 bis 5; Anteil Abfall am Kunststoffverbrauch (Consultic, 2016); Schätzung Abfall BAK berechnet aus Daten der Spalten 6 bis 8

²⁾ nicht berücksichtigt Automobilindustrie, Bau und Elektroindustrie

³⁾ Berechnet mit Bezug auf die einsatzbereichsbezogene Kunststoffnachfrage in Deutschland

⁴⁾ Berechnet mit Bezug auf die einsatzbereichsbezogene Kunststoffnachfrage in der EU 28 + Norwegen u. Schweiz

⁵⁾ einschließlich Beutel, Tüten und Taschen, die nicht als Primärverpackung dienen (z.B. Abfallbeutel)

Nachfragen bei luxemburgischen Recyclingparks ergaben, dass Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen vereinzelt und in geringen Mengen in den Parks abgegeben werden. Diese werden nicht systematisch erfasst oder aussortiert. Wenn ein Produkt aus BAK identifiziert wird, wird es den Störstoffen zugeordnet. Erkannt werden entsprechende Produkte nur, wenn sie sich optisch und ggf. haptisch deutlich von anderen unterscheiden bzw. auch anhand von Markennamen, wenn bekannt ist, dass bestimmte Hersteller und Abfüller Verpackungen aus BAK verwenden.

Hauptkriterium für die Zuordnung von Verpackungen zu einer bestimmten Kunststofffraktion ist allerdings die Verpackungsform, z.B. ob es sich um Becher, Folien, Flaschen oder Blister handelt. Die Kunststoffart wird i.d.R. nicht anhand der Kennzeichnung kontrolliert.

Bei den Folienverpackungen und Kunststofftüten fallen solche aus Stärkeblends (Mater-Bi®) aufgrund ihrer zu den herkömmlichen Materialien (PE) unterschiedlichen Haptik häufiger auf. Beziffert werden konnte ihr Anteil allerdings ebenfalls nicht. Er wird jedoch als marginal angesehen („weniger als eine Verpackung am Tag im Durchschnitt“). Interessant war der Hinweis einer Mitarbeiterin in einem Recyclingpark, die darauf verwies, dass eine Kundin bei ihr einmal eine Tüte mit biologisch abbaubaren Joghurtbechern abgegeben hatte und darum bat, diese einer Kompostierung zuzuführen.

²¹ Antwort auf schriftliche Anfrage, 28.09.18; separat deklariert werden nur Verpackungen aus konventionellen Kunststoffen in den Kategorien PET, HDPE, sonstige Monokunststoffe, Verbundkunststoffe

Einen geringen Anteil von Verpackungen aus BAK zeigten auch Untersuchungen zu den Fremdstoffanteilen in der Fraktion Becher/Blister²², die in einem Recyclingpark erfasst wurden (Übersicht 3). Anzumerken ist, dass diese Untersuchungen bereits 2013 stattgefunden haben und möglicherweise die Verwendung von Verpackungen aus BAK seitdem (auf niedrigem Niveau) angewachsen sein könnte.

Übersicht 3: Verpackungen aus BAK in der Sammelfraktion Becher/Blister aus Kunststoff in einem Recyclingpark (Analyse ECO-Conseil s.à.r.l., 2013, unveröffentlicht)

Analyse einer Stichprobe der Leichtfraktion „Becher / Blister“ aus dem Recyclingpark der Stadt Luxemburg
--

Hauptsortierung 12.02.2013, Materialinput 500 kg
--

BECHER 43,5 Gew.-%	BLISTER 48,6 Gew.-%	REST 7,9 Gew.-%
--------------------	---------------------	-----------------

Nachsortierung nach Kunststoffarten	
91,0 Gew.-% PP/PS	33,6 Gew.-% PP/PS
4,8 Gew.-% PE	0,0 Gew.-% PE
2,9 Gew.-% PET	37,9 Gew.-% PET
0,9 Gew.-% PVC	1,5 Gew.-% PVC
0,1 Gew.-% PLA	0,3 Gew.-% PLA
0,3 Gew.-% Sonstiges ¹⁾	26,7 Gew.-% Sonstiges ²⁾

¹⁾ z.B. EPS, Verbundstoffe, Papieretiketten

²⁾ 22,5 % Kunststoffe ohne Kennzeichnung oder mit Kennzeichnung „7“ bzw. „0“ (die Codes 7 oder 0 sind eine Sammelkategorie für sonstige Kunststoffe (= others); 4,2% z.B. EPS, Verbundstoffe, Schachteln aus (Hart)Kunststoff; bei den mit 7 oder 0 gekennzeichneten Verpackungen kann es sich zu einem geringen Anteil auch um PLA und andere BAK handeln

3.5.2 Kunststofftüten

In Luxemburg relativ verbreitet ist die Verwendung von kompostierbaren Kunststofftüten aus Stärkeblends zur Erfassung von Bioabfall. Diese Bioabfallsammelbeutel werden entweder als Inlay für Vorsortiergefäße oder für Biotonnen genutzt.

Sie wurden bereits Ende der 90iger Jahre mit Unterstützung der Betreiber der damals in Betrieb befindlichen Kompostierungsanlagen eingeführt. Die Sammelbeutel sind mit den Logos der Kompostierungsanlagen Minett-Kompost, SICA und SIDEC bedruckt und haben auf ihrer Verpackung eine Empfehlung der Umweltberodung Lëtzebuerg (EBL).

Neben diesen Tüten, die von einem luxemburgischen Unternehmen vertrieben werden, und nach Meinung des Autors aufgrund von Beobachtungen in luxemburgischen Kompostierungs- und Vergärungsanlagen für den genannten Verwendungszweck am mit Abstand häufigsten verwendet werden, bieten weitere Hersteller abbaubare Abfallsammelbeutel aus Kunststoff an.

²² Heute werden in den Recyclingparks die Fraktionen Kunststoffbecher und -blister getrennt gesammelt; 2013 war das gemeinsame Einsammeln in einer Mischfraktion noch vielfach üblich

Während die Zersetzung²³ der Beutel bei der direkten Kompostierung bzw. einer an die Trockenvergärung anschließenden Kompostierung des Gärrestes nach Einschätzung des Autors im Rahmen des regulären Betriebes gewährleistet ist, werden die Tüten bei den luxemburgischen Kofermentationsanlagen, die Bioabfälle im Verfahren der Nassvergärung verarbeiten, als Störstoffe vor dem Einbringen in die Gärreaktoren abgeschieden und einer Entsorgung zugeführt.

In welchem Umfang die Sammelbeutel in Luxemburg eingesetzt werden, wurde, soweit bekannt, bisher nicht systematisch untersucht. Eigene Beobachtungen und eine im Rahmen eines Pilotprojektes zur Einführung der Biotonne durchgeführte Begleituntersuchung in zwei Gemeinden des Syndikates SIGRE geben jedoch Hinweise auf die Häufigkeit ihrer Verwendung:

- Ergebnisse von Sichtungen im Rahmen eines Pilotprojektes des interkommunalen Syndikates SIGRE zur Einführung der Biotonne in den Gemeinden Betzdorf und Grevenmacher (ECO-Conseil s.à.r.l., 2015)

In den beiden Gemeinden wurden 2014 und 2015 Sichtungen der zur Abfuhr bereitgestellten Tonnen durchgeführt. Dabei wurde auch registriert, ob die Abfälle in Tüten aus BAK eingefüllt wurden. Zu den in Übersicht 4 dargestellten Ergebnissen der Sichtungen ist anzumerken, dass die Verwendung der BAK-Tüten von den betreffenden Gemeinden nicht empfohlen, aber auch nicht explizit untersagt wurde. Bei entsprechenden Nachfragen durch die Nutzer der Biotonne wurde die Verwendung von Papiertüten bzw. Zeitungspapier zur Vermeidung von Verschmutzungen der Tonne empfohlen.

Da die Bioabfälle des Pilotprojektes in einer Kofermentationsanlage mit Nassvergärung verwertet wurden, ist die Eigenschaft der Kompostierbarkeit der Sammelbeutel bedeutungslos. Sie werden, wie enthaltene Tüten oder Sammelsäcke aus konventionellen Kunststoffen, als Störstoffe betrachtet und ausgeschleust und tragen zu einer Erhöhung der Konditionierungs- und Behandlungskosten infolge der notwendigen Abtrennung bei.

Übersicht 4: Verwendung kompostierbarer Kunststofftüten zur Sammlung von Bioabfällen in Grevenmacher und Betzdorf

	Anteil der gesichteten Biotonnen mit kompostierbaren Kunststofftüten	
	Grevenmacher	Betzdorf
Sichtung April 2014	13 %	22 %
Sichtung Mai 2015	17 %	29 %
Beispiel		

- Beobachtungen bei der Anlieferung von Bioabfällen an Verwertungsanlagen

Die Anlieferungen von Bioabfällen an Anlagen, die diese verwerten dürfen, weisen eine deutliche Anzahl von Sammelbeuteln aus BAK auf. Die folgenden Fotos zeigen Anlieferungen an der

²³ Zersetzung ist die Desintegration des Kunststoffes in kleine optisch nicht wahrnehmbare Partikel, der Begriff bezeichnet hier nicht den kompletten chemischen Abbau (Mineralisierung)

Trockenfermentationsanlage Minett-Kompost, an der Nassfermentationsanlage BAKONA und an der Kompostierungsanlage SICA.

Eine systematische Untersuchung zur Anzahl und Art der BAK-Tüten in den Anlieferungen ist nicht bekannt.



Abbildung 8: Anlieferungen bei der Anlage Minett-Kompost; der Großteil der erkennbaren Kunststofftüten ist kompostierbar



✘ Kompostierbare Kunststofftüte

✘ Papiertüte/Zeitung

✘ Nicht kompostierbare Kunststofftüte

Abbildung 9: Anlieferungen bei der Anlage BAKONA; die identifizierbaren kompostierbaren Sammeltüten sind gekennzeichnet



✘ Kompostierbare
Kunststofftüte

✘ Papiertüte/Zeitung

✘ Nicht kompostierbare
Kunststofftüte

Abbildung 10: Anlieferungen bei der Kompostierungsanlage SICA; die identifizierbaren kompostierbaren Sammeltüten sind gekennzeichnet

- Empfehlungen zum Einsatz der BAK-Sammelbeutel

Vom Syndikat Minett-Kompost und einigen seiner Mitgliedsgemeinden wird die Verwendung von abbaubaren Bioabfall-Beuteln empfohlen. Der Grund hierfür besteht darin, dass in verschiedenen Gemeinden ein hohes Aufkommen an konventionellen Plastiktüten, in denen die Bioabfälle gesammelt und in die Biotonnen eingegeben werden, zu verzeichnen ist. Die abbaubaren Beutel werden als Alternative gesehen, die im Behandlungsprozess weniger technische Probleme verursacht und die Störstoffgehalt in Gärrest, Kompost und Übersieb senkt.

Die 10 l-Bioabfallbeutel werden in Rollen à 25 Stück von den Gemeinden verkauft. Sie werden zentral von Minett-Kompost bestellt. 2017 wurden so 9.000 Rollen an teilnehmende Kommunen abgegeben. Die entspricht einer Stückzahl von 225.000 Stück und einem geschätzten Gewicht von 2,7 Tonnen.

Auf Basis der vorstehend geschilderten Beobachtungen und Hinweise wurde versucht eine Größenordnung für die bei der Bioabfallsammlung in Luxemburg genutzten kompostierbaren Kunststoffbeutel abzuschätzen. Übersicht 5 zeigt die Ergebnisse dieser Hochrechnung und die zugrunde gelegten Hypothesen und Basisdaten.

Übersicht 5: Schätzung der Anzahl und des Gewichts der in Luxemburg zur Bioabfallsammlung verwendeten kompostierbaren Sammelbeutel

Hypothese	Begründung	
Mindestens 20 % der Biotonnennutzer verwenden kompostierbare Kunststoffbeutel	Bei den Sichtungen im Rahmen eines Pilotprojektes zur Einführung der Biotonnen wurden in 13 bis 29 % der zur Abfuhr bereitgestellten Tonnen kompostierbare Kunststoffbeutel registriert; die Nutzung der Beutel wurde nicht empfohlen bzw. als bessere Alternative wurden Papiertüten oder Zeitungen genannt	
Höchstens 60 % der Biotonnennutzer verwenden kompostierbare Kunststoffbeutel	Begründung: bei den oben angeführten Sichtungen konnte in 49 – 65 % der Fälle festgestellt werden, dass die Bioabfälle in Tüten aus Papier bzw. Kunststoff oder in Zeitungspapier eingewickelt in die Biotonne gegeben werden. Es wird davon ausgegangen, dass dieses Verhältnis landesweit ähnlich ist. Da in einigen Anschlussgebieten die Nutzung der kompostierbaren Beutel seit Ende der 90iger Jahre und zum Teil bis heute beworben wird, wird der Anteil an Nutzern relativ hoch angesetzt.	
Biotonnen, landesweit	71.223	
Schätzung	Minimaler Ansatz	Maximaler Ansatz
Biotonnennutzer, die kompostierbare Sammelbeutel aus BAK verwenden ¹⁾	14.245	42.734
Beutel pro Woche	2	
Anzahl Beutel / a	1.481.480	4.444.336
Gewicht 10 l-Beutel	12 g	
Gewicht alle Beutel	17,8 Mg	53,3 Mg

¹⁾ Biotonnennutzer sind private Haushalte und andere Stellen (Kleingewerbe, Büros, Verwaltungen, Kindergärten, Schulen etc.), die an eine öffentliche Bioabfallsammlung angeschlossen sind

Seit November 2018 bietet eine der größte Supermarktkette Luxemburgs Tüten aus Stärkeblends (Mater-Bi®) beim Obst- und Gemüsekauf an. In der Presseinformation, in der auf die Einführung der Tüten aufmerksam gemacht wird, wird auf die Zertifizierung der Tüten als industriell und gartenkompostierbar hingewiesen und explizit betont, dass die Tüten in Gartenkompostern verrotten werden können. Das Angebot dieser Tüten bei einem der größten Einzelhändler Luxemburgs wird vermutlich deutlich zu einem höheren Marktanteil der BAK und zu einem höheren Abfallaufkommen dieser Stoffgruppe führen. Des Weiteren werden die undifferenzierten Aussagen bezüglich der Kompostierungseignung der Tüten kritisch gesehen. Ein Abbau dürfte zwar in den luxemburgischen Kompostierungsanlagen für Bioabfälle relativ sicher erfolgen, nicht jedoch in den luxemburgischen Vergärungsanlagen, in denen der Bioabfall aus einem Großteil der Gemeinden verwertet wird. Ob eine Eigenkompostierung von den Tüten aus Stärkeblends funktioniert, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Es kann aber sicherlich nicht davon ausgegangen werden, dass die Eigenkompostierung überall und generell funktioniert. Nähere Ausführungen zur Problematik der Behandlung von Abfällen aus BAK finden sich unter Punkt 5.

3.5.3 Mulchfolien und andere Produkte für die Anwendung in der Land- und Forstwirtschaft

Mulchfolien werden im Gartenbau und in der Landwirtschaft bei Freilandkulturen eingesetzt, um den unerwünschten Bewuchs mit Beikraut zu unterdrücken und weitere positive Effekte, wie eine frühe und stärkere Bodenerwärmung zu nutzen. Der Effekt der Unkrautunterdrückung ist dabei besonders wünschenswert, da er sowohl im integrierten als auch im ökologischen Anbau eine deutliche Arbeitersparnis bedeutet und im integrierten Anbau eine Umweltentlastung durch Einsparung von Herbiziden mit sich bringt. Folien aus konventionellen Kunststoffen müssen nach der Anbausaison mit erheblichem Arbeitsaufwand aus den Feldern geräumt und einer Verwertung oder Entsorgung zugeführt werden. Zudem verbleiben häufig Bruchstücke der Folien in den Flächen und im Boden, die in Folge physikalischer und mechanischer Einflüsse entstehen. Biologisch abbaubare Folien können den Arbeitsaufwand deutlich reduzieren und die Anreicherung von nicht abbaubaren Plastikpartikeln in Boden und Umwelt reduzieren.

Erfahrungen mit dem Einsatz von biologisch abbaubaren Mulchfolien zeigen, dass diese nach der Einarbeitung in den Boden im Herbst in der Regel bis zum nächsten Frühjahr weitgehend abgebaut sind. Im Einzelnen hängt der Abbauezeitraum von der Materialstärke, den Witterungsbedingungen sowie der Bodenart und der biologischen Aktivität des Bodens ab (*Forschungsgemeinschaft Biologisch abbaubare Werkstoffe e.V./Staatliche Forschungsanstalt für Gartenbau Weihenstephan, 2009*).

Im März 2018 wurde eine Europäische Norm mit Anforderungen an die biologische Abbaubarkeit von Mulchfolien im Boden veröffentlicht (s. Punkt 4.1.1).

Neben Mulchfolien werden folgende Produkte aus BAK zum Einsatz in Gartenbau und Landwirtschaft angeboten:

- Anzucht- und Kulturgefäße
- Verpackungen
- Vliese- und Kulturschutznetze
- Geotextilien
- Bindegarne
- Clipse
- Etiketten

Bezüglich des Einsatzes von Produkten aus BAK in Gartenbau und Landwirtschaft in Luxemburg wurden verschiedene Stellen befragt:

- Die Fédération horticole geht davon aus, dass Produkte aus BAK in ihren Mitgliedsbetrieben eingesetzt werden, hat aber keine Informationen dazu in welchen Bereichen und in welchem Umfang;
- Die Beratungsstelle für Gemüseanbau und Alternativkulturen der Landwirtschaftskammer geht davon aus, dass in Luxemburg im Bereich des Erwerbsgartenbaus und der Landwirtschaft praktisch keine Mulchfolien eingesetzt werden. In der Vergangenheit wurden aber auf ca. 12 ha im Gemüsebau abbaubare Folien eingesetzt. Der Abbau der Folie erfolgte dabei über zwei Anbaujahre. Im Jahr nach Einsatz der Folie waren entsprechend noch Bruchstücke optisch erkennbar. Anzuchtgefäße aus BAK werden in Luxemburg ebenfalls nicht eingesetzt. Entweder werden Sämlinge und Stecklinge in Pressballen aus Torf- oder ähnlichen Substraten, die in Mehrwegpaletten transportiert werden, ausgepflanzt oder die Anzucht erfolgt in Gefäßen aus konventionellem Kunststoff, die mehrfach verwendet werden und bei Beschädigungen einem Recycling zugeführt werden.

- Nach Auskunft eines großen Gartenhandels²⁴ besteht derzeit eine geringe Nachfrage nach Produkten aus biologisch abbaubaren Kunststoffen. Nur einzelne Kunden würden sich gezielt nach solchen erkundigen. Allerdings wird derzeit die Aufnahme entsprechender Produkte in die Angebotspalette intensiv geprüft. Ein Aspekt bildet dabei, dass die Verwendung von bioabbaubarer Mulchfolie zur Unterdrückung von unerwünschtem Beikraut als eine umweltfreundliche Alternative zu Pestiziden, insbesondere nach Verbot von Glyphosat gesehen wird. Eine Reihe von Herstellern und Zulieferern hat Produkte aus BAK im Angebot und vorgestellt. Im Befragten Unternehmen werden Anzuchtgefäße aus BAK angeboten bzw. verwendet (z.B. werden Salatpflanzen in solchen verkauft).

3.6 Zusammenfassende Übersicht

Die wichtigsten Eigenschaften, mögliche Verwendungsfelder sowie der aktuelle Marktanteil der mengenmäßig relevantesten biologisch abbaubaren Kunststoffe wurden zu ihrer schnellen Einordnung und Charakterisierung tabellarisch zusammengestellt (Übersicht 6).

²⁴ De Verband, Garden Center

Übersicht 6: Zusammenfassende Charakterisierung biologisch abbaubarer Kunststoffe¹⁾

Kunststoff		Marktanteil	Herstellung	Rohstoffe	Hauptverwendung	Hersteller	Markenname	Produktbeispiele
Bezeichnung	Abkürzung	Sektor der BAK	Verfahren			(Auswahl)	(Beispiele)	allgemein
Stärke-Blends (<i>franz. mélanges d'amidon; engl. starch blends</i>)	-	25 - 44 %	Modifizierung natürlich vorkommender Polymere	Stärke (aus Mais, Weizen, Kartoffeln)	- Folien; Anzuchtgefäße etc. in Gartenbau und Landwirtschaft - Verpackungen - Kunststofftaschen/-tüten - Besteck	Biotec GmbH & Co. KG,	BIOPLAST TPS®	Gaialene®
						KINGFA Science & Technology Co. Ltd.,	ECOPOND Flex-162	Verpackungsfolie
						Novamont,	Mater-Bi®	Bioabfallbeutel, Kunststoff-taschen
						Rodenburg Biopolymers,	Solanyl®	
Polymilchsäure (<i>franz. acide polylactique ; engl. polylactid acid</i>)	PLA	24 - 29 %	Mikrobielle Transformation	Milchsäure aus Zucker (Zuckerrüben, Zuckerrohr) oder Stärke (aus Mais, Weizen, Kartoffeln)	- Verpackungen - Folien; Anzuchtgefäße etc. in Gartenbau und Landwirtschaft	NatureWorks LLC,	Ingeo	Verpackungen für frische Lebensmittel mit kurzer Haltbarkeit; Joghurtbecher, Besteck, Trinkbecher, Schalen für Gemüse etc.
						BASF	ecoflex®	Compound für andere biologisch abbaubare Kunststoffe
							ecovio® (Blend)	Bioabfallbeutel, Mulchfolien, Papierbeschichtungen, Schrumpffolien; thermogeformte Verpackungen, Transportverpackungen
						Galactic	futerro	
						sowie etliche "Converter" die PLA-Werkstoffe u.a. von den genannten Unternehmen weiterverarbeiten		Kaffee kapseln, Fettcremetöpfe, Cremetuben, Schutzumschläge für Magazine und Zeitschriften; Sichtfenster für Papiertüten
- Biologisch abbaubare Polyester - (<i>franz. polyester biodégradable; engl. biodegradable polyesters</i>) - - Beispiele: Biolog. abbaubare Polyester - Polybutylensuccinat	PBS	- 23 - 31 %	- Polykondensation	- Erdölderivate ²⁾	- Verpackungs- und Schrumpffolien - Mulch und Gartenbaufolien - Schaumverpackungen	- PBS		
						- Showa Denko K.K	Bionolle 1000™ Starcla™	Bioabfallbeutel, Mulchfolie, geschäumte Verpackungen Mulchfolie
						- Zhejiang Hangzhou Xinfu Pharmaceutical Co., Ltd.	Biocosafe™	"
						- PTT MCC Biochem, Biotech	BioPBS™	"
						- PBAT		
						- BASF	ecovio® (Blend)	Compound für Folien aus BAK

- Polybutylenadipat-Terephthalat - Polycaprolacton	PBAT					- Jinhui Zhaolong	Ecoworld® Biodegradable Polymer	Compound für Folien aus BAK
	PCL					- PCL		
						- Albrecht Dinkelaker	Caprowax P	Folien, Textilsysteme, Knet-, Modellier- und Fugenmasse
						- Perstorp Holding AB	Capa	Taschen, Folien, feste Lebensmittelverpackungen, Trinkbecher, Beschichtung von Papier und Karton
Polyhydroxylalkanoat (franz. polyhydroxyl-alkanoate ; engl. polyhydroxyl-alkanoate)	PHA	6 -10 %	Mikrobielle Transformation	Zucker (aus Zuckerrüben, Zuckerrohr), Stärke (aus Mais, Weizen, Kartoffeln)	Verpackungen insbesondere für Lebensmittel	Tianjin GreenBio,	Sogreen™	Folien, geschäumte Verpackungen, Verpackungschips
						BIO-ON srl	MINERV-PHA™	Mikro-/Nanokunststoffe für Kosmetika, Medikamente; Konsumwaren (Spielzeug)
						Procter & Gamble	Nodax™	Folien, Schäume, Fasern
						Kaneka	KANEKA BIODEGRADABLE POLYMER PHBH™	Folien, Mulchfolien, Einweggeschirr
Celluloseregenerate/ Cellulosederivate (franz. cellulose régénérée/ dérivés de cellulose; engl. regenerated cellulose/ cellulose derivatives)	CA	4 %	Chemische Lösung oder Veresterung von Cellulose	Cellulose (aus Baumwolle, Hart- oder Weichholz)	Lebensmittelverpackungen	Innovia Films LTD / DOW,	NatureFlex™/ Biocellat®,	Flexible Cellulosefolie

¹⁾ Abbaubarkeit bezeichnet hier die Eigenschaft des jeweiligen Kunststoffes in Reinform (d.h. nicht als Bestandteil von Kunststoffen (Verbunde) oder in Produktform, incl. Additive) mikrobiell vollständig in Wasser, Kohlendioxid, Mineralien und Biomasse transformierbar zu sein

²⁾ Polyester können teilweise auch aus biobasierten Rohstoffen gewonnen werden; bislang hat die Herstellung aus regenerativen Rohstoffen keine wirtschaftliche Bedeutung

4. Abbauverhalten in natürlichen Milieus und technischen Anlagen zur Abfallbehandlung

Die Folgen der massiven Anreicherung von Plastik in vielen, unterschiedlichen Erscheinungsformen in allen natürlichen Ökosystemen und allen Kulturökosystemen der Erde sind Gegenstand intensiver Forschung. Während Auswirkungen beispielsweise auf marine Ökosysteme in Teilbereichen dokumentiert und bekannt sind, bedarf es zur Bestimmung und Abschätzung weiterer Risiken noch eingehenderer Untersuchungen. Die Gesellschaft ist angesichts der Dimension des Plastikverbrauchs und der Einträge in die Umwelt vor dem Hintergrund der damit verbundenen möglichen Folgen für Mensch und Umwelt gefordert, im Sinne einer nachhaltigen, zukunftssichernden Politik potenzielle Risiken im Umgang mit Plastik zu vermeiden und zu verringern.

Auf den ersten Blick bieten biologisch abbaubare Kunststoffe die Möglichkeit, bestimmte negative Auswirkungen konventioneller Kunststoffe zu vermeiden oder einzuschränken. Dies betrifft z.B. ihre namensgebende Eigenschaft „Abbaubarkeit“. Es liegt auf der Hand, dass Kunststoffe, die unter natürlichen Bedingungen, beispielsweise im Meer, schnell in ihre nicht schädlichen Ausgangsstoffe Wasser und Kohlendioxid zersetzt würden, das sichtbare Plastikproblem in den Ozeanen mit den Konsequenzen für die Meereslebewesen entschärfen könnte. Der Focus auf die Abbaubarkeit, die genau zu definieren und zu garantieren wäre, genügt jedoch nicht, um Kunststoffe umfassend ökologisch zu bewerten. Hierfür ist eine Analyse des gesamten Lebensweges eines Produktes, von der Gewinnung der Rohstoffe, über seine Herstellung, seine Nutzungsphase bis hin zu seiner Behandlung nach der Nutzung erforderlich. Die Ergebnisse einer solchen Lebenszyklusanalyse (Life cycle assessment = LCA), wie der aussagekräftigere englische Begriff für Ökobilanz lautet, können dann bewertet und mit alternativen Lösungsansätzen für die Plastikfrage verglichen werden.

Welche grundlegenden Aspekte bei der ökologischen Einschätzung von BAK u.a. zu berücksichtigen sind, beschreibt I. Fritz (*Ines Fritz, 2018*):

- Für BAK auf Mineralölbasis ist zu bedenken, dass eine organische Verwertung (Kompostierung) nach einmaliger Verwendung, bedenklich ist. Bei diesem (im Unterschied zum stofflichen Recycling) offenen Materialfluss wird fossiler Kohlenstoff in Kohlendioxid umgesetzt, ohne dass, wie bei einer thermischen Verwertung (wenigstens) die thermische Energie genutzt würde.
- Für BAK auf biogener Basis ist zu bedenken, dass die Gewinnung der aktuell gebräuchlichsten Rohstoffe (Zucker und Stärke) in direkter Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion steht²⁵.
- Für beide Fälle gilt, dass die Einmalverwendung von Kunststoffprodukten gleich welcher Herkunft die Rohstoffe sind, ökologisch problematisch ist. Das Design einer neuen Produktgeneration muss daher von Beginn an eine Mehrfachverwendung bzw. ein hochwertiges stofflich Recycling (kein Downcycling) vorsehen.

Die vorstehenden Bemerkungen zeigen die Bandbreite und Komplexität der Gesichtspunkte und Fragestellungen, die bei der ökologischen Einschätzung der BAK zu beachten sind. Dabei ist auch zu erkennen, dass eine Einschätzung nur temporär gültig ist, da sie von technischen und logistischen (z.B.

²⁵ Bei den gegenwärtigen Produktionsmengen stellt dies kein Problem dar; bei weitgehendem Ersatz konventioneller Kunststoffe durch biobasierte würde der Rohstoffbedarf enorm steigen; während dies im globalen Maßstab bezogen auf die Anbauflächen für nachwachsende Rohstoffe nach Einschätzung von (IfBB, 2018) keine gravierenden Auswirkungen hätte, sind nach Einschätzung des Autors viele weitere Faktoren zu berücksichtigen und zu bewerten (Art und Auswirkungen des Anbaus (Intensivierung), regionale Verwerfungen in der Landwirtschaft durch Spezialisierung, Konzentrationen, Entwicklung der Land- und Pachtpreise, Einsatz von Gentechnik), s. auch Punkt 7

Auf- und Ausbau von Abfallwirtschaftssystemen) Entwicklungen und politischen Rahmenbedingungen, die zudem besonders bei der Kunststoffthematik aktuell einer hohen Dynamik unterworfen sind, abhängt.

4.1 Abbauverhalten in der Natur

In der Natur ist eine Vielzahl von Tieren, Pflanzen, Pilzen und Mikroorganismen am Abbau von organischer Substanz beteiligt. Die Zusammensetzung dieser sogenannten Destruenten und ihr jeweiliger Anteil am Zersetzungsprozess variiert von Milieu zu Milieu. Am Ende der Abbaukette nehmen Mikroorganismen die wesentliche Rolle ein. Sie bauen die in vorhergehenden Stufen transformierte organische Substanz zu Kohlendioxid oder Methan, Wasser und Mineralien ab. Bei diesem Prozess gewinnen die Mikroorganismen Energie für ihre Vermehrung und die Erzeugung neuer Biomasse.

Grundsätzlich unterscheiden lassen sich zwei Arten des Abbaus. Der aerobe Abbau erfolgt, bei ausreichender Luftversorgung (Sauerstoff). Der anaerobe Abbau erfolgt unter Luftausschluss. Ein Beispiel für ein aerobes Milieu ist die obere humose Bodenschicht in Böden. Ein anaerobes Milieu liegt z.B. in der Schlammschicht von stehenden Gewässern vor.

Die aerobe Zersetzung weist die günstigere Energiebilanz auf, so dass sich die Mikroorganismen schnell vermehren und viel neue Biomasse (bis 40 % der ursprünglichen organischen Substanz) bilden können. Der anaerobe Abbauprozess erfolgt über mehrere Zwischenstufen und es werden nur 10 – 20 % des Substrates in Biomasse umgesetzt.

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 Bakterien aufgenommen werden. An der Hydrolyse sind Enzyme beteiligt, bei einigen Polymeren spielen auch chemisch-physikalische Vorgänge eine Rolle. In der Zelle werden die Fragmente weiter bis zur Mineralisierung abgebaut bzw. in neue Biomasse umgesetzt (Umweltbundesamt, Hrsg., 2018).

Enzyme kommen in der Natur nur in lebenden Zellen vor. Das heißt, dass ein enzymatischer (biochemischer) Abbau nur erfolgen kann, wenn die Bedingungen (Luft bzw. Luftausschluss, Wasser, Nährstoffe) günstig für das Überleben der Mikroorganismen sind. Beim chemisch-physikalischen Abbau sind abiotische Faktoren bestimmend. Sie bedingen ein Aufspalten der Polymerketten in kleinere Fragmente, die dann biochemisch zerlegt werden. Die wichtigsten abiotischen Faktoren sind Wasserstoff, Sauerstoff, Temperatur und Sonnenlicht (*Europäisches Komitee für Normung, 2009*). Weiter dürften mechanische Kräfte (Wellengang, Wind, Abrasion) von Bedeutung sein.

Die biologische Abbaubarkeit von Kunststoffen wird i.d.R. im Labor unter standardisierten Bedingungen beurteilt. Nur so sind die Reproduzierbarkeit und ein Vergleich der Ergebnisse gewährleistet. Die Resultate lassen aber nur eine beschränkte Aussage hinsichtlich des Abbauverhaltens unter natürlichen Bedingungen zu. Im Rahmen von Feldversuchen kann letztlich nur die Fragmentierung von Kunststoffen optisch (makroskopisch und ggf. mikroskopisch) über eine Oberflächenbestimmung und/oder über eine Massenbestimmung eingeschätzt werden. Chemisch-physikalische Parameter (wie Sauerstoffverbrauch, Messung der CO₂- oder Methan-Produktion), die zur Bestimmung des tatsächlichen Stofftransformation erforderlich sind nur im Labor möglich.

Das Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe im Auftrag des deutschen Umweltbundesamtes (*Umweltbundesamt, 2018*) enthält eine aktuelle Literaturlauswertung bezüglich durchgeführter Untersuchungen zur biologischen Abbaubarkeit von Kunststoffen unter natürlichen

Bedingungen. Im Wesentlichen beziehen sich die Angaben unter den Punkten 4.1.1 bis 4.1.3 auf diese Arbeit.

4.1.1 Abbau im Boden

4.1.1.1 In situ

Das Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe (Umweltbundesamt, Hrsg., 2018) verweist auf 11 Feldversuche verschiedener Autoren, bei denen zwischen 1999 und 2017 die Abbaubarkeit von verschiedenen Kunststoffen unterschiedlicher Dicke untersucht wurden.

Alle Versuche erfolgten nach einer eigenen, nicht standardisierten Methodik. Die Ergebnisse können deshalb nicht direkt miteinander verglichen werden. Dennoch ergeben sich Hinweise auf das Abbauverhalten der Kunststoffe im Boden in situ und den Einfluss unterschiedlicher Milieubedingungen.

Übersicht 7 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuche.

Übersicht 7: Ergebnisse von in situ-Abbauversuchen von BAK in Böden

Kunststoffart	Anzahl Versuche	Abbau	Mögliche Einflussfaktoren
PLA	4	sehr unterschiedlich; 0-100%; je höher Schichtdicke, desto (deutlich) schlechter der Abbau	-Witterungs- / Bodenbedingungen - weites Spektrum an PLA mit unterschiedlicher chemischer Grundstruktur
PHA (PHB, PHBV)	2	unterschiedlich 14 – 100 %	- Witterungs- / Bodenbedingungen - Zeit
Biopolyester (PBAT, PBS, PCL)	4	unterschiedlich 10 – 100 %	-Witterungs- / Bodenbedingungen
TPS (Stärkeblends)	5	sehr unterschiedlich	- Witterungs- / Bodenbedingungen
Cellulosebasiert	2	gut	-
Blend TPS/PCL	1	gut	-
Blend PBAT/PLA	1	Schlechter als Compounds	Chemische Struktur
Blend TPS/Biopolyester	1	gut	-

Aus den Resultaten können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden, die im Rahmen weiterer Untersuchungen für die spezifischen Bedingungen in Luxemburg verifiziert und im Hinblick auf den Einfluss der standortabhängigen Rahmenbedingungen präzisiert werden könnten:

- Das Abbauverhalten von BAK hängt von den Bodeneigenschaften ab. Die Bodeneigenschaften werden durch ein komplexes Wirkungsgefüge von Parametern, wie Bodenart, Edaphon²⁶, Humusgehalt, Bewirtschaftungsweise, Kulturart etc. bestimmt. Die ausgewerteten Informationen lassen zwar einen deutlichen Einfluss der Bodeneigenschaften erkennen, enthalten aber keine detaillierten Angaben zu den Böden an den einzelnen Versuchsstandorten. So können keine

²⁶ Edaphon bezeichnet die Gesamtheit der im Boden lebenden Organismen (=Bodenlebewesen)

generellen Rückschlüsse auf die Rolle der Faktoren (z.B. Bodenart, Gründigkeit, Dichte, Humusversorgung), die die Bodeneigenschaften bestimmen, gezogen werden. Die Versuche zeigen allerdings, dass neben der Feuchtigkeit und der Temperatur im Boden auch der pH-Wert Einfluss zu haben scheint.

- Das Abbauverhalten von BAK hängt von Witterungs- bzw. klimatischen Einflüssen ab. Die Versuche legen nahe, dass vor allem ausreichender Niederschlag (Bodenfeuchtigkeit) und die Temperatur (Bodentemperatur) einen großen Einfluss auf die Abbaubarkeit haben.
- Die Schichtstärke der Kunststoffe beeinflusst deutlich die Abbaudauer. Je dicker sie ist, desto langsamer erfolgt der Abbau.
- Dass bestimmte Kunststoffarten gleichen Typs in verschiedenen Untersuchungen sehr unterschiedlich schnell und umfangreich abgebaut werden, könnte auf die spezifischen Rahmenbedingungen der Versuche zurückgeführt werden. Allerdings erscheint es angesichts teilweise sehr unterschiedlicher Ergebnisse auch denkbar, dass die chemische Struktur von Unterarten der gleichen Kunststofftypen eine Rolle spielt. Große Differenzen ergaben sich in den Freilandversuchen vor allem bei Folien aus PLA. PLA-Granulate werden von etlichen Herstellern angeboten und als Grundstoff zur Folienherstellung genutzt. Die Werkstoffproduzenten wiederum bieten ihre PLA-Variation oft unter einem Markennamen in vielen weiteren Unterformen mit jeweils spezifischen Eigenschaften an. Der PLA-Kunststoff Ingeo™ der Firma Nature Works ist so in 33 verschiedenen Varianten als Grundstoff verfügbar. Diese sind teilweise biologisch abbaubar und teilweise nicht. Nature Works weist auf seinen Internetseiten daraufhin, dass jedes Produkt, das aus Ingeo™ hergestellt wird, in einem eigenen Testverfahren auf seine Kompostierbarkeit geprüft werden muss, wenn es zertifiziert werden soll.

Nähere Angaben zum bei den Untersuchungen verwendeten Kunststofftyp (Markenname, ggf. Additive) fehlen in der herangezogenen Quelle.

4.1.1.2 Im Labor

Bei Laboruntersuchungen wird die grundsätzliche Abbaubarkeit von BAK unter definierten Bedingungen untersucht. Die Ergebnisse lassen keine allgemeinen Aussagen zum tatsächlichen Abbauverhalten in Böden unter gegebenen Standortbedingungen zu. Der Nachweis der Abbaubarkeit im Labor zeigt lediglich, dass natürlich vorkommende Vergesellschaftungen von Mikroorganismen (bzw. deren Enzyme) zur Zersetzung und Mineralisierung in der Lage sind. Sie lassen aber keine Rückschlüsse zur Abbaukinetik in situ zu.

Bei den Labortests lassen sich grundsätzlich Mineralisierungs- und Desintegrationsprüfungen unterscheiden. Bei Mineralisierungsprüfungen wird meistens die Produktion von Kohlendioxid oder der Verbrauch von Sauerstoff, der eng mit der Kohlendioxidproduktion beim Abbau der BAK zusammenhängt, gemessen. Bei Desintegrationsprüfungen wird lediglich der optische Zerfall der BAK untersucht²⁷.

Prüfverfahren sind seit den 1990er Jahren etabliert und unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Inkubationstemperatur. Parallel werden bei den Labortests immer Referenzversuche ohne Prüfmaterial und mit gut abbaubaren Polymeren durchgeführt, um die Funktionstüchtigkeit des Testverfahrens (z.B. bezüglich der Aktivität der Mikroorganismen) zu dokumentieren. Bei den Versuchen werden einerseits zwar optimale Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffversorgung) eingestellt, andererseits ist das Verhältnis zwischen dem unspezifischen

²⁷ Definition Desintegration bei der Prüfung der Kompostierbarkeit: physikalische Fragmentierung und Verlust der Sichtbarkeit im Kompostendprodukt gemessen in einer Pilot-Kompostieranlage (EN 14045).

Inokulum²⁸ und dem Prüfmaterial recht hoch, so dass die Tests stringent sind und Aussagen zur prinzipiellen Abbaubarkeit des Materials liefern (*Umweltbundesamt, 2018*).

Bezüglich der biologischen Abbaubarkeit im Boden besteht laut (*Umweltbundesamt, 2018*) aktuell eine Europäische Norm. Diese EN 17033²⁹ betrifft ausschließlich Mulchfolien für die Landwirtschaft und den Gartenbau. Demnach gelten Mulchfolien als im Boden bioabbaubar, wenn sie nach 24 Monaten zu mindestens 90% zersetzt sind oder einen Wert von mind. 90 % des Abbaubarkeitsgrades einer geeigneten Referenzsubstanz (z.B. mikrokristalline Zellulose) erreichen. Neben der biologischen Abbaubarkeit enthält die Norm Vorgaben hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung der BAK (z.B. Schwermetallgehalt), hinsichtlich ihrer Ökotoxizität (gegenüber Pflanzen, Wirbellosen und Mikroorganismen) sowie hinsichtlich bestimmter physikalischer Eigenschaften (Douglas G. Hayes, Markus Flury, 2018). Da die Norm erst im März 2018 veröffentlicht wurde, lagen zum Zeitpunkt der Datenrecherche zu diesem Bericht noch keine Informationen zu Produkten vor, die nach diesem Regelwerk zertifiziert worden wären. DIN CERTCO³⁰ bietet eine entsprechende Zertifizierung an.

Neben der Zertifizierung entsprechend der Norm für Mulchfolien, bieten folgende Organisationen eigene Zertifizierungen bzw. Prüfungen für den biologischen Abbau im Boden an:

- TÜV-Austria, Zertifikat "OK biodegradable SOIL": die Prüfung lehnt sich an den technischen Bericht DIN Kunststoffe - Bioabbaubare Kunststoffe in oder auf Böden- Verwertung, Entsorgung und verwandte Umweltthemen an; der im Mai 2010 veröffentlichte Bericht war vorgesehen, den aktuellen Wissensstand und die Erfahrung im Bereich bioabbaubarer Kunststoffe, die auf Böden verwendet werden oder in diese gelangen, zusammenzufassen und sollte die Grundlage für die Erarbeitung zukünftiger Normen schaffen; die Kriterien für den Nachweis der biologischen Abbaubarkeit entsprechen weitgehend denen der Norm EN 17033. Das Zertifikat wird für Rohmaterialien, Zwischenprodukte und Endprodukte vergeben (TÜV AUSTRIA, 2018);
- ASTM International hat eine Testmethode zur Prüfung der Bioabbaubarkeit von Kunststoffen in Böden entwickelt. Das Verfahren führt zu keiner Zertifizierung. ASTM weist ausdrücklich darauf hin, dass Testergebnisse nicht genutzt werden sollen, um die unqualifizierte Eigenschaft „bioabbaubar“ für ein Produkt zu beanspruchen, sondern dass nur die genaue numerische Angabe der Testergebnisse (CO₂-Produktion der Probe und des Referenzmaterials) zulässig ist (*ASTM International, 2018*).
- Die italienische Organisation für Normierung hat ebenfalls eine Testmethode für die biologische Abbaubarkeit in Böden entwickelt³¹.

In (*Umweltbundesamt, 2018*) sind die Ergebnisse von 11 Laborversuchen zum Abbau von BAK im Boden aufgelistet, ohne die exakte Testmethode zu bezeichnen. Dies und die Tatsache, dass verschiedene Arten (Marken, Schichtdicken) von BAK untersucht wurden, das Artengefüge im Inokulum nicht gleich ist und die Versuchsdauer unterschiedlich war, schränkt die Vergleichbarkeit der teilweise deutlich verschiedenen Ergebnisse ein.

²⁸ Inokulum = Impfkultur, Menge einer Reinkultur von Mikroorganismen, die zur Auf- und Weiterzucht verwendet werden (<https://www.duden.de/rechtschreibung/Inokulum>); die Mikroorganismen sind unspezifisch, da sie der Natur entnommen und ihre Eignung zur Zersetzung von BAK nicht bekannt ist; das Verhältnis zwischen Inokulum und Substrat für Abbauprobe im Boden beträgt 0,1 % (Masse) und ist damit geringer als unter natürlichen Bedingungen

²⁹ Kunststoffe - Biologisch abbaubare Mulchfolien für den Einsatz in Landwirtschaft und Gartenbau - Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 17033:2018

³⁰ ASTM D5988 – 18: Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in Soil

³¹ Uniente italiano di normazione: UNI 11462, 18.10.2012

Die Resultate lassen aber für die verschiedenen Kunststoffe ähnliche Tendenzen wie bei den Feldversuchen (Punkt 4.1.1) erkennen.

Demnach lassen sich die verschiedenen BAK hinsichtlich ihrem Abbauverhalten im Boden wie folgt einordnen:

Übersicht 8: Abbaubarkeit verschiedener BAK im Boden (Laborversuche)

Abbaubarkeit	Kunststoff (Grundstoff)
Gut	PHA, Biopolyester (PBAT, PBS), Cellulose
Mittel	Biopolyester (PCL)
Schlecht	PLA

4.1.2 Abbau im Süßwasser

4.1.2.1 In situ

Die Literaturrecherche im Rahmen der Studie des Umweltbundesamtes (*Umweltbundesamt, 2018*) konnte nur wenige Publikationen zum Thema ausfindig machen.

Die meisten zitierten Veröffentlichungen untersuchten das Abbauverhalten von PHA-Kunststoffen. Bei zwei Versuchen in stehenden Gewässern, einem natürlichen See in der Schweiz und einem Stausee in Russland, wurde eine gute Abbaubarkeit der Folien aus PHA nachgewiesen. Diese wurden bei dem Versuch in der Schweiz (Luganer See) in unterschiedlichen Wassertiefen (0-85 m) bei unterschiedlichen chemisch-physikalischen Bedingungen (6 -20 °C, oxisch im Pelagial bis anoxisch auf dem Sediment) platziert und innerhalb von 254 Tagen vollständig abgebaut. Ebenfalls eingebrachte Shampoo-Flaschen) wurden wesentlich langsamer abgebaut. Ihr Zersetzungsgrad lag zwischen 10 (85 Meter Tiefe) und 16 % (20 m Tiefe).

Ein Versuch in den USA untersuchte das Verhalten von PHA-Kunststoff (PHBHV) mit einer großen Schichtdicke im Belebungsbecken einer Kläranlage. Bei Wassertemperaturen von 18 – 20 °C wurde der Kunststoff in fünf Monaten zu 50 % zersetzt. Bei höheren Temperaturen während der Sommermonate waren die Proben schon nach 90 Tagen vollständig desintegriert.

Der Abbau von bioabbaubaren Biopolyestern wurde in Japan in einem Fluss untersucht. Dabei konnte eine Zersetzung der Proben von 90 % in 180 bis 200 Tagen festgestellt werden, wobei Unterschiede zwischen Kunststoffen gleichen Markennamens und gleicher Schichtdicke, die sich chemisch unterschieden, auftraten. Die Zersetzung der gleichen Kunststoffe im Meer war deutlich geringer.

Die Desintegration vom TPS-Kunststofftüten (MaterBI®) wurde in einer Süßwasserlagune (1m Wassertiefe) und im offenen Meer (20 m Wassertiefe) in der Adria untersucht. Nach drei Monaten betrug die Abbaurate in der Lagune 1,5 und im Meer 4,5 %.

Die wenigen gefundenen Angaben zu Abbauversuchen im Süßwassermilieu lassen den Rückschluss zu, dass PHA und bioabbaubare Polyester sich relativ gut zersetzen. Über evtl. verbleibende Rückstände in Form von Mikroplastik und deren Verhalten liegen bei den In situ-Versuchen naturgemäß keine Angaben vor. Die Versuche in einem Fluss in Japan (gemäßigtes Klima) und in den oberen Wasserschichten eines Binnensees in der Schweiz ähneln am ehesten in Luxemburg anzutreffenden Bedingungen, so dass vermutet werden kann, dass die dort feststellbaren Tendenzen auch für das Großherzogtum gelten. Allerdings sei nochmals auf die große Varianz möglicher Einflussfaktoren (Art und Wandstärke des Kunststoffes, Wasserchemie, Witterungseinflüsse etc.) verwiesen, die die Abbaubarkeit bestimmen. Im Endeffekt sind weitere Untersuchungen erforderlich und auszuwerten,

um hinreichend belastbare Aussagen zum Verhalten von spezifischen BAK unter spezifisch luxemburgischen Bedingungen zu erlangen.

4.1.2.2 Laborversuche

Im wässrigen Milieu haben verschiedene Kunststoffe deutlich schnellere Abbauzeiten als im Boden. Die ausgewerteten Laboruntersuchungen fanden bei Wassertemperaturen zwischen 20 und 25°C statt. Bezüglich des Vergleichs der Ergebnisse gelten die gleichen Einschränkungen die bei der Beschreibung des Abbauverhaltens im Boden (Punkt 4.1.1.2) angeführt wurden.

Ähnlich wie bei den Bodenversuchen sind, allerdings in einer kürzeren Zeit (< 3 Monate), hohe Abbauraten bei PHA- und Cellulose-basierten Kunststoffen und einem Teil der Biopolyester zu beobachten. Relativ schlechtere Raten sind beim Biopolyester PCL und bei PLA zu beobachten. Im Unterschied zum Boden baut sich das Biopolyester PBAT im Süßwasser im Vergleich zu den anderen BAK langsamer ab. In einem Versuch wurde gezeigt, dass die Abbaubarkeit des untersuchten PLA-Typs deutlich von der Wassertemperatur abhängt, wobei allerdings mit 55 – 60°C Temperaturen eingestellt wurden, die in der Natur kaum erreicht werden.

Die zitierten Versuche prüften keine reinen Stärkeblends (TPS) sondern nur verschiedene Blends von TPS und anderen BAK. Die Zersetzungsgrad lag zwischen 90 % (55 Tage) und ca. 43 % (28 Tage).

4.1.3 Abbau im Meer

4.1.3.1 In situ

Als Ergebnis der Recherche (*Umweltbundesamt, 2018*) 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. Die Prüfung gleicher Kunststoffe im Rahmen verschiedener Untersuchungen erbrachte allerdings deutliche Unterschiede. So wurde im Hafen von Plymouth eine 0,6 m unter der Wasseroberfläche eingebrachte Mater-Bi-Folie in 16 Wochen vollständig abgebaut. An der Küste von Elba wurden ebenfalls Mater-Bi-Folien in 25 m Tiefe und am Meeresgrund (36 m) geprüft, wobei diese nach einem Jahr zu etwa 60 % bzw. 25 % zersetzt waren.

Bei synthetischen Polyestern wie PBS und PBAT findet auch eine Zersetzung statt, allerdings wesentlich langsamer.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse zur Zersetzung im Meer unter natürlichen Bedingungen die gleichen Abbautendenzen bei den Kunststoffen, die auch in Laboruntersuchungen in Meerwasser gefunden wurden. Gleichzeitig zeigen sie jedoch, dass eine genaue „Vorhersage“ etwa in Form von „Abbauraten pro Zeiteinheit und Meeresregion“ nicht möglich ist, da sie von zu vielen Umweltparametern abhängig ist.

4.1.3.2 Laborversuche

Im Meerwasser ist bei den verschiedenen BAK ein ähnliches Abbauverhalten wie im Boden bzw. im Süßwasser zu beobachten. Relativ gut abbaubar sind PHA-Kunststoffe, stärkebasierte Kunststoffe (Mater-Bi®) und PCL. Langsamer abgebaut werden die Polyester PBS und PBAT sowie PLA.

4.1.4 Abbauverhalten in Anlagen der Abfallverwertung und -entsorgung

Als ein wesentlicher Vorteil wird von Herstellern die Kompostierungsfähigkeit der BAK angeführt. Aufgrund dieser Eigenschaft könnten BAK, z.B. zusammen mit den organischen Abfällen, verwertet werden. Sammelbeutel für Bioabfall aus abbaubarem Kunststoff wären so im Bioabfallstrom kein Störstoff mehr. Eine solche Argumentation lässt allerdings andere Aspekte, die für die Ermittlung des ökologischen Fußabdrucks von Bedeutung sind, außer Acht. Neben der Abbaubarkeit sind so bei der Kompostierung oder Vergärung auch die Auswirkungen auf den allgemeinen Störstoffgehalt oder wertgebenden Eigenschaften der Komposte oder Gärsubstrate zu beachten.

4.1.4.1 Kompostierungsanlagen

Es bestehen verschiedene Zertifizierungssysteme für den Nachweis der Kompostierbarkeit von BAK in industriellen Kompostierungsanlagen, wobei der Begriff industriell hier als wenig präzise angesehen wird. Besser wäre es von zentraler, geregelter Kompostierung zu sprechen, denn auch Anlagen mit relativ geringer jährlicher Durchsatzleistung, z.B. kommunale Anlagen mit deutlich unter 1.000 Tonnen, betreiben eine solche Art der Kompostierung. In solchen Anlagen werden mit Hilfe technischer Mittel optimale Abbaubedingungen für organische Abfälle eingestellt, so dass die Abbauphase (Rottezeit) wesentlich kürzer ist als in der Natur oder bei der Heimkompostierung. Gesteuert werden, z.B. die Luftzufuhr, die Feuchtigkeit des Rottegutes und die Nährstoffverhältnisse.

Normen für die Bestimmung der Eigenschaft der Kompostierbarkeit in industriellen (zentralen) Kompostierungsanlagen sind:

- DIN EN 13432 „Verpackung – Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau ...“
- DIN EN 14995 „Kunststoffe – Bewertung der Kompostierbarkeit“
- ISO 17088 „Festlegungen für kompostierbare Kunststoffe“
- ISO 18606 „Verpackung und Umwelt - Biologische Verwertung“
- Internationale Norm ASTM D 6400 „Standard Specification for Compostable Plastics“
- AS 4736 „ Biodegradable plastics—Biodegradable plastics suitable for composting and other microbial treatment“

Alle genannten Normen geben einen Mindestabbaugrad von 90 %³² vor. Dieser muss nach längstens sechs Monaten erreicht sein. Zusätzlich ist eine Desintegration von 90 % innerhalb von 12 Wochen vorgeschrieben.

Die Zertifizierungssysteme für die industrielle (zentrale) Kompostierbarkeit wurden auf Basis der genannten Normen entwickelt. Übersicht 9 listet die in Europa bestehenden Systeme auf.

³² Bezogen auf das Prüfmaterial selbst oder die Abbaurrate eines geeigneten Referenzmaterials

Übersicht 9: Zertifizierung der industriellen Kompostierbarkeit von biologisch abbaubaren Kunststoffen in Europa

Norm	Marken-inhaber	Zertifizierung	Logo	Anforderungen
EN 13432 / EN 14995	European Bioplastics	“Seedling” industrial compostability label		<ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung geforderter max. Konzentrationen an Schwermetallen und Fluor • Vollständige biologische Abbaubarkeit; Anforderung: 90 % Abbau (absolut oder bezogen auf Referenzsubstrat) innerhalb max. 6 Monaten (bei 58 ± 2°C)
EN 13432	DIN CERTCO	Industriell kompostierbar		<ul style="list-style-type: none"> • Zersetzung im Bioabfall nach höchstens 3 Monaten (Desintegrationstest); Anforderung: max. 10 % Restpartikel des Prüfmaterials > 2 mm • Keimungstest mit dem Kompost; die Keimungsrate und die Biomasse zweier Testpflanzenarten müssen > 90 % der Ergebnisse mit dem Blindwertkompost¹⁾ sein²⁾
	TÜV Austria (vormals Vinçotte)	TÜV-Austria ok compost		
	CIC	Italian Composting Association (CIC) together with Certiquality		
SPCR 141 - Certification rules for Classification for treatment of polymeric waste	SP Technical Research Institute of Sweden (RISE)	SP Technical Research Institute of Sweden (RISE), industrial composting		Gleiche Anforderungen wie die Zertifizierung nach EN 13432 und EN 14995; zusätzlich wird die Funktionalität getesteter Produkte geprüft

¹⁾ Kompost, der aus einem parallelen Ansatz ohne Prüfsubstanz stammt

²⁾ Das Zertifizierungsprogramm von DIN Certco kann auf Wunsch zusätzlich mit den Normen AS 4736, DIN EN 14995, ISO 17088, ISO 18606 kombiniert werden; dann ergeben sich folgende zusätzliche Anforderungen: Regen wurmtest (AS 4736): Überlebensrate und Gewicht der Regenwürmer im Kompost > 90 % der Überlebensrate im Blindwertkompost; Organische Zusatzstoffe (ISO 18606 und ISO 17088): bei einem Anteil von > 1 % Massenanteil ist deren vollständige biologische Abbaubarkeit gesondert nachzuweisen; bei Anwendung der AS 4736 ist zusätzlich der Nachweis der vollständigen biologischen Abbaubarkeit des spezifischen organischen Zusatzstoffes (als Produkt) zu erbringen.

Quellen: (DIN CERTCO, 2016) (TÜV AUSTRIA, 2012) (SP Technical Research Institute of Sweden, 2010)

Eine umfassende Auflistung der Produkte und Materialien, die geprüft und industriell kompostierbar sind konnte im Rahmen dieses Berichtes nicht zusammengestellt werden.

Bezüglich der beiden größten Zertifizierer DIN Certco und TÜV AUSTRIA (Vorgängergesellschaft Vinçotte), die jeweils sowohl eigene Prüflabels für industriell kompostierbare Materialien und Produkte vergeben als auch die Test- und Nachweisverfahren für das Seedling-Label von European Bioplastics durchführen, konnten folgende Informationen recherchiert werden:

- DIN Certco

DIN CERTCO listet auf seinen Internetseiten die erfolgten Zertifizierungen sowohl zur Vergabe des Seedling-Labels von European Bioplastics als auch zur Vergabe des eigenen Labels „industriell kompostierbar“ auf. Folgende Übersicht enthält einen Überblick zu den Zertifizierungen.

Übersicht 10: Von DIN Certco zertifizierte industriell kompostierbare Kunststoffe und aus ihnen hergestellte Produkte¹⁾

Geprüfte	Zertifikat					
	Seedling-Label (EUBP)			DIN Certco		
Material-/ Produkt- gruppe	Labelinhaber (Hersteller)	Materialien/ Produkte	Marken	Labelinhaber (Hersteller)	Materialien/ Produkte	Marken
Werkstoffe	75	148	84	33	24	26
Halbzeuge ²⁾	34	55	43	11	8	10
Produkte	237	321	-	77	59	-

¹⁾ Zur Zusammenstellung der Daten wurden die auf der Internetseite von DIN Certco veröffentlichten Informationen (November 2018) ausgewertet; berücksichtigt wurden nur die Zertifikate, die eindeutig einem biologisch abbaubaren Kunststoff oder einem Produkt aus diesem zugeordnet werden konnte; neben Kunststoffen wurden beispielsweise auch Produkte aus Pappe/Karton oder Naturfasern nach dem Prüfverfahren zertifiziert

²⁾ Halbzeuge sind vorgefertigte Rohmaterialformen; z.B. Blöcke und Platten, Rund- und Hohlstäbe, Folien und Rollenware; von Din Certco wurden, soweit in den Listen mit zertifizierten Halbzeugen deren Art angegeben war ausschließlich Folien getestet

Aus den bei DIN Certco einsehbaren Daten, lässt sich nur zum Teil die Art der geprüften Kunststoffe erkennen. Z.T. ist eine Zuordnung über die Markennamen möglich. Dennoch kann festgestellt werden, dass für alle fünf Haupttypen von BAK (s Punkt 3.6) entweder für die Kunststoffe selbst (Werkstoff oder Halbzeug) oder Produkte aus ihnen Zertifizierungen für die industrielle Kompostierbarkeit vergeben wurden.

Die Verteilungen der zertifizierten Produkte nach Produktkategorien ist Übersicht 11 zu entnehmen. Mit Abstand finden sich die meisten Produkte in der Kategorie Beutel/Taschen/Säcke (111 von 237 Produkten).

Übersicht 11: Von DIN Certco zertifizierte industriell kompostierbare Produkte nach Produktkategorien

Produktkategorie	Anzahl	Anmerkung
Abfall-/Bioabfallbeutel	66	
Beutel / Taschen	55	für Lebensmittel und Non-Food-Waren, Versandtaschen
Becher / Tassen	48	
Geschirr	40	Einweg- und Mehrweggeschirr
Besteck	24	
Folie	19	Folien für Lebensmittel und Non-Food-Waren, Mulchfolie
Deckel	15	für Trinkgefäße und Schalen
Trinkhalme	11	
Lebensmittelverpackung	8	nicht näher spezifiziert
Kaffeekapsel	7	
Einmalhandschuhe	3	
Klebeetiketten	3	
Verpackungen, non food	3	nicht näher spezifiziert
Sonstiges	19	Beispiele: Eierkarton, Tischdecke, Schürze, Netz, Umreifungsband, Pflanztopf, Verpackungschips

- TÜV AUSTRIA (Vinçotte)

Bezüglich der von Vinçotte bis 2017 zertifizierten Kunststoffe findet sich im Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe (Umweltbundesamt, 2018) eine Auflistung. Auf der Internetseite von TÜV-Austria, der Organisation, die seit Ende 2017 das ok kompost-Label von Vinçotte übernommen hat und die Zertifizierungen durchführt, findet sich unter Hinweis auf Datenschutzbestimmungen keine aktuellere Auflistung.

Auf der erwähnten Liste von 2017 sind 14 Kunststoffarten (Marken), die das TÜV-AUSTRIA Label tragen dürfen, verzeichnet. Ihre Zuordnung nach Polymerart und Markenbezeichnung zeigt Übersicht 12. Ob und wie viele biologisch abbaubare Werkstoffe oder Produkte von Vinçotte bzw. TÜV Austria für das Seedling-Label von European Bioplastics geprüft wurden, geht aus der genannten Quelle nicht hervor.

Übersicht 12: Kunststoffe, die von Vinçotte als industriell kompostierbar zertifiziert wurden

Polymerart der Produkte	Anzahl der Produkte	Anzahl der Marken	Schichtdicke ¹⁾ [µm]
Stärke-Blend	4	2 (BIOPLAST, Mater-Bi)	100 - 250
PHA	5	5 (AOINLEX, MIREL, RWDC PHA Copolymer, DaniMer, Meridian)	90 – 690
PBS (Biopolyester)	4	4 (BioPBS FD92, GS PLA FD 92, BIONOLLE, BIONOLLE STARCLA)	87 – 129
PBAT/PLA Blend	1	1 (ecovio®)	249

¹⁾ maximale Schichtdicke; die verschiedenen maximale Schichtdicke; die verschiedenen Produkte wurden teilweise für mehrere Schichtdicken und unterschiedliche Anwendungen zertifiziert

Aus den recherchierten Informationen zu den Zertifizierungssystemen „Industrielle Kompostierung“ von DIN Certco und TÜV Austria (vormals Vinçotte) lassen sich folgende Rückschlüsse ziehen:

- Kunststoffe bzw. aus ihnen hergestellte Produkte aus allen fünf hier näher betrachteten BAK-Hauptgruppen wurden zertifiziert;
- die Schichtstärke der Materialien hat einen großen Einfluss darauf, ob ein Material oder Produkt die Kriterien der industriellen Kompostierbarkeit gemäß den Zertifizierungssystemen erfüllt; ein Werkstoff erhält also nicht als solcher das Zertifikat, sondern in Abhängigkeit seiner Kompaktheit und Wandstärke;
- die meisten geprüften und gelabelten Produkte sind in der Kategorie Folien und aus ihnen hergestellte Beutel, Taschen und Säcke zu finden, nach der Anzahl zweitwichtigste Produktkategorie ist Geschirr (Trinkgefäße, Teller, Schalen, Besteck). Produkte für andere Verwendungszwecke sind im Vergleich noch selten zu finden;
- bei vielen Kunststoffarten (Marken) gelten die Zertifizierungen für mehrere Untertypen, die einen gleichen Markennamen tragen.

Letzterer Aspekt bedeutet, dass die Zertifizierung sich im Allgemeinen nicht auf einen Werkstoff oder eine Produktgruppe eines Herstellers, sondern auf einen genau spezifizierten Untertyp (mit exakt definierten spezifizierten Eigenschaften, wie Schichtstärke, Art und Anteil von Additiven oder Compounds, Mischungsverhältnis bei Blends) bezieht.

Das Abbauverhalten der BAK in Kompostierungsanlagen unter Praxisbedingungen hängt von einer Vielzahl von Rahmenbedingungen ab. Einflussgrößen sind u.a. die Zusammensetzung des Rottegutes, die Kompostierungstechnik, die Art und Dicke des Kunststoffes und die Rottedauer. Es wird an dieser Stelle darauf verzichtet, die Resultate verschiedener, einzelner Kompostierungsversuche wiederzugeben.

Es lässt sich aber festhalten, dass die im Gutachten zur Behandlung von biologisch abbaubaren Kunststoffen des deutschen Umweltbundesamtes angeführten Untersuchungen für alle gängigen biologisch abbaubaren Polymere prinzipiell einen, zumindest teilweisen, Abbau unter thermophilen Bedingungen in Kompostierungsanlagen feststellten. Abbaugrad und Untersuchungsdauer variierten jedoch erheblich. Vollständiger Abbau gemäß EN 13432 (= > 90 % bezogen auf das Prüfmaterial selbst oder einen Referenzstoff) konnte in 12 von 20 Untersuchungen innerhalb des spezifischen Untersuchungszeitraums belegt werden.

Zur Aussagekraft der Zertifizierung bei BAK im Hinblick auf das Abbauverhalten in der Praxis sei auf folgende Punkte hingewiesen:

- Die Testdauer der Prüfverfahren zur Desintegration der Kunststoffe beträgt 12 Wochen. Während in Luxemburg die zwei Kompostierungsanlagen, die Bioabfälle direkt ohne Vorbehandlung verarbeiten i.d.R. eine entsprechende Mindestrottezeit erreichen, ist dies bei vielen Anlagen im Ausland nicht der Fall. Die luxemburgische Anlage, die Gärreste aus der Vergärung von Bioabfällen, kompostiert hat eine Rottezeit von 3 Wochen (Minett Kompost, 2018).
- Die Testdauer für den anhand des Sauerstoffverbrauchs und/oder der Kohlendioxidproduktion bestimmten fermentativen Abbau beträgt bei Zertifizierungssystemen 6 Monate. Nach eigenen Beobachtungen betragen die Rottezeiten in den luxemburgischen Anlagen, die nicht vorbehandelte organische Abfälle kompostieren, 3 bis 4 Monate, Die Anlage, die Gärreste aus der Fermentation von Bioabfällen kompostiert, gibt eine Kompostierungsdauer von 3 Wochen und eine Vergärungsdauer von ebenfalls 3 Wochen an.
- Soweit die Zertifizierung sich nach Vorgaben der Norm EN 13432 richtet, müssen die geprüften BAK nur zu 90 % in den genannten Fristen desintegriert bzw. abgebaut werden. Dies bedeutet

theoretisch, dass nach Zersetzung der BAK noch bis zu 10 % nicht abbaubare Kunststoffbruchstücke oder Additive im Kompost zurückbleiben können.

4.1.4.2 Gartenkompostierung

Für die Heim- oder Gartenkompostierung unter Umgebungsbedingungen bestehen, wie für die industrielle Kompostierbarkeit, Zertifizierungssysteme. Im Unterschied zu der Zertifizierung von industriell kompostierbaren Kunststoffen beträgt die Testdauer 12 statt 6 Monaten.

Übersicht 13: Zertifizierung der Heim- oder Gartenkompostierbarkeit von biologisch abbaubaren Kunststoffen in Europa

Norm	Marken-inhaber	Zertifizierung	Logo	Anforderungen
AS 5810 - Biodegradable plastics— Biodegradable plastics suitable for home composting und NF T51-800 -Plastiques - Spécifications pour les plastiques aptes au compostage domestique	DIN CERTCO	Produkte aus kompostierbaren Werkstoffen für die Heim- und Gartenkompostierung		<ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung geforderter max. Konzentrationen an Schwermetallen • Vollständige biologische Abbaubarkeit; Anforderung: 90 % Abbau (absolut oder bezogen auf Referenzsubstrat) innerhalb von max. 12 Monaten unter 30 °C • Zersetzung im Bioabfall nach höchstens 180 Tagen (Desintegrationstest); Anforderung: max. 10 % Restpartikel des Prüfmaterials > 2 mm bei 25 ± 5 °C • Keimungstest mit dem Kompost; die Keimungsrate und die Biomasse zweier Testpflanzenarten müssen > 90 % der Ergebnisse mit dem Blindwertkompost sein
Anpasste EN 13432 und EN 14995	TÜV Austria (vormals Vinçotte)	TÜV-Austria, ok home compost		<ul style="list-style-type: none"> • Keimungstest mit dem Kompost; die Keimungsrate und die Biomasse zweier Testpflanzenarten müssen > 90 % der Ergebnisse mit dem Blindwertkompost sein
SPCR 141 - Certification rules for Classification for treatment of polymeric waste	SP Technical Research Institute of Sweden (RISE)	SP Technical Research Institute of Sweden (RISE), small scale composting		Gleiche Anforderungen wie die obigen Zertifizierungsprogramme außer das Zeitraum für die Prüfung der vollständigen Abbaubarkeit 6 Monate beträgt; Zusätzlich wird die Funktionalität des Produktes geprüft

¹⁾ bei AS 5810 weiterhin: Regenwurmtest: Anforderung: Überlebensrate und Gewicht der Regenwürmer im Kompost > 90 % der Überlebensrate im Blindwertkompost

²⁾ die Kunststoffe dürfen nach NF T 51-800 keine endokrinen Disruptoren oder diejenigen krebserregenden, mutagenen oder reproduktionsschädigenden Substanzen enthalten, die auf der Kandidatenliste der besonders besorgniserregenden Stoffe gemäß Artikel 59(10) der EU -Regulierung No. 1907/2006 gelistet sind

Quellen: (DIN CERTCO, 2016) (TÜV AUSTRIA, 2012) (SP Technical Research Institute of Sweden , 2010)

Eine umfassende Übersicht über Produkte, die im Rahmen der genannten Zertifizierungsprogramme geprüft worden sind und die Anforderungen erfüllten, konnte im Rahmen der Recherche nicht erstellt werden.

Folgende Informationen konnten über die Prüfung der Gartenkompostierbarkeit von BAK und den Stand der Zertifizierungen durch DIN Certco und TÜV AUSTRIA (Vorgängergesellschaft Vinçotte) recherchiert werden:

- DIN Certco

Von DIN Certco wurden nach Angaben auf seinen Internetseiten bislang drei Kunststoffwerkstoffe als gartenkompostierbar zertifiziert. Ein Werkstoff besteht aus PBAT und einer aus PBAT als Hauptkomponente mit Anteilen von Stärkeblends und PLA. Zum dritten zertifizierten Werkstoff konnten keine Angaben zur Kunststoffart ermittelt werden. Alle drei Werkstoffe werden zur Herstellung von Folien, Beuteln und Taschen verwendet.

Bei den zertifizierten vier Produkten aus BAK handelt es sich ausschließlich um Beutel, Taschen und Folienverpackung. Sie bestehen aus Blends aus Stärke und Biopolyester, sowie in einem Fall nur aus einem biologisch abbaubaren Polyester.

- TÜV AUSTRIA (Vinçotte)

Die in Übersicht 9 aufgelisteten Kunststoffe haben sowohl das Label für industrielle Kompostierung als auch für Heim-/Gartenkompostierbarkeit von Vinçotte erhalten. Allerdings wurde das Label für Heimkompostierbarkeit für Kunststoffe aus Stärkeblends und den PBAT/PLA-Blend für wesentlich geringere Maximalschichtdicken vergeben. Die maximalen Schichtdicken für PHA und PBS sind bei den zertifizierten Produkten meist gleich und deuten auf eine gute Abbaubarkeit dieser Polymerarten im Kompost unter Umgebungsbedingungen hin.

Zur Aussagekraft der Zertifizierungen im Hinblick auf das Abbauverhalten unter Praxisbedingungen wird auf die Erläuterungen unter Punkt 4.1.5.1 verwiesen. Generell ist anzumerken, dass sich die Rahmenparameter für die Heimkompostierung in einer noch weiteren Spannbreite bezüglich der Eigenschaften, die Auswirkungen auf den Abbauperlauf haben können, bewegen.

Die EU-Kommission plant die verbindliche Kennzeichnung von bioabbaubaren Kunststofftüten. Kompostierbare Tüten dürfen nach den in Ausarbeitung befindlichen vorgeschlagenen Regelung nur als solche gekennzeichnet werden und auf dem europäischen Markt eingeführt werden, wenn sie als kompostierbar gemäß anerkannten Normen zertifiziert wurden. Industriell kompostierbare Tüten (gemäß EN 13432) sollen demnach eine entsprechende Kennzeichnung tragen müssen. Falls sie nicht entsprechend einer noch zu erarbeitenden EN-Norm bzw. einem von den Mitgliedsstaaten angenommenen nationalen Standard als gartenkompostierbar zertifiziert sind, sollen sie weiterhin verpflichtend als nicht heimkompostierbar gekennzeichnet werden müssen. Falls anerkannte Normen zur Heimkompostierung eingehalten werden, müssen die geprüften Produkte als industriell und heimkompostierbar gekennzeichnet werden. Der Zeitplan zur Umsetzung der Kennzeichnungsvorschläge ist nicht bekannt. Die EU-Kommission hat die CEN zur Ausarbeitung einer Norm für heimkompostierbare Kunststofftüten aufgefordert (Administration de l'Environnement, 2018).

4.1.4.3 Vergärungsanlagen

Soweit bekannt, gibt es keine Zertifizierung für die Vergärung oder andere anaerobe Abbauverfahren von BAK.

Die von den Autoren des Gutachtens zur Behandlung von biologisch abbaubaren Kunststoffen in der Literatur gefundenen Ergebnisse von Abbauversuchen unter anaeroben Bedingungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- PHA und PCL werden unter mesophilen (35 -37 °C) anaeroben Bedingungen vollständig abgebaut. Sie unterscheiden sich deutlich in der Abbauezeit. PHA-Kunststoffe waren nach einem Monat, PCL erst nach 2 Monaten mineralisiert.
- PLA ist nur bei thermophilen (> 50°C) Bedingungen abbaubar, nicht unter mesophilen
- Bioabbaubare Polyester (PBAT, PBS) werden unter anaeroben Bedingungen offensichtlich nicht abgebaut.

4.1.4.4 Deponie

BAK, die mit dem Restabfall auf Deponien gelangen, werden je nach Betriebsweise direkt in Deponiekörper eingebaut oder vor der abschließenden Einlagerung einer Vorrotte unterzogen.

Bei einem direkten Einbau in eine geregelte Deponie tragen bestimmte BAK (PHA, PCL, Stärkeblends) unter den vorherrschenden anaeroben Bedingungen bei ihrer Zersetzung zur Bildung von Deponiegas (Methan) bei. Biopolyester bleiben unter den anaeroben Bedingungen weitgehend stabil und werden nicht abgebaut. PLA ist nur bei höheren Temperaturen (> 50°C), die in Deponien kaum auftreten, abbaubar. Zu Cellulose regeneraten und Cellulosederivaten konnten keine Informationen zum Verhalten im anaeroben Milieu recherchiert werden.

In Luxemburg ist eine Deponie für Siedlungsabfälle in Betrieb. Dort dürfen nur vorbehandelte Abfälle, deren organischer Anteil durch vorherige Kompostierung (Verrottung) weitgehend reduziert wurde, abgelagert werden. Die Siedlungsabfälle aus öffentlicher Sammlung werden zunächst einer sechswöchigen intensiven Rotte in einer MBA sowie einer anschließenden weiteren, mindestens vierwöchigen Rottestufe in Form einer offenen Kompostierung auf der Deponie unterzogen, bevor sie eingebaut werden.

Während dieser Vorbehandlung dürften die meisten BAK, die im Abfall enthalten sind, zum größten Teil abgebaut sein. Die Produktion von Methan infolge der Mineralisierung der BAK im Deponiekörper wird aus diesem Grunde und aufgrund des sehr geringen Anteils im Restabfall als marginal eingeschätzt. Zudem verfügt die Deponie über ein Gaserfassungs- und -verwertungssystem, das eine Fassung des Methans und seine anschließende Verwertung in einer Blockheizkraft-Anlage erlaubt.

4.1.4.5 MBA

Literaturangaben zum Verhalten von biologisch abbaubaren Kunststoffen im mechanisch-biologischen Anlagen zur Behandlung von Abfällen wurden keine gefunden.

In Luxemburg werden die Abfälle, die in den nördlichen Landesteilen, öffentlich erfasst werden in einer MBA vorbehandelt und in verschiedene Fraktionen aufgeteilt. Eine sogenannte heizwertreiche Fraktion, die in einem Trommelsieb mit 150 mm Lochgröße nach erfolgter Zerkleinerung des Eingangsmaterials in einem Shredder, abgeschieden wird, wird in einer Verbrennungsanlage mit

Blockheizkraftwerk energetisch verwertet. Die Fraktion < 150 mm wird nach Abscheiden der enthaltenen Eisenmetalle in Rotteboxen gesteuert (Belüftung, Feuchtigkeitseinstellung) kompostiert. Anschließend wird das Rottegut zur Einlagerung in eine Deponie gebracht.

Wie sich die BAK im Abfall auf die beiden Fraktionen aufteilen, ist nicht bekannt. Aufgrund der insgesamt geringen Mengenanteile haben die BAK keine Auswirkungen auf den technischen Ablauf sowie die Massen- und Energiebilanz des Behandlungsverfahrens.

4.1.4.6 Verbrennungsanlage

Biologische abbaubare Kunststoffe können ebenso wie konventionelle Kunststoffe in Müllverbrennungsanlagen energetisch verwertet werden. Ihr Brennwert kann ähnlich bis gleich dem von konventionellen Kunststoffen sein. Der Unterschied liegt alleine in der chemischen Struktur der Kunststoffe begründet. So haben Polyolefine einen höheren Heizwert als Polyester. Zertifizierte biologisch abbaubare Kunststoffe halten die vorgegebenen Höchstgrenzen für Schwermetalle ein und tragen demzufolge (potenziell) zu einer geringeren Belastung der Filter- und Rauchgasrückstände mit Schwermetallen bei. Die Freisetzung von Klimagasen bei der Verbrennung von biobasierten biologisch abbaubaren Kunststoffen ist klimaneutral, da sie aus regenerativen Rohstoffen, die keinen fossilen Kohlenstoff enthalten hergestellt werden (European Bioplastics, 2015).

Die Hauptverwendungsbereiche von biologisch abbaubaren Kunststoffen könnten in gewissem Umfang zu einer Verringerung des Heizwertes gegenüber dem trockenen Material führen. Bei Lebensmittelverpackungen oder Bioabfallbeuteln, die in den luxemburgischen Vergärungsanlagen als Störstoff aussortiert und einer Verbrennung zugeführt werden, ist die Wahrscheinlichkeit von nassen Anhaftungen oder einer Durchfeuchtung nämlich relativ hoch. Doch auch hier ist zu betonen, dass bei der Gesamtbetrachtung des Behandlungsweges Verbrennung in Luxemburg dieser Aspekt aufgrund des geringen Mengenaufkommens im Restabfall vernachlässigbar ist.

4.1.4.7 Anlagen zur Aufbereitung und stofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen

Produkte aus BAK gelangen nach Ende ihrer Nutzungsdauer teilweise in die Erfassungssysteme für verwertbare Abfallfraktionen. In Luxemburg betrifft dies insbesondere das Rückführungssystem von Leichtverpackungen. Andere Produkte aus BAK gelangen in der Regel nicht in die stoffliche Verwertungsschiene. Abbaubare Mulchfolien in Gartenbau und Landwirtschaft sind zum Verbleib im Boden bestimmt. Die Sammelbeutel für Bioabfälle aus BAK werden entweder in den Kompostierungsanlagen desintegriert bzw. mineralisiert oder sie werden in den Behandlungsanlagen als Störstoffe aussortiert und einer Entsorgung zugeführt.

Es gibt keine Hinweise darauf, dass BAK die stoffliche Verwertung von Kunststoffen in Luxemburg beeinflussen. Nach Auskunft der für die Erfassung und Verwertung von Verpackungsabfällen zuständigen Valorlux a.s.b.l. haben BAK weder bei der Sortierung und Konditionierung der gemischt erfassten Verpackungsabfälle noch bei der Gewinnung der Kunststoffrecyclate zu spezifischen Auffälligkeiten oder Problemen geführt. Der Anteil von Verpackungsmaterialien aus biologisch abbaubaren Kunststoffen ist weder in den erfassten Leichtverpackungen noch in den aus ihnen aussortierten Abfallfraktionen bekannt (*Valorlux a.s.b.l. und ECO-Conseil s.à.r.l., 2018*).

Angesichts des wachsenden Einsatzes von BAK und gesetzlichen Regelungen in Frankreich und Italien, die die Verwendung kompostierbarer Kunststofftüten begünstigen, stellt sich aber grundsätzlich die

Frage nach den Auswirkungen der BAK auf die Organisation der etablierten Verwertungsstrukturen und die angewandten technischen Verfahren.

Letzterer Aspekt war und ist Gegenstand etlicher Analysen und Untersuchungen.

Folgende Aussagen lassen sich aus der gesichteten Literatur ableiten (u.a.):

- Alle Biokunststoffe (abbaubare und nicht abbaubare) zusammen haben einen Anteil von weit unter einem Prozent am Gesamtkunststoffabfall. Die Reinheitsanforderungen der Recyclingunternehmen an die Kunststofffraktionen liegen deutlich darunter. Untersuchungen in den Niederlanden zeigten, dass in 200 Proben getrennt gesammelter Kunststoffe aus Privathaushalten nur in neun biologisch abbaubare Kunststoffen mit einem Anteil von 0,01 – 0,14 % gefunden wurden (WfBR, 2017);
- Biologisch abbaubare Kunststoffe lassen sich in modernen Sortieranlagen hinreichend genau abtrennen, so dass hohe Sortierqualitäten erreicht werden könnten. In der Praxis werden die BAK entweder als Störstoff oder aufgrund der geringen Menge überhaupt nicht ausgeschleust;
- Sortenreine BAK können stofflich verwertet werden; soweit bekannt gibt es bislang kein stoffliches Recyclingsystem für BAK aus öffentlichen Erfassungssystemen; es existieren aber werkstoffliche, rohstoffstoffliche und lösemittelbasierte Recyclingverfahren für PLA;
- Je nach Typ und Mengenanteil können BAK das Recycling konventioneller Kunststoffe beeinflussen; unterschiedliche Eigenschaften (z.B. Schmelztemperaturen) können zu Prozessstörungen und Qualitätseinbußen führen (z.B. PLA in PET-Recycling, aber keine Störung bei PP/PS-Recycling durch PLA da gleiche Schmelztemperatur); das heißt die Auswirkungen auf das Recycling müssen differenziert für die verschiedenen Kunststoffarten betrachtet werden; bezüglich der „verträglichen“ Massenanteile finden sich teilweise deutlich verschiedene bis sogar widersprüchliche Angaben³³.

4.1.4.8 Zusammenfassende Darstellung des Abbauverhaltens von biologisch abbaubaren Kunststoffen in der Natur und in Verwertungsanlagen für organische Abfälle

Die nachfolgende Übersicht 14 enthält eine Einschätzung des Abbauverhaltens der Hauptgruppen von BAK unter natürlichen Bedingungen in verschiedenen Umweltmilieus sowie in Verwertungsanlagen für organische Abfälle. Die Einschätzung beruht im Wesentlichen auf Ergebnissen von Versuchen, die in situ (Umweltmilieus) oder unter Praxisbedingungen (industrielle Kompostierung, Vergärung) stattgefunden haben. Bei diesen Tests wurde die Zersetzung (Desintegration) der Kunststoffe untersucht, d.h. es wurde dokumentiert welcher Massenanteil des Prüfmaterials sich in einem bestimmten Zeitraum soweit abbaute, dass es optisch nicht mehr differenziert werden konnte. Die Prüfergebnisse geben somit in der Regel keine Auskunft darüber, ob und in welchen Anteilen das Material mineralisiert oder nur zerkleinert wurde. Allerdings zeigen Labortests mit auch in situ getesteten Materialien, für die Mineralisierung eine ähnliche Tendenz wie bei der Zersetzung in der Natur bzw. bei der Kompostierung oder Vergärung. Insofern wird davon ausgegangen, dass der Abbau der BAK im Wesentlichen vollständig erfolgt, also zu den Endprodukten CO₂ und Wasser führt. Bis zum

³³ Im Bericht *PLA-Abfälle im Abfallstrom (Partner BMEL-Verbundvorhaben, 2018)* wird darauf verwiesen, dass einige untersuchten Recycling-Polyolefine eine Inkompatibilität mit PLA aufweisen. Im Bericht des *Untersuchungsinstitutes WfBR (WfBR, 2017)* wird dagegen als pauschaler Wert für Stärke-Blends und PLA, bis zu dem keine negativen Effekte auf die mechanischen Eigenschaften von konventionellem Kunststoff auftreten, ein Massenanteil von 10 % angegeben.

vollständigen Abbau, der je nach Materialart und -form, sowie abhängig von den spezifischen Standort- bzw. Betriebsbedingungen sehr unterschiedlich dauert, können die BAK als Partikel und Mikrokunststoff temporär in Boden, Wasser und den Endprodukten von Kompostierung und Vergärung verbleiben und in dieser Phase die gleichen Folgen für die Ökosysteme haben wie konventionelles Mikroplastik.

Die in der Übersicht wiedergegebenen Versuchsergebnisse beziehen sich nur auf die „reinen“ Kunststoffe, wie weit Additive zurückbleiben ist nicht bekannt.

EXKURS MIKROPLASTIK

Sichtbare Kunststoffe, deren Teilchengröße mehr als 5 mm beträgt, werden als **Makroplastik** bezeichnet. Kleinere Plastikstücke werden als **Mikroplastik** bezeichnet.

Die Differenzierung von Makro- und Mikroplastik ist deshalb sinnvoll, weil sichtbares Plastik und mit dem bloßen Auge nicht oder kaum mehr erkennbares Plastik **spezifische Auswirkungen in der Umwelt** haben.

Mikroplastik ist ubiquitär verbreitet. Das heißt überall auf der Welt lassen sich im Boden, in Fluss- und Meerwasser und sogar in der Luft mikroskopisch kleine Plastikpartikel nachweisen. Auch hat Mikroplastik bereits Eingang in die Nahrungskette gefunden. Dies zeigen Untersuchungen an Meeresplankton, Meerespflanzen und Fischen. Im Rahmen einer 2018 veröffentlichten Studie der Medizinischen Universität Wien (Wien, Medizinische Universität, 2018) konnte Mikroplastik im menschlichen Stuhl nachgewiesen werden. Bei Probanden aus sechs europäischen Ländern sowie Russland und Japan wurde im Mittel 20 Mikroplastik-Partikel pro 10 Gramm Stuhl zwischen 50 und 500 µm Größe nachgewiesen. 70 bis 80 Prozent der Partikel bestanden aus Polypropylen (PE) und Polyethylenterephthalat (PET), zwei der am weitesten verbreiteten und häufig für Lebensmittelverpackungen verwendeten Kunststoffe.

Die Erforschung und Bewertung des Risikopotenzials von Mikroplastik für die Umwelt und die Gesundheit des Menschen befinden sich noch in einem frühen Stadium.

Man unterscheidet zwischen primärem und sekundärem Mikroplastik. Zum **primären Mikroplastik** gehören Kunststoffe, die in kleiner und kleinster Partikelgröße hergestellt werden und in dieser Form ihren Verwendungszweck erfüllen. **Sekundäres Mikroplastik** entsteht durch physikalischen, biologischen und chemischen Zerfall von Makroplastikteilen. Große Quellen für Mikroplastik sind der Abrieb von Autoreifen oder die Freisetzung von sonstigen mechanisch beanspruchten Kunststoffen.

Mikroplastik kann beim Zerfall von konventionellen, biobasierten oder biologisch abbaubaren Kunststoffen entstehen. Während Mikroplastik aus nicht biologisch abbaubaren Kunststoffen nicht oder nur in sehr langen Zeiträumen weiter abgebaut wird mineralisieren die bioabbaubaren Plastikteilchen mit der Zeit.

In Deutschland werden einer aktuellen Studie zufolge jährlich 330.000 Tonnen Mikroplastik (ca. 4 kg Mikroplastik pro Einwohner) freigesetzt. Diese Menge liegt den Autoren zufolge deutlich über der Menge an in die Umwelt freigesetzten Makrokunststoffen. Wichtigste Mikroplastikquellen sind der Reifenabrieb, die Freisetzung bei der Abfallbehandlung, Abrieb von Bitumen im Asphalt sowie die Verwehung von Sport- und Spielplätzen (Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, 2018).

Übersicht 14: Abbauverhalten von bioabbaubaren Kunststoffen in natürlichen Umweltmedien und Anlagen zur Verwertung organischer Abfälle¹⁾

Biologisch abbaubarer Kunststoff			Abbaubarkeit ²⁾					
Bezeichnung Kunststofftyp	Abkürzung/ Beispiele	Untergruppe BAK	Umweltmilieu			Abfallbehandlungsanlagen		
			Boden	Süßwasser	Meer	Kompostierung		Vergärung ³⁾
						Industriell	Gartenkompostierung ⁴⁾	
Polymilchsäure	PLA	Biobasiert, Monokunststoff	schlecht	schlecht	schlecht	uneinheitlich		nicht bei Praxis- Bedingungen ⁴⁾
Biologisch abbaubare Polyester	PBAT, PBS, PCL	Fossil basiert, Monokunststoff	gut bis mittel	uneinheit- lich	uneinheitlich	uneinheitlich	Zertifikat(e) nach DIN EN 13432 bzw. 14955 erteilt für PBS und PBAT	gut (PCL) kein Abbau (PBS, PBAT)
Polyhydroxylalkanoat	PHA	Biobasiert, Monokunststoff	gut	gut	gut	gut	Zertifikat(e) nach DIN EN 13432 bzw. 14955	gut
Celluloseregenerate/ Cellulosederivate	CA	Biobasiert, Monokunststoff	gut	gut	gut	gut		-
Stärke-Blends		Biobasiert	uneinheitlich	k.A.	uneinheitlich	gut	Zertifikat(e) nach DIN EN 13432 bzw. 14955	-
Sonstige Blends	Stärkeblend/PCL u. and. Biopolyester	Blend bio- u- fossil-basierte Kunststoffe	gut	gut	-	gut		-
	PBAT/PLA	Blend bio- u- fossil-basierte Kunststoffe	schlecht	schlecht	schlecht	schlecht	Zertifikat(e) nach DIN EN 13432 bzw. 14955	-
	PHA/PBAT	Blend bio- u- fossil-basierte Kunststoffe	-	-	-	schlecht		-
	Stärkeblend/ Cellulose	Blend biobasier- te Kunststoffe	-	gut	-	-		gut
	Stärkeblend/PLA	Blend biobasier- te Kunststoffe					Zertifikat(e) nach DIN EN 13432 bzw. 14955	-

¹⁾ Tendenz, die aus in der Literatur beschriebenen Abbauversuchen in situ erkennbar ist; dies bedeutet nicht, dass sich jeder Kunststoff des entsprechenden Typs unter gegebenen Umweltbedingungen tatsächlich zersetzt; die Abbaubarkeit hängt weiter maßgeblich von der Schichtstärke, der Lieferform (Pulver, Granulat, Folie, ...) usw. ab; die Versuchsanordnungen und die Versuchsdauer waren bei den einzelnen Untersuchungen nicht einheitlich

²⁾ Zersetzung (Desintegration) in Bezug auf die Ausgangsmasse während der stark schwankenden Versuchsdauer: eigene Kategorisierung: gut = > 70 – 100 %; mittel: 30 – 70 %, schlecht 0 - < 30; Angaben beziehen sich nur auf Grundkunststoffe (Monokunststoff oder Blend) nicht auf eventuelle Additive

³⁾ Die Versuchsdauer der recherchierten Tests schwankte stark; in der Praxis beträgt die Verweilzeit des Gärgutes in den Reaktoren meist um die 40 Tage; die Versuchsdauer lag in den meisten Fällen deutlich darüber; lediglich für PHA und ein Stärkeblend/Cellulose-Blend wurde bei kürzerer Versuchsdauer ein deutlicher Abbau beobachtet

⁴⁾ Literaturangaben zu Praxisversuchen wurden nicht recherchiert; die Angaben beziehen sich ausschließlich auf erfolgte Zertifizierungen unter standardisierten Bedingungen

⁵⁾ PLA werden bei thermophilen Bedingungen > 50 °C abgebaut; in der Regel haben Vergärungsanlagen deutlich geringeren Betriebstemperaturen

5. Behandlung von biologisch abbaubaren Kunststoffabfällen

Biologisch abbaubare Kunststoffe machen heute, von Nischenbereichen abgesehen, noch einen sehr geringen Teil der eingesetzten Polymere aus. In der Siedlungsabfallwirtschaft stellen sie, vom Bereich der getrennten Bioabfallsammlung und -verwertung vielleicht abgesehen, einen mengenmäßig vernachlässigbaren Faktor dar. Obwohl genaue Zahlen für Luxemburg fehlen, dürfte ihr Anteil sowohl bei den bestehenden Entsorgungs- als auch bei den Verwertungsschienen weit unter einem Prozent liegen. Es werden keine Auswirkungen auf die technischen Verfahren oder logistische Strukturen der öffentlichen Abfallwirtschaft gesehen. Allerdings ist die Frage nach der Behandlung von als Abfall anfallenden BAK prinzipiell für ihre ökologische Bewertung von Bedeutung. Weiterhin gewinnt sie mit dem prognostizierten Anwachsen der Produktion und Verwendung von BAK sowie vor dem Hintergrund der Abkehr von der fossilen Wirtschaft im Rahmen der circular economy an Bedeutung.

5.1 Kompostierung

Für biologisch abbaubare Kunststoffe und aus ihnen hergestellte Produkte bestehen, wie unter Punkt 4 gezeigt, verschiedene unabhängige Zertifizierungssysteme, die ihre Kompostierbarkeit bescheinigen. Die Kompostierbarkeit wird von den Herstellern als positive Eigenschaft bewertet, die einerseits die Möglichkeit der Nutzung der Verwertungsinfrastruktur für biogene Abfälle eröffne und andererseits helfe, die Störstoffgehalte und Schadstoffeinträge in Bioabfall und Kompost zu senken.

Diese Sichtweise wird heute von den meisten Akteuren der Abfallwirtschaft und den zuständigen Behörden nicht oder nur teilweise, z.B. bezüglich bestimmter Produkte aus BAK, geteilt. Vielmehr haben auftretende Auswirkungen in der Praxis sowie die Resultate ökobilanzieller Betrachtungen zu einer reservierten bis ablehnenden Haltung geführt. Insofern wird die Kompostierung „perspektivisch nicht für eine sinnvolle Art der Verwertung“ (Umweltbundesamt, 2009) angesehen.

Deshalb stellt sich verstärkt die Frage, wie Abfälle von biologisch abbaubaren Kunststoffen zu behandeln sind. Da in der modernen Abfallwirtschaft die technische Machbarkeit und die isolierte Ökobilanz eines Behandlungsverfahren nicht die alleinigen Kriterien für die Beurteilung seiner Sinnhaftigkeit sind, ist der Blick auf das gesamte Produktleben der BAK zu richten.

5.1.1 Grundlegende Aspekte

Die Argumente für eine kritische Betrachtung der Kompostierung von BAK als abfallwirtschaftlichem Behandlungsweg, werden nachstehend erläutert und kommentiert.

- Kritikpunkt Zertifizierung

Die Zertifizierungsmethode und die Aussagekraft der Ergebnisse werden von verschiedenen Autoren in Frage gestellt. So wird darauf verwiesen, dass die Zertifizierung nach EN 13432 lediglich bedeutet, dass nach 12 Wochen die Kunststoffe zu 90 % in Teilchen < 2mm enthalten sein müssen. Das bedeute, dass überhaupt keine Mineralisierung stattfinden muss, um dieses Kriterium zu erfüllen und die Kunststoffe zu 90 % als kleinste Teilchen (Mikrokunststoff) und zu 10 % sogar in unveränderter Form vorliegen könnten. Zudem wird die Untersuchungsdauer von 12 Wochen als zu lange angesehen, da die Rottedauer in vielen Anlagen deutlich darunter liege (DUH e.V., 2018).

Dieser Aspekt wird vom Autor dieser Recherche etwas weniger kritisch und differenzierter gesehen, da zertifizierte BAK neben den Vorgaben für die Desintegration auch noch die Vorgaben

für den biologischen Abbau (Mineralisierung) erfüllen müssen. Das bedeutet, dass davon ausgegangen werden kann, dass der Abbauprozess bis zur vollständigen Mineralisierung im Kompost bzw. in dem Medium auf das der Kompost ausgebracht wird, weitergeht. Dies lässt sich für bestimmte Kunststoffarten aus vorliegenden Untersuchungen ableiten (s. Punkt 4.1). Für andere Kunststoffarten, insbesondere für PLA bleiben jedoch große Zweifel, ob sie, wenn sie unter Praxisbedingungen nicht während des regulären Kompostierungsprozess mineralisiert werden, im Kompost oder im Boden weiter abgebaut werden.

- Kritikpunkt Erhöhung des Störstoffanteils in Biomüll und Kompost

Dieser Kritikpunkt bezieht sich auf die Annahme, dass die Verwendung von biologisch abbaubaren Sammelbeuteln für Abfälle dazu führt, dass auch vermehrt Kunststofftüten im Bioabfall landen, die nicht kompostierbar sind. So zeigten Beobachtungen in den Gemeinschaftsbiotonnen von Großwohnanlagen einen Mix aus kompostierbaren und nicht kompostierbaren Sammeltüten. Generell wird vermutet, dass die Verwendung von Kunststofftüten, ob kompostierbar oder nicht, dazu führt, dass die Anzahl der Nutzer von Plastikbeuteln steigt und dabei auch der Anteil der nicht zur Kompostierung geeigneten (*Deutschlandfunk, 2018*). Dies hat einen erhöhten Aufwand und höhere Kosten für die Konditionierung der Bioabfälle und für die Entsorgung der aussortierten Fremdstoffe zur Folge.

Aufgrund eigener Beobachtungen wird diese Einschätzung geteilt. So konnte bei einer Sichtung von bereitgestellten Biotonnen beobachtet werden, dass kompostierbare Beutel aus Stärkeblends und nicht kompostierbare Tüten aus konventionellen Kunststoffen desselben Herstellers als Sammelbeutel benutzt wurden. Auf den gefundenen Tüten, die sich zwar in Haptik und Farbe unterschieden, war das Logo des Herstellers jeweils prominent aufgedruckt. Es wird vermutet, dass dies zu Verwechslungen führt, wenn ein Kunde nicht aufmerksam und bewusst die Tüteneigenschaften kontrolliert und zudem, wie ebenfalls beobachtet, die verschiedenen Varianten nebeneinander im Verkaufsregal angeboten werden.

Bei der Sichtung der Biotonnen fiel in einigen Fällen weiterhin auf, dass z.B. in Mehrparteienwohnhäusern, sowohl Tüten aus Papier, kompostierbare und nicht kompostierbare konventionelle Tüten zur Bioabfallsammlung verwendet wurden.

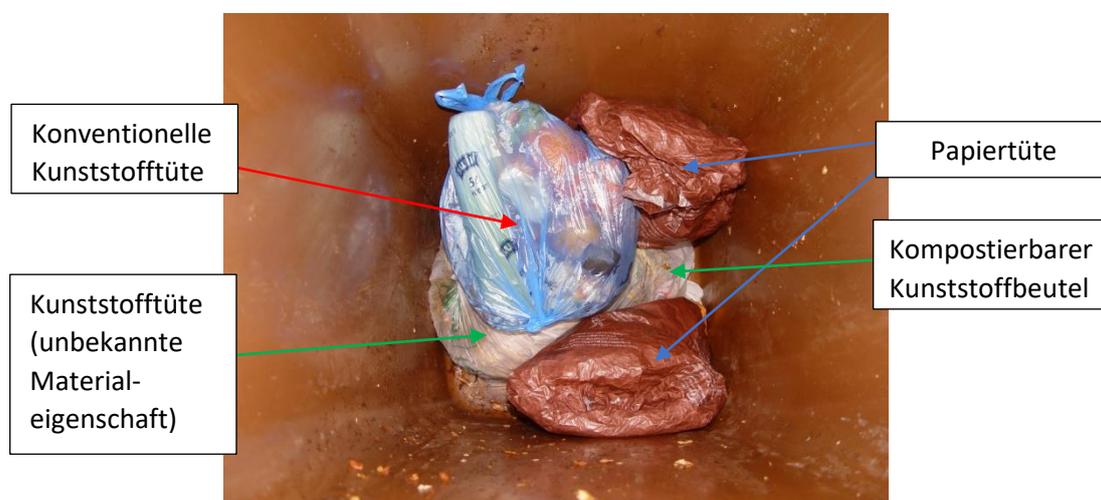


Abbildung 11: Sammeltüten in Bioabfalltonne (Betzdorf, 15.05.2015)

- Kritikpunkt Entsorgung statt Verwertung

Nach übereinstimmender Meinung der überwiegenden Mehrzahl der Autoren der gesichteten Literatur tragen kompostierbare Kunststoffe nicht zu einer Verbesserung der wertgebenden Eigenschaften (Nährstoffe, bodenverbessernde Eigenschaften) des Kompostes bei. Auch haben sie keine positiven Effekte auf den Kompostierungsprozess selbst. Die Kompostierung stellt demzufolge nur eine Entsorgung der Kunststoffe, vergleichbar einer Deponierung dar. Eine Verbrennung ist gegenüber der Kompostierung die bessere Behandlungsform, da, bei Anlagen mit Energierückgewinnung, der Heizwert des Kunststoffes genutzt wird.

Eine Kompostierung von Produkten aus BAK wird nur dann als vertretbar angesehen, wenn die Infrastruktur zum organischen Recycling vorhanden ist und sich technische und ökonomische Vorteile durch ihre Verwendung ergeben (ADEME, 2016; Umweltbundesamt, 2009). Diese Bedingungen sind lokal oder regional für Bioabfallsammelbeutel erfüllt, da diese einen Beitrag zur Erhöhung der Sammelmengen von Bioabfällen leisten können. In Deutschland sind sie bislang die einzige Produktkategorie aus BAK, die laut den geltenden gesetzlichen Bestimmungen für die Kompostierung in Anlagen zur Bioabfallverwertung zugelassen ist.

5.1.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Im Gesetz über Verpackungen und Verpackungsabfälle (Mémorial A330, 2017) wird unterschieden zwischen kompostierbaren und biologisch abbaubaren Verpackungen:

- Kompostierbare Verpackungen (emballages valorisables par compostage) müssen in einem Maße biologisch abbaubar sein, dass sie weder die getrennte Sammlung noch den Kompostierungsprozess, dem sie zugeführt werden, behindern;
- Biologisch abbaubare Verpackungen müssen über physikalische, chemische, thermische oder biologische Prozesse so zersetzt werden können, dass sich der größte Teil des erzeugten Kompostes letztlich zu Kohlendioxid, Biomasse und Wasser abbaut.

Weitere Präzisierungen oder Hinweise zu Prüfnachweisen für biologisch abbaubare oder kompostierbare Verpackungen fehlen.

Als organisches Recycling (recyclage organique) wird die die Zersetzung mittels mikrobiellen Abbaus unter aeroben (Kompostierung) oder anaeroben (Vergärung) Bedingungen verbunden mit der Gewinnung von stabilisierten organischen Bodenverbesserungsmitteln oder Methan bezeichnet. Ausdrücklich wird die Deponierung laut Gesetz nicht als Form des organischen Recyclings angesehen³⁴.

Ab 31. Dezember 2018 ist die kostenlose Abgabe von Kunststofftüten in Geschäften verboten. Hiervon ausgenommen sind sehr leichte Tüten (< 15 µ Schichtdicke), die als Primärverpackung für lose verkaufte Lebensmittel dienen. Begründet wird Ausnahmeregelung, damit, dass die sie zur Vermeidung von Lebensmittelabfall beiträgt. Die Kunststoffart, aus der diese sehr leichten Tüten hergestellt werden, ist nicht definiert.

Weitere spezifische gesetzliche Regelungen betreffend BAK auf nationaler Ebene sind nicht bekannt.

³⁴ Zitat: „«recyclage organique»: le traitement aérobie (compostage) ou anaérobie (biométhanisation), par des microorganismes et dans des conditions contrôlées, des parties biodégradables des déchets d'emballages, avec production d'amendements organiques stabilisés ou de méthane. L'enfouissement en décharge ne peut être considéré comme une forme de recyclage organique.

Die in den Nachbarländern Luxemburgs und in anderen europäischen Staaten geltenden Bestimmungen bezüglich BAK sind teilweise präziser und stellen andere Aspekte in den Fokus. Zu unterscheiden ist zwischen Bestimmungen, die direkt den Umgang mit den Abfällen von BAK betreffen und solchen, die nur indirekt Auswirkung auf die Behandlung der Abfälle haben. Dies trifft z.B. auf Gesetze zu, die einen Mindestanteil an kompostierbaren Rohstoffen bei bestimmten Produkten vorschreiben.

Die relevanten Regelungen in den drei Nachbarländern sind in der nachfolgenden Übersicht zusammengestellt. Weitere Regelungen in anderen EU-Staaten listet Übersicht 16 auf.

Es sei noch darauf verwiesen, dass Parlament und Rat der EU in der gemeinsamen Direktive betreffend die Reduzierung der Umweltauswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte (Single use plastic directive) ausdrücklich fordern, dass die Bestimmungen der Direktive auch für BAK gelten. Das bedeutet, dass nach Inkrafttreten der Direktive, bestimmte Einweg-Kunststoffprodukte aus gleich welcher Art von Kunststoff, verboten sein werden. Es ist also für die Zukunft nicht davon auszugehen, dass für bioabbaubares Einweggeschirr und bestimmte andere bioabbaubare Produkte (Strohhalme, Wattestäbchen, Ballonhalter) die Frage nach ihrer Behandlung in Kompostierungs- oder Vergärungsanlagen in Luxemburg von Relevanz ist³⁵.

Nach der Richtlinie EU 2018/851 des europäischen Parlamentes und des Rates vom 30. Mai 2018 über Abfälle können es die Mitgliedstaaten erlauben, dass Abfälle, die hinsichtlich der biologischen Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit, die den einschlägigen europäischen oder jedweden gleichwertigen nationalen Normen für kompostierbare und biologisch abbaubare Verpackungen entsprechen, mit Bioabfällen gesammelt werden.

In der Richtlinie EU 2018/852 des europäischen Parlamentes und des Rates vom 30. Mai 2018 über Verpackungen und Verpackungsabfälle ist vorgesehen, dass biologisch abbaubare Verpackungen, die aerob oder anaerob (Kompostierung oder Vergärung) behandelt werden, dann als recycelt gelten, wenn durch die Behandlung Kompost, Gärrückstände oder ein anderer Output entstehen, die bei Ausbringung in der Landwirtschaft Vorteile für die Landwirtschaft oder eine Verbesserung des Umweltzustands bewirkt. Zudem dürfen bioabbaubare Verpackungen den Vorgang der biologischen Verwertung nicht beeinträchtigen. Eine Kompostierung oder Vergärung von bioabbaubaren Verpackungen ist also dann als zulässiges Behandlungsverfahren anzusehen, wenn die genannten Bedingungen erfüllt sind. Ob diese Bedingungen allerdings erfüllt werden oder nicht, ist umstritten (s. Punkt 4.1.4.1 und Punkt 5.1.1).

Die nationalen rechtlichen Regelungen fallen in den Mitgliedstaaten unterschiedlich aus (z.B. Zulassung für die Bioabfallverwertung von biologisch abbaubaren Kunststofftragetaschen in Frankreich und Italien, Verbot der Taschen und von biologisch abbaubaren Verpackungen allgemein in Deutschland, s. Übersicht 15).

³⁵ Am 19.12.2018 haben sich Unterhändler des Rates, des Parlamentes und der Kommission auf die Umsetzung der Direktive geeinigt; die Mitgliedstaaten und das EU-Parlament müssen den Vereinbarungen vor Inkrafttreten noch einmal ausdrücklich zustimmen

Übersicht 15: Gesetzliche Regelungen betreffend biologisch abbaubare Kunststoffe in den Nachbarländern Luxemburgs

Land	Regelung	Bestimmungen
Belgien ¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> - Taxe pique-nique, 2007 - Arrêté royal établissant des normes de produits pour la dénomination de matériaux compostables et biodégradables, 2008 - Erlass der Wallonischen Regierung über die Kunststofftragetaschen, 2017 und Arrêté ministériel der Region Brüssel précisant les types de sacs plastiques dérogeant à l'interdiction d'utilisation des sacs plastiques à usage unique ... 	<p>Steuer auf 4 Kategorien von Wegwerfprodukten, darunter Einwegkunststofftragetaschen >> Ausnahme kompostierbare Kunststofftüten</p> <p>Festlegung der Normen für die Bezeichnung von kompostierbaren und biologisch abbaubaren Materialien (im Wesentlichen gilt EN 13432)</p> <p>Verbot von Einweg-Kunststofftragetaschen mit befristeter Ausnahme für Tüten für lose verkaufte Obst oder Gemüse und für feuchte oder flüssige Lebensmittel, wenn diese gartenkompostierbar sind und zu mind. 40 % aus biobasierten Rohstoffen bestehen</p>
Deutschland ²⁾	<ul style="list-style-type: none"> - Bioabfallverordnung; § 14 Liste der für eine Verwertung auf Flächen geeigneten Bioabfälle sowie der dafür geeigneten anderen Abfälle, biologisch abbaubaren Materialien und mineralischen Stoffe - Düngemittelverordnung 	<p>Zulässig für die Kompostierung sind</p> <p>a) Produkte, die im Gartenbau und in der Landwirtschaft verwendet werden, wenn sie gemäß den Normen DIN EN 13432 oder DIN EN 14995 zertifiziert sind; Verpackungen sind ausdrücklich ausgenommen</p> <p>b) Produkte, die gemäß den Normen DIN EN 13432 oder DIN EN 14995 zertifiziert sind; nur Abfalltüten, die zur Sammlung biologisch abbaubarer Abfälle wie z.B. Küchen- und Kantinenabfälle bestimmt sind</p> <p>Als Nebenbestandteile von Düngemitteln sind biologisch abbaubare Werkstoffe, die nach den Normen DIN EN 13432 oder DIN EN 14995 zertifiziert sind, in unvermeidlichen Anteilen, die im Rahmen einer aeroben Behandlung anfallen, zugelassen.</p>
Frankreich ³⁾	<ul style="list-style-type: none"> - Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, Titre IV: Lutter contre les gaspillages et promouvoir l'économie circulaire: de la conception des produits à leur recyclage 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbot von Einweg-Kunststofftüten ab 2017 zur Verpackung von Waren am Verkaufsort; Ausnahme für Tüten, welche ganz oder teilweise biobasiert und gartenkompostierbar sind; • Verbot von Plastikverpackungen für adressierte und nicht adressierte Printmedien und Werbesendungen, die nicht biobasiert und nicht gartenkompostierbar sind • Ab 2020 müssen alle Plastikbecher, -teller und -besteck (garten-) kompostierbar sein und eine biologische Rohstoffbasis besitzen.

Quellen: ¹⁾ Moniteur Belge ²⁾ www.juris.de ³⁾ www.legifrance.gouv.fr

Übersicht 16: Gesetzliche Regelungen betreffend biologisch abbaubare Kunststoffe in weiteren europäischen Ländern

Land	Regelung	Bestimmungen
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)
Niederlande	Packaging Decree	2008 Steuer auf Verpackungen; Biologisch abbaubare Kunststoffverpackungen begünstigt (Kunststoffverpackung: 0,64 €/kg; biologisch abbaubarer Kunststoff 0,02 €/kg)
Rumänien		2006 Gebühren für Einweg-Kunststofftüten Ausnahme: biologisch abbaubare Kunststofftüten
Spanien	Umsetzung EU-Richtlinie Nr. 2015/720	Entwurf des Ministeriums für Landwirtschaft, Fischerei, Lebensmittel und Umwelt: Ab Januar 2020 Verbot des Verkaufs von nicht-biologisch abbaubaren Einweg-Kunststofftaschen /tüten

Quelle: Umweltbundesamt, 2018

In Deutschland und Spanien wurden aufgrund neuer Entwicklungen und Erkenntnisse bei der Bewertung von biologisch abbaubaren Kunststoffen Regelungen, die zugunsten der abbaubaren Kunststoffe getroffen wurden, zwischenzeitlich wieder zurückgenommen. Dies betrifft in Deutschland den Wegfall für Lizenzgebühren für Kunststoffverpackungen aus BAK (Verpackungsverordnung) im Jahr 2008, der 2013 wieder aufgehoben wurde. 2011 wurde in Spanien der Verkauf von Einweg-Kunststofftragetaschen, die nicht biologisch abbaubar sind, verboten. Die Bestimmung wurde 2014 wieder aufgehoben.

In Dänemark, Irland, den Niederlanden und dem Vereinigten Königreich ist im Zuge der Umsetzung der EU Richtlinie 2015/720³⁶ die unentgeltliche Abgabe von Kunststofftüten ebenfalls verboten. Hier bestehen im Unterschied zu Belgien, Frankreich und Italien keine Ausnahmebestimmungen für Tüten aus BAK.

Die dargestellten unterschiedlichen rechtlichen Rahmenbedingungen bedingen teilweise deutlich unterschiedliche Marktanteile der BAK in den einzelnen Ländern (Übersicht 17).

Übersicht 17: Marktschätzung für biologisch abbaubare Kunststoffe (Quelle: Umweltbundesamt, 2018)

Produktkategorie	Frankreich (2017)	Italien (2015)	Deutschland (2015)
Bioabfallsammelbeutel	k.A.	7.000 Mg	5.000 – 8.000 Mg
Einkaufstüten	20.000 Mg	30.000 – 35.000 Mg	k.A.
Verpackungen	k.A.	1.000 – 2.000 Mg ¹⁾	5.000 Mg ²⁾
Sonstiges ¹⁾	k.A.	13.000 – 17.000 Mg	2.000 Mg
Gesamt	30.000 – 40.000 Mg (0,524 kg / Einw.) ⁴⁾	45.000 – 50.000 Mg (0,791 kg / Einw.) ⁵⁾	12.000 – 15.000 Mg (0,159 kg / EW)

¹⁾ PLA-Flaschen

²⁾ vor allem PLA-Becher

³⁾ z.B. Kompostierbare Mulchfolien; Cateringprodukte; Kaffeekapseln; Spielzeug; Kugelschreiber; Blumentöpfe/Eierbecher

⁴⁾ 2015 6.000 – 8.000 Mg (= 0,105 kg / Einw.); vor dem Verbot von Einwegekäufstüten. Einweggeschirr und bestimmter Verpackungen aus nicht biologisch abbaubaren Kunststoffen

⁵⁾ 2017 >54.500 Mg (= 0,9 kg / Einw.)

³⁶ Richtlinie (EU) 2015/720 des europäischen Parlamentes und des Rates vom 29. April 2015 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG betreffend die Verringerung des Verbrauchs von leichten Kunststofftragetaschen

5.1.3 Erfahrungen in der Praxis

Es liegen keine Informationen vor, dass Produkte aus BAK in Luxemburg bei den Kompostierungsanlagen zu Beeinträchtigungen des Kompostierungsbetriebes führen würden.

Bei eigenen Sichtungen von zur Abfuhr bereitgestellten Biotonnen und von Bioabfallanlieferungen an einer Kompostierungsanlage und einer Kofermentationsanlage ergaben bisher keine Hinweise darauf, dass Verpackungen, Einweggeschirr oder – mit Ausnahme von Bioabfallsammelbeuteln- sonstige Gebrauchsgüter aus BAK gezielt über die Biotonne entsorgt würden. Die genannten Produkte sind bislang allenfalls in einer marginalen Menge in den Bioabfällen enthalten und werden dann mit den anderen Fremdstoffen aussortiert.

Bioabfallsammelbeutel aus BAK werden in Luxemburg verbreitet genutzt. Wie unter Punkt 3.5.2 gezeigt finden sie sich entsprechend in relativ großer Anzahl im getrennt gesammelten Bioabfall wieder. In den beiden luxemburgischen Kompostierungsanlagen, die Bioabfälle direkt ohne vorherige Vergärung kompostieren, werden sie, soweit sie identifiziert werden können, bei der händischen Störstoffauslese nicht abgeschieden und mit dem Bioabfall verrottet. Nach eigenen Beobachtungen und Auskunft des Betreibers der SICA-Kompostierungsanlage sind nach der regulären Kompostierung, keine Bruchstücke der Beutel mehr optisch zu erkennen. Die Desintegration findet unabhängig von Saison oder Witterungsbedingungen in der offenen Mietenkompostierungsanlage statt.

Das interkommunale Syndikat Minett-Kompost betreibt eine Vergärungsanlage mit anschließender Kompostierung. Es fördert gezielt die Verwendung von biologisch abbaubaren Sammelbeuteln für Bioabfall als Alternative zu den in den Anlieferungen an seiner Anlage häufig zu findenden Tüten aus konventionellen Kunststoffen (s. Punkt 3.5.2). Dies deutet daraufhin, dass die bioabbaubaren Bioabfallsammelbeutel den Prozessablauf nicht stören. Allerdings hat die Förderung der Sammelbeutel auch dazu geführt, dass diese landesweit in den Geschäften angeboten werden und auch dort vermehrt von den Biotonnennutzern verwendet werden, wo die eingesammelten organischen Abfälle Vergärungsanlagen ohne anschließende Kompostierung zugeführt werden und mithin als Störstoffe aussortiert werden.

Obwohl in luxemburgischen Anlagen über viele Jahre hinweg beobachtet wurde, dass die Bioabfallbeutel im Kompostierungsprozess verlässlich desintegriert werden, kann dieses Ergebnis nicht verallgemeinert werden, da die Abbaukinetik in den Kompostierungsanlagen stark von den jeweiligen Rahmenbedingungen abhängt. Offen bleibt, mangels bislang fehlender Untersuchungen, die Frage, wie weit die BAK noch in Form von mit dem Auge nicht mehr erkennbaren Partikeln (Mikrokunststoff) im Kompost vorliegen. Ebenso ist die Bestimmung der Abbaubarkeit (Mineralisierung) praktisch nur im Labormaßstab, nicht aber unter realen Kompostierungsbedingungen möglich, so dass hierzu ebenfalls keine Aussagen zu luxemburgischen Anlagen getroffen werden können.

Ob andere BAK, z.B. dickwandigere Verpackungen oder Einweggeschirr, im regulären Behandlungsprozess luxemburgischer Kompostierungs- oder Vergärungsanlagen vollständig abgebaut würden, kann aufgrund fehlender Erfahrungen, nicht angegeben werden. Es wird jedoch vermutet, dass dies nicht der Fall ist und eine komplette Desintegration nur bei längerer Prozessdauer und jeweils optimalen Betriebsbedingungen erfolgen würde. Ab einem bestimmten Anteil an BAK im Rottegut (der auf absehbare Zeit angesichts des geringen Marktanteils der BAK-Produkte und der Praxis der Störstoffauslese nicht zu erwarten ist), könnten diese theoretisch den Verwertungsprozess beeinträchtigen. Beispielsweise könnte ein hoher Anteil der BAK, die nur einen geringen Anteil an Mineralien und Stickstoff aufweisen, zu einer schlechten Nährstoffversorgung der abbauenden Mikroorganismen beitragen und so die Rottebedingungen verschlechtern.

Die Ergebnisse einer Befragung von Betreibern deutscher Kompostierungsanlagen sowie von Kommunen und anderen Trägern der öffentlichen Abfallwirtschaft durch die DUH ergibt einen guten Überblick über den aktuellen Umgang mit BAK bei der Bioabfallverwertung im Nachbarland.

Übersicht 18: Behandlung von BAK in Kompostierungsanlagen in Deutschland (Umfrageergebnisse Deutsche Umwelthilfe e.V. (DUH), 2018), Bezugsjahr 2015/2016

Aspekt	Anzahl Kompostierungsanlagen mit Angaben	Antworten [% der Anlagen]
Einstufung der BAK	362	Generell als Störstoff: 80,4 % Bestimmte BAK: 6,6 % Kein Störstoff: 13 %
Kompostierung von BAK	391	Ja: 2,6 % Ja bestimmte: 2,3 % Nein: 95,1 %
Entfernung von Kunststoff-Einkaufstragetaschen vor der Kompostierung	461	Ja: 77 % Nein: 23 %

Übersicht 19: Zulässigkeit von BAK bei der Bioabfallsammlung in Deutschland (Umfrageergebnisse und Internetrecherche Deutsche Umwelthilfe e.V. (DUH), 2018), Bezugsjahr 2016, Auswertung von 345 Landkreisen und kreisfreien Städten, die Bioabfall getrennt sammeln

Aspekt	Antworten [% der Anlagen]
Zulässigkeit Einkaufstüten	Ja: 0 % Nein: 100 %
Zulässigkeit Bioabfallsammelbeutel	Ja: 14 % Nein: 86 %

Im Unterschied zu Deutschland lassen Frankreich und Italien alle Produkte aus BAK, die definierte Voraussetzungen erfüllen für das organische Recycling zu. In dem Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe werden die Situation und Erfahrungen bei der Behandlung von BAK in den beiden Ländern wie folgt zusammengefasst (Umweltbundesamt, Hrsg., 2018).

Die Kompostierungsanlagen in Frankreich akzeptieren grundsätzlich BAK. Aufgrund der langen Kompostierungszyklen in französischen Anlagen (drei bis sechs Monate) zersetzen sich die zugelassenen BAK vollständig (Desintegration). Es gibt keine Hinweise auf eventuelle Probleme bez. von Rückständen von BAK und es werden auch keine Schwierigkeiten bei einer weiteren Zunahme dieser Produkte erwartet. Die Vergärung von Bioabfällen spielt in Frankreich als Behandlungsmethode nur eine untergeordnete Rolle. Aufgrund des noch nicht flächendeckenden Ausbaus der getrennten Bioabfallsammlung wird ein Großteil der BAK (Einkaufstüten, Einweggeschirr etc.) über die Restmülltonne entsorgt. Verpackungen aus BAK werden zum größten Teil über die bestehenden getrennten Sammlungen mit den Kunststofffraktionen erfasst und bei der Materialsortierung als Störstoffe abgetrennt.

In Italien sind alle nach der Norm EN 13432 zertifizierten Produkte zur industriellen Kompostierung zugelassen. Vor allem werden Bioabfallsammelbeuten, Einkaufstüten und mit Änderung der gesetzlichen Bestimmungen vermutlich ab 2018 vermehrt auch Obst- und Gemüsetüten, kompostiert. In den meisten Kompostierungsanlagen dauert der Kompostierzyklus 90 Tage. Größere Probleme beim Kompostierungsprozess oder negative Auswirkungen auf die Kompostqualität sind (bei Anlagen mit

ausreichend langen Kompostierungszeiten und hohen Prozesstemperaturen) nicht bekannt. In den Vergärungsanlagen sind BAK nur zugelassen, wenn eine aerobe Behandlung nachgeschaltet ist. Bei Anlagen, bei denen dies nicht der Fall ist, werden die BAK als Störstoffe ausgeschleust. Bei Vergärungsanlagen mit anschließender Kompostierung werden keine größeren Schwierigkeiten oder Prozessstörungen durch BAK berichtet. Durch die Förderung der kompostierbaren Sammelbeutel wurde ein Rückgang der im Bioabfall enthaltenden nicht abbaubaren Kunststoffe erreicht.

5.2 Vergärung

5.2.1 Grundlegende Aspekte

Wie Abbaueversuche gezeigt haben, sind die meisten BAK-Stoffgruppen unter anaeroben Bedingungen abbaubar, d.h. vergärbar. Für biologisch abbaubare Polyester konnte dieser Nachweis nicht erbracht werden.

Die erforderlichen Prozessbedingungen für einen Abbau der vergärbaren BAK sind in konventionellen Vergärungsanlagen jedoch oft nicht gegeben. Entweder sind die Verweilzeiten zu kurz (z.B. im Fall von PCL) oder die Temperaturen zu niedrig (im Fall von PLA).

Das heißt in Vergärungsanlagen ohne anschließende Kompostierung findet kein oder nur ein geringer Abbau der BAK statt. Bei Anlagen mit anschließender aerober Behandlung des Gärgutes könnten zertifizierte BAK bei adäquaten betrieblichen Konditionen entsprechend den Vorgaben der Prüfnormen für die Kompostierbarkeit abgebaut werden.

In Luxemburg stellt sich die Situation bezüglich der Verwertung von getrennt erfassten Bioabfällen wie folgt dar (2017):

- 11,3 % werden direkt kompostiert;
- 72,2 % werden in einer Trockenfermentationsanlage mit anschließender Kompostierung verarbeitet;
- 16,5 % werden in Kofermentationsanlagen ohne aerobe Nachbehandlung vergärt.

Im letzteren Fall stellen BAK Störstoffe dar, die aus dem Bioabfall abzutrennen sind und gesondert behandelt werden müssen.

Bezüglich der Kompostierung der Gärreste in der Trockenvergärungsanlage sei auf Punkt 5.2.3 verwiesen.

5.2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Das luxemburgische Gesetz über Verpackungen und Verpackungsabfälle enthält nur Anforderungen an kompostierbare Verpackungen. Vorgaben bezüglich der Vergärung von Verpackungen oder anderen Produkten aus BAK fehlen.

Die unter Punkt 5.1.2 erläuterten rechtlichen Regelungen im Ausland bezüglich biologisch abbaubarer Kunststoffe zielen alle ebenfalls ausschließlich auf kompostierbare Produkte ab.

In Luxemburg und in der EU werden Bioabfälle zu einem großen Teil vergärt. Diesem Umstand wird demnach im Hinblick auf die Behandlung von BAK in der bestehenden Gesetzgebung bislang nicht Rechnung getragen.

5.2.3 Erfahrungen in der Praxis

In den luxemburgischen Kofermentationsanlagen, die Bioabfälle vergären, werden enthaltene BAK in als Fremdstoffe aus dem Bioabfallstrom ausgeschieden und einer thermischen Verwertung zugeführt.

Ob die BAK komplett abgetrennt werden, ist nicht bekannt. Es wird jedoch vermutet, dass ein Teil von ihnen im Prozess verbleibt und sich im Gärrest wiederfindet. Bei der Vorbehandlung der Bioabfälle werden diese in den Vergärungsanlagen zunächst geshreddert. Anschließend wird eine wässrige Suspension hergestellt. Die Fremdstoffe werden dann mittels Schwimmsinktrennung abgeschieden. Leichte Fraktionen schwimmen oben auf und werden abgeschöpft. Dies trifft z.B. für Folien aus Kunststoff zu. Schwere Fraktionen sinken ab und werden am Grund der Behälter abgesaugt. Dies träfe z.B. für Produkte aus dem schweren PLA zu. Wie sich zerkleinerte BAK aber tatsächlich bei der Schwimmsinktrennung verhalten ist nicht bekannt. Es wird angenommen, dass Bruchstücke von ihnen in der Suspension verbleiben, und zwar umso mehr, je kleiner diese sind.

Bei den luxemburgischen Kompostierungs- und Vergärungsanlagen, die Bioabfälle verarbeiten dürfen, werden die erzeugten Komposte und Gärreste regelmäßig auf ihren Fremdstoffgehalt untersucht. Die Genehmigungsaufgaben hinsichtlich der maximal zulässigen Fremdstoffanteils werden i.d.R. eingehalten. 2017 wurden in 10 von 40 untersuchten nicht kompostierten Gärresten Kunststoffgehalte (alle Kunststoffarten) zwischen 0,01 und 0,17 Gew.-% gefunden, in den 11 analysierten kompostierten Gärresten lagen die Werte zwischen 0,01 und 0,05 Gew.-% und in den Komposten bei 14 von 23 Proben zwischen 0,01 und 0,12 Gew.-%. Registriert werden bei den Analysen jedoch nur Kunststoffteilchen ab einer Korndurchmesser von 2 mm. Kleinere Teilchen bleiben unbeachtet (*Administration de l'Environnement, 2018*).

Dass der Eintrag von Kunststoffen mit Komposten oder Gärresten aus dem organischen Recycling als problematisch angesehen wird, zeigen verschiedene Untersuchungen (*Weithmann N. et al., 2018 und Raussen T. et al, 2016*) und ein Vorschlag des deutschen Bundesrates für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt (*Bundesrat, 2018*). In diesem Vorschlag wird explizit auf die Notwendigkeit hingewiesen, den Eintrag von Kunststoffen in die Umwelt mit Komposten und Gärresten stärker als bislang zu begrenzen.

5.3 Entsorgung mit dem Restabfall

Produkte aus biologisch abbaubaren Kunststoffen haben heute noch einen sehr geringen Marktanteil. Sie behindern, soweit sie im Restabfall enthalten sind, die bestehenden Entsorgungsstrukturen nicht. Bei einer deutlichen Erhöhung der Verwendung von BAK müssten ihre Auswirkungen genauer analysiert und bewertet werden. Welche Aspekte dabei u.a. zu beachten wären, wurde bereits unter Punkt 4.1.4 angesprochen.

5.4 Recycling

BAK können im Prinzip nach denselben Kriterien getrennt gesammelt und sortenrein verwertet werden wie konventionelle Kunststoffe. Für bestimmte BAK, z.B. PLA, liegen Studien und Untersuchungen vor, die ein hochwertiges stoffliches Recycling belegen (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Projektträger), 2017).

Eine Recyclinginfrastruktur für BAK fehlt bislang. Sie wäre die Voraussetzung für den Einstieg in das Recycling von BAK aus Siedlungsabfällen. Aufgrund des aktuellen geringen Marktanteils wird nicht damit gerechnet, dass in der näheren Zukunft entsprechende Verwertungssysteme aufgebaut werden.

Generell ist darauf zu verweisen, dass, unabhängig von der Kunststoffart, das stoffliche Recycling von Kunststoffen optimiert werden muss, um eine es möglichst nachhaltig und effizient zu gestalten. Hierauf zielt auch die Kunststoffstrategie der Europäischen Kommission ab.

In diesem Zusammenhang sei auf folgende allgemeine Aspekte verwiesen:

- Hochwertiges stoffliches Recycling bedeutet, dass ein gleiches oder gleichwertiges Produkt aus dem Regrenulat produziert wird. Dies ist in vielen Fällen nicht möglich. Die Vielfalt der Additive und deren Einfluss auf die Produkteigenschaften führen dazu, dass das Recycling von Post-Consumer-Kunststoffen oft nur als Down-Cycling möglich ist. Bei den zertifizierten BAK ist die Liste der zugelassenen Additive eher kurz, so dass „Unverträglichkeiten“ eher seltener als bei anderen Kunststoffen auftreten würden, wenn es gelänge ausreichend homogene Fraktionen zu separieren (Fritz I., 2018).
- Gute Abtrennung und stoffliche Verwertbarkeit sind Voraussetzung für ein effizientes umwelt- und ressourcenschonendes Recycling von Kunststoffen. Die Trennbarkeit in verschiedene Materialien stellt vor allem bei Verbundmaterialien aus verschiedenen Kunststoffen oder solchen aus Kunststoffen und anderen Materialien ein Problem dar. Für alle Kunststoffe, insbesondere aber für biobasierte und biologisch abbaubare, für die (noch) keine eigenen Recyclingschienen etabliert sind, sollten eindeutige, verbindlich einzuhaltende Kriterien definiert werden. Das Design neuer Produkte muss von Beginn an eine Mehrfachverwendung bzw. ein Materialrecycling (kein Downcycling) vorsehen. Die Behandlung der Abfälle (end-of-life scenario) muss also bis in die Konzeption eines Produktes zurückwirken.
- Die Ökobilanz des Recyclings von BAK hängt von vielen Rahmenbedingungen ab. Vor allem die Art der Rohstoffe (Anbau von Rohstoffpflanzen oder Nutzung von Reststoffen) und die Art des Anbaus (z.B. Energieeinsatz, Düngung, Bewässerung, Pflanzenschutz) spielen hier eine Rolle siehe Punkte 6 und 7).

Bezüglich des stofflichen Recyclings von biologisch abbaubaren Kunststoffen sei noch auf einen grundlegenden Aspekt, der durch ihre gewünschte Materialeigenschaften bedingt ist, hingewiesen. Soweit BAK herkömmliche Kunststoffe ersetzen, sollen sie auch den gleichen, i.d.R. hohen technischen Ansprüchen genügen. So sollen Verpackungen oder Kunststofftragetaschen aus BAK ähnlich robust und stabil sein wie solche aus herkömmlichen Kunststoffen. Andererseits sollen sie jedoch auch möglichst schnell unter Umgebungsbedingungen bzw. in Kompostierungsanlagen durch Mikroorganismen abgebaut werden können. Die Erfüllung dieser „gegensätzlichen“ Anforderungen stellt eine große Herausforderung für Forschung und Industrie dar und wirkt sich auch auf das stoffliche Recycling aus. Nach Einschätzung des Autors wären z.B. höhere technische Ansprüche an die Aufbereitungstechnik und die Regranulierung zu stellen. Bisher praktizierte Verfahren sind mit Materialeigenschaften bestimmter BAK nicht kompatibel. Dies betreffe beispielsweise Trenn- und Waschverfahren mit Wassereinsatz oder die Prozesstemperaturen beim Recycling³⁷.

In Luxemburg hat die mit der Erfassung und Verwertung von Verpackungen durch die Verpackungsverantwortlichen beauftragte Valorlux a.s.b.l. in einer Ausschreibung im Jahr 2017

³⁷ Trifft vor allem für die Materialgruppen Stärkeblends, PHA, bioabbaubare Polyester und Cellulosederivate/-regenerate zu; Verpackungen aus PLA sind relativ stabil; Untersuchungen haben gezeigt, dass ein hochwertiges werkstoffliches Recycling von PLA aus dem Post-Consumer-Bereich im Rahmen der bestehenden Erfassungs- und Aufbereitungsstrukturen prinzipiell möglich wäre (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Projekträger), 2017)

differenziert für die verschiedenen (konventionellen) Kunststofffraktionen maximal erlaubte Gehalte an anderen Kunststoffen festgelegt. Diese liegen z.B. bei PET-Flaschen (Unterfraktionen grün/dunkelblau und transparent/leicht-blau) zwischen 1 und 2,25 Gew.-%, bei Kunststofffolien bei 3 Gew.-%. Der geringste Gehalt wird mit 0,3 Gew.-% beim PS-Recycling toleriert. Da der Gesamtanteil aller BAK am Gesamtkunststoffabfall in Luxemburg auf weit unter ein Prozent geschätzt wird, wäre aktuell, selbst dann, wenn die BAK-Verpackungen komplett den Kunststoffsortierfraktionen nach ihrer Verpackungsform (Folien, Becher, Blister) zugeordnet würden, nicht mit dem Erreichen der maximal zulässigen Fremdstoffanteile zu rechnen. Mit einer verbesserten Sortiertechnik, die die geforderten Kriterien sicher einhält (z.B. durch den Einsatz automatischen Erkennungs- und Sortiertechnik auf dem Stand der Technik, wie z.B. NIR-Erkennung), dürften bei einer Zunahme von Produkten aus BAK einerseits Störungen der bestehenden Recyclingverfahren von Kunststoffen nicht zu befürchten sein und andererseits auch eine sortenreine Trennung der BAK ermöglicht werden, die ggf. bei Erreichen ökonomischer Mengenschwellen Grundlage für die Entwicklung und den Aufbau von stofflichen Recyclingstrukturen für BAK sein könnte.

6. Ökobilanzielle Betrachtung

Die Hersteller, Inverkehrbringer und Anwender von BAK weisen oft auf deren Umweltvorteile gegenüber konventionellen Kunststoffen hin. Als Vorteile werden die Kompostierbarkeit und, soweit die Kunststoffe biobasiert sind, die Herstellung aus nachwachsenden Rohstoffen, hervorgehoben.

Beide Eigenschaften per se weisen BAK jedoch nicht als ökologisch vorteilhaft aus. Bei der Beurteilung eines Werkstoffes oder Produktes besteht heute in Umweltpolitik und Wissenschaft weitgehend Konsens dahingehend, dass die Umweltwirkungen während des gesamten „Lebensweges“, von der Gewinnung der Rohstoffe über die Produktion und Anwendung des Produktes bis hin zu seiner Verwertung oder Entsorgung, betrachtet werden müssen. Es bestehen verschiedene Verfahren zur ökologischen Bewertung von Produkten. Eine systematische und mittels europäischer Normen geregelte Methode ist die Ökobilanzierung. Sie beruht auf der Analyse der ökologischen Effekte durch den Verbrauch von Stoffen und Energie sowie der entstehenden Emissionen und Abfälle über den gesamten Produktzyklus (Umweltbundesamt, 2009).

Dennoch unterscheiden sich die Ergebnisse verschiedener Ökobilanzen, die für gleiche biobasierte Materialien durchgeführt wurden, teilweise deutlich. Die Gründe hierfür liegen in Unterschieden und Spielräumen bei Regelwerken und Standards hinsichtlich der Ökobilanzierung von biobasierten Produkten und Materialien. Z.B. betrifft dies die Berücksichtigung von Speichereffekten des in den BAK gebundenen Kohlenstoffes, die Berechnung von Emissionen beim Anbau der Rohstoffpflanzen (= landwirtschaftliche Kultivierungsphase) und die Anrechnung von Änderungen und Effekten bei der Landnutzung (Görmer, M., 2018).

Aus diesem Grunde werden einzelne Ökobilanzen hier nicht betrachtet und kommentiert. Stattdessen werden Wirkungskategorien der Ökobilanz, für die sich tendenziell ähnliche Einschätzungen in der Literatur finden, besprochen.

In einer Ökobilanz zu berücksichtigende Wirkungskategorien sind:

- Einfluss auf das Klima,
- Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen,
- Beitrag zur Bildung von Ozon,
- Beitrag zur Versauerung von Böden und Gewässern (Säurebildungspotenzial),
- Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit,

- Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen durch Emissionen von Stoffen,
- Veränderungen des Nährstoffgleichgewichts in Boden und Wasser (durch Überdüngung),
- Flächenverbrauch,
- Einfluss auf Biodiversität durch Flächennutzung.

BAK können gegenüber konventionellen Kunststoffen eine bessere **CO₂-Bilanz** haben und zu einer **Schonung fossiler Ressourcen** beitragen.

Ob sie tatsächlich hinsichtlich dieser beiden Wirkungskategorien besser zu bewerten sind, hängt ab von:

- der Rohstoffbasis: nur vollständig oder größtenteils biobasierte Kunststoffe weisen Vorteile auf;
- dem Anbau und der Verarbeitung der nachwachsenden Rohstoffe: Energiebedarf, Verbrauch von fossilen Rohstoffen (Dünger, Energieträger) und CO₂-Bilanz hängen von der Form der Landbewirtschaftung und der Kulturart, aus der der nachwachsende Rohstoff gewonnen wird, ab;
- der Art der Abfallbehandlung am Ende des Produktlebens: werkstoffliches Recycling und energetische Verwertung schneiden sehr viel besser ab als Kompostierung (organisches Recycling) und Deponierung.

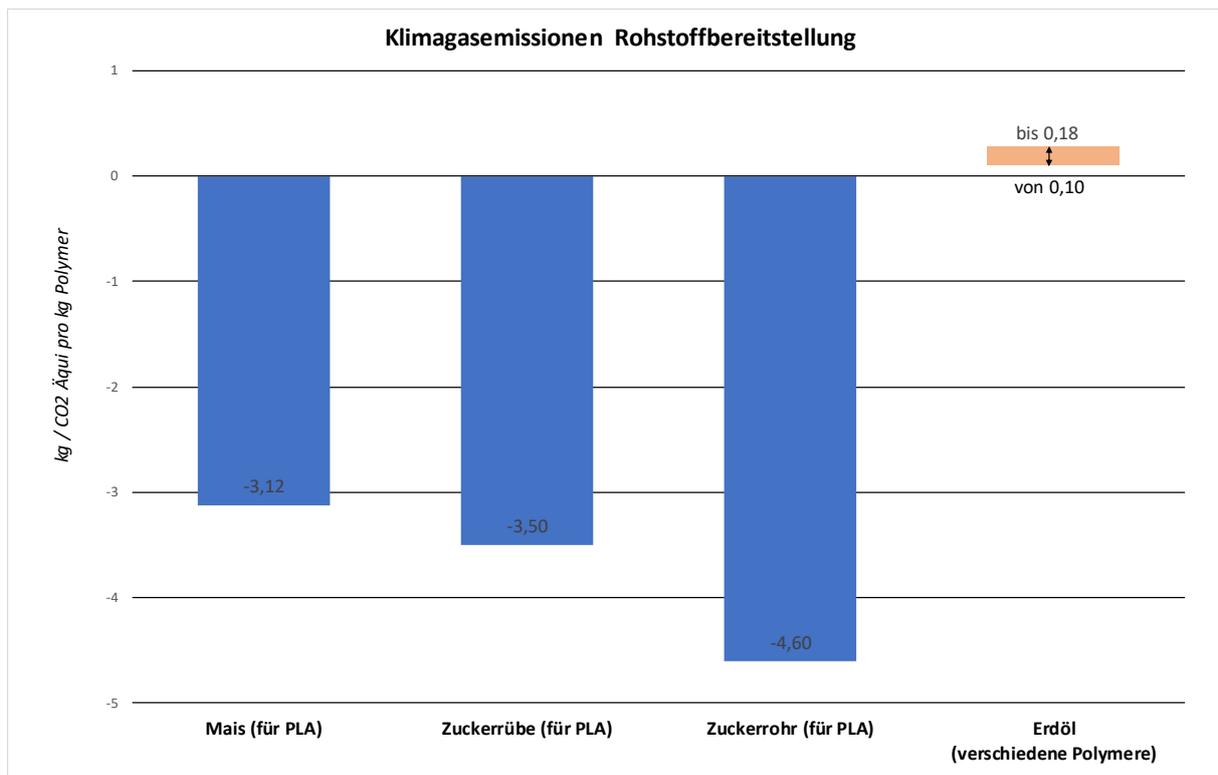


Abbildung 12: Treibhausgaspotenzial für die Bereitstellung verschiedener Rohstoffe für die Polymerproduktion (Datenquelle: Venkatachalam V., 2016)

Weiterhin lassen sich folgende allgemeine Aussagen bezüglich der Wirkungskategorien Klimaeinfluss und fossiler Rohstoffverbrauch treffen (u.a. Umweltbundesamt, 2009 und ifeu, 2012):

- Als Entsorgungsweg für biologisch abbaubare Kunststoffe sollte, sofern ein werkstoffliches Recycling aus technischen Gründen ausscheidet, die energetische Verwertung mit Nutzung des Energieinhaltes angestrebt werden. Bei der Kompostierung geht die inhärente Energie der BAK verloren und es wird kein anderer Vorteil, etwa in Form eines Beitrags zu wertgebenden

Eigenschaften des Kompostes oder einer günstigen Beeinflussung des Kompostierungsprozesses geleistet;

- BAK aus fossilen Rohstoffen schneiden deutlich schlechter ab als biobasierte. Der Primärenergieeinsatz bei ihnen liegt um den Faktor 5 – 9, der Beitrag zum Treibhauseffekt um den Faktor 5 – 7 höher;
- Die Vorteile der BAK kommen nur dann zum Tragen, wenn die aus ihnen hergestellten Produkte bei gleichen technischen Eigenschaften ein ähnliches Gewicht aufweisen. Wenn die Produkte, z.B. Folien aus BAK, höhere Wandstärken haben müssen, um die gleiche Materialstabilität zu erreichen, entfallen diese.

Bei den weiteren Wirkungskategorien, die im Rahmen einer Ökobilanz untersucht werden, hängt das Ergebnis für die BAK noch entscheidender als bei ihrem Klimaeinfluss und fossilen Rohstoffverbrauch von der Art und der Form des Anbaus der genutzten Kulturen ab. Tendenziell schneiden sie bei den Kategorien aquatische und terrestrische Eutrophierung, Versauerung, Flächenverbrauch/ Landnutzung schlechter ab als konventionelle Kunststoffe (siehe Übersicht 13).

Übersicht 20: Einschätzung der Verwendung biobasierter Polymere im Hinblick auf bestimmte Umweltwirkungen (nach Venkatachalam V., 2016)

Faktor	Biobasiert vs. Fossil basiert	Begründung
Energieverbrauch		keine klare Tendenz, da Energieverbrauch bei bio- und fossil basierten Polymeren jeweils stark schwankt
Treibhausgaspotential		Rohstoff ist CO ₂ -neutral; Gesamtbilanz von weiteren Bedingungen (Bewirtschaftungsform) abhängig
Abiotischer Ressourcenverbrauch		Regenerativer Rohstoff
Eutrophierungspotential		Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden
Versauerungspotential		Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden
Landnutzung		Beanspruchung von landwirtschaftlicher Nutzfläche
Wasserverbrauch		Wasser für die Bewässerung und Prozesswasser

Umweltwirkung im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen:

-  geringer / günstiger Umwelt
-  stärker / schlechter
-  unklar, schwankend oder gleich

Vorliegenden Ökobilanzen und andere Untersuchungen zur Nachhaltigkeit zeigen unterm Strich, dass BAK prinzipiell keinen ökologischen Gesamtvorteil gegenüber anderen Kunststoffen haben. Gerade dann, wenn BAK nach einmaligem Gebrauch kompostiert werden, fällt ihre Gesamtbewertung oft

sogar schlechter aus als bei konventionellen Kunststoffen. Der Grund hierfür ist der Verlust der in Ihnen enthaltenen Energie, die im Unterschied zu einer energetischen Verwertung in einer Verbrennungsanlage, nicht genutzt wird.

Einzelne spezifische Produkte aus biobasierten BAK können jedoch auch ökologisch vorteilhafter sein als solche aus anderen Kunststoffen.

Diesbezüglich folgert das deutsche Umweltbundesamt bereits 2009, dass eine ökologische Überlegenheit biologisch abbaubarer Kunststoffe über herkömmliche Kunststoffe vor allem dann zu erwarten sein dürfte, wenn:

- die Rohstoffe aus nachhaltiger, an ökologischen Kriterien orientierter landwirtschaftlicher Produktion stammen,
- vermehrt Reststoffe aus der landwirtschaftlichen und Nahrungsmittelproduktion eingesetzt werden,
- die Produktgestaltung eine Mehrfach-Verwendung möglich macht und
- eine hochwertige stoffliche oder energetische Verwertung am Ende des Produktlebenslaufes stattfindet.

Dieser Einschätzung kann auch heute noch zugestimmt werden. Das Potenzial der BAK hinsichtlich der Generierung ökologischer Vorteile wurde seither jedoch kaum erschlossen. Das größte Handicap dürfte es sein, die Forderung nach mehrfacher Verwendung und nach einer hochwertigen stofflichen Verwertung zu erfüllen.

Die Schlussfolgerung des Umweltbundesamtes in der Veröffentlichung von 2009 lautete entsprechend:

„Falls die biologische Abbaubarkeit nicht unbedingt zum Produktnutzen gehört, sollten deshalb vorrangig nur solche Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen entwickelt werden, die nicht abbaubar, langlebig und recycelfähig sind.“

Auch diese Einschätzung wird geteilt. Als Produktgruppen, bei denen die Abbaubarkeit zum Produktnutzen gehört, werden heute allgemein angesehen:

- Mulchfolien in Landwirtschaft und Gartenbau, die nach Gebrauch im Boden verbleiben und dort abgebaut werden sollen;
- Sammelbeutel zur Erfassung von Bioabfall, sofern sie zu höheren Sammel- und Erfassungsquoten von Bioabfall beitragen, mittels der vorhandenen Infrastruktur für Bioabfall problemlos behandelt und abgebaut werden können und nicht zu einer Erhöhung nicht abbaubarer sonstiger Fremdstoffe führen;
- Medizinische Produkte, die im Körper abgebaut werden sollen (temporärer Implantate, Nahtmaterial, Tablettenhüllen, ...)

Darüber hinaus sind auch andere Verwendungsbereiche vorstellbar. Beispielsweise wären dies technisch notwendiges Mikroplastik (Kosmetika, Hygieneprodukte) und Verschleißteile mit Abrieb, die regelmäßig zu ersetzen sind (Puffer, Dichtungen, Borsten von Besen, Fäden von Mähwerkzeugen etc.). Hier wäre aber darauf zu achten, dass biologisch abbaubare Kunststoffe nicht dazu führen, den Absatz und die Verwendung von Einmalprodukten, für die es ökologisch bessere Alternativen gibt, zu fördern bzw. diese betreffende Sanktionen (z.B. vorgeschlagenes Verbot von bestimmten Einmalprodukten durch die Europäische Kommission, wie Trinkhalmen, Wattestäbchen etc. aus Kunststoff) behindert oder erschwert werden.

Der Ersatz konventioneller durch abbaubare Kunststoffe in Bereichen, wo die biologisch Abbaubarkeit erwünscht wäre, stößt technisch jedoch noch häufig an Grenzen. So ist es, trotz einiger Ansätze und Forschung, noch nicht gelungen, Fischereinetze (Stichwort Geisternetze) zu entwickeln, die sowohl ausreichend schnell im Meer oder Süßwasser abgebaut würden als auch die erforderliche Stabilität und Reißfestigkeit aufweisen.

7. Sozioökonomische Aspekte

Wie dargestellt, besitzen biologisch abbaubare Kunststoffe keine bessere ökologische Gesamtbewertung als konventionelle Kunststoffe. Insbesondere für biobasierte BAK spielen neben den in Ökobilanzen untersuchten Auswirkungen, weitere Aspekte soziokultureller, sozioökonomischer und ethischer Art eine Rolle bei der Einschätzung der BAK-Eigenschaften. Ein oft geäußertes Kritikpunkt betrifft die Flächenkonkurrenz zwischen Rohstoffherzeugung und Nahrungserzeugung. Weitere Fragen ergeben sich auch hinsichtlich der Art und Weise des Anbaus von Rohstoffpflanzen, z.B. in Bezug auf Biotechnologie und Gentechnik.

7.1 Flächenkonkurrenz

Der Anbau von Kulturen zur Erzeugung von Rohstoffen für Polymere führt dazu, dass Flächen, auf denen bisher Nahrungs- oder Futtermittelpflanzen angebaut wurden oder zuvor nicht ackerbaulich genutzte Flächen in Anspruch genommen werden.

Die Folgen werden unterschiedlich eingeschätzt. In der Diskussion über die Flächenkonkurrenz sollten quantitative und qualitative Gesichtspunkte beachtet werden. Bei der quantitativen Betrachtung stellt sich die Frage nach der Dimension des Flächenbedarfs für nachwachsende Rohstoffe, bei der qualitativen Betrachtung sind die Auswirkungen auf Biodiversität und soziale Strukturen mit zu berücksichtigen.

Die aktuelle Diskussion bezüglich der Flächenkonkurrenz und Landnutzung bezieht sich bei den biobasierten Werkstoffen vor allem auf die neuartigen Biokunststoffe und nicht auf die etablierten biobasierten Werkstoffe wie z.B. Zellulose für die Papierindustrie, Baumwolle für die Textilindustrie oder Naturkautschuk.

Nach Schätzungen werden zwischen 0,02 (FNR, 2018) und 0,05 % (IfBB, 2018) der weltweiten Ackerfläche New Economy- Biokunststoffe angebaut.

Selbst bei den optimistischsten Marktprognosen dürfte sich dieser Anteil im nächsten Jahrzehnt nicht auf mehr als 0,1 % erhöhen.

Verschiedene Autoren berechneten für verschiedene Bezugsräume den Flächenbedarf bei vollständiger Gewinnung der Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Die Zahlen sind in Abbildung 11 dargestellt. Würden der gesamte Kunststoffbedarf weltweit aus Rohstoffpflanzen hergestellt, würden nach den Schätzungen um die 5 % der globalen Ackerfläche und 11,5 % der Ackerfläche in den entwickelten Ländern³⁸ hierfür benötigt.

³⁸ lt. FAO

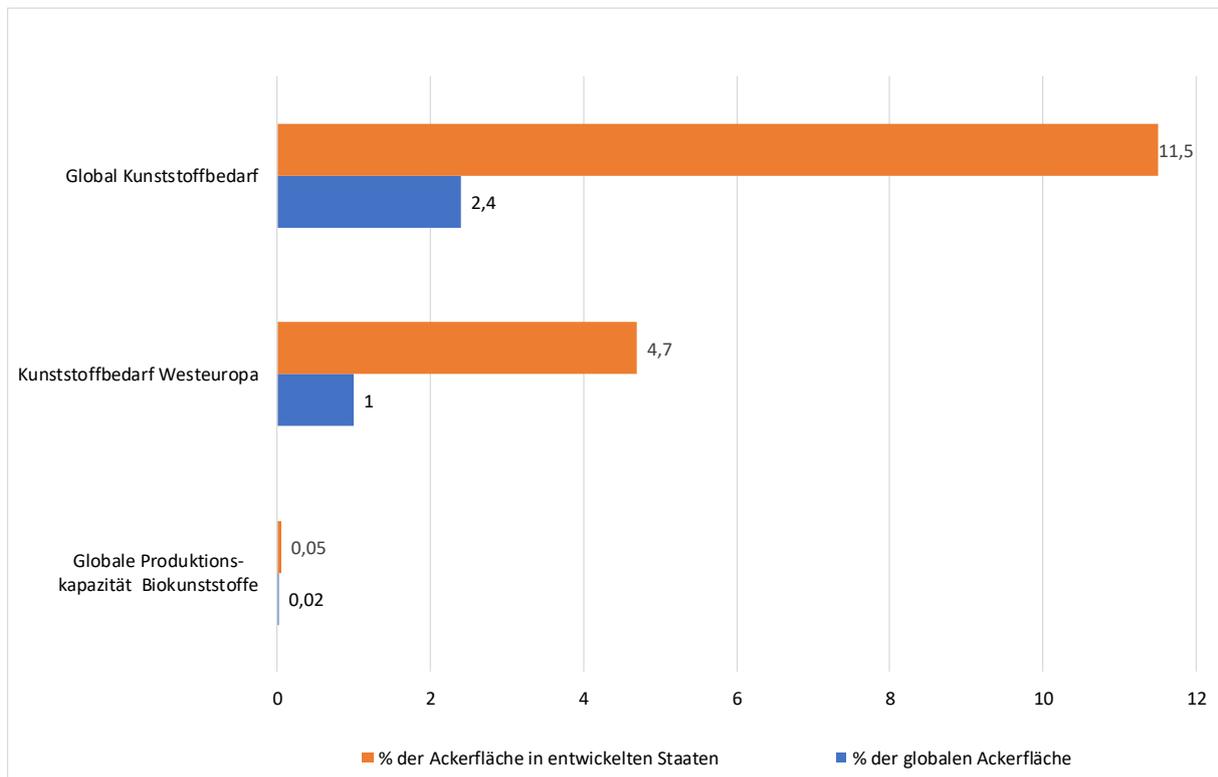


Abbildung 13: Geschätzter Flächenbedarf für die Produktion von biobasierten Kunststoffen (nach Aöl, 2015)

Die Flächeneffizienz gibt an, wieviel Anbaufläche benötigt wird, um eine bestimmte Menge Rohware zur Herstellung einer bestimmten Menge Kunststoff zu erzeugen (s. Abbildung 14).

Sie hängt vor allem ab von:

- der Art der Kultur (Zuckerrohr, Zuckerrübe, Mais, Kartoffel, Holz, ...);
- der Art des Biokunststoffes (Effektivität des Herstellungsprozesses);
- den Standortverhältnissen (Bodenfruchtbarkeit, Klima, Höhenlage) und der Form des Anbaus (intensiv/extensiv).

Die Flächeneffizienz von Zuckerrohr ist bei dem gleichen Kunststoff (z.B. PLA) deutlich besser als bei Mais. Zur Gewinnung von Stärkeblends aus Mais braucht man pro Mengeneinheit wiederum weniger Anbaufläche als bei der Kartoffel. Allein dieser Aspekt zeigt bereits, dass die Betrachtung der Anbauflächen im globalen Maßstab bezüglich der Abschätzung der Folgen zu kurz greift. Es ist nämlich davon auszugehen, dass sich der Anbau von Rohstoffpflanzen aus ökonomischen Gründen dort konzentriert, wo die höchste Flächeneffizienz zu erwarten ist. Das heißt z.B. dass die Flächen zur Biokunststoffproduktion in den Tropen und Subtropen, wo die Anbauzonen für Zuckerrohr liegen, oder die Flächen zum Maisanbau in den gemäßigten Zonen proportional stärker anwachsen als in anderen Regionen. Dies wiederum kann in den betroffenen Gebieten zu weniger Diversifizierung in der Landwirtschaft mit negativen Folgen, die sich hieraus ergeben können, führen. Dem Autor ist bisher keine diesbezügliche negative Entwicklung in Folge des Anbaus von Rohstoffpflanzen für biobasierte Kunststoff bekannt. Entwicklungen in anderen Bereichen zeigen jedoch das angesprochene Risikopotenzial. Folgende Beispiele seien erwähnt:

- die Konzentration des Anbaus von Ölpalmen in Indonesien führte zur Rodung der primären Regenwälder, zur Freisetzung enormer Mengen des in den Waldböden gespeicherten Kohlenstoffs und einem massiven Verlust an Biodiversität (z.B. Milhahn K., 2018);
- der Auf- und Ausbau der Biogaserzeugung aus Energiepflanzen führte im deutschen Bundesland Mecklenburg-Vorpommern zu einer Konzentration des Maisanbaus. Die Anbaufläche von Mais wuchs landesweit von 2005 bis 2014 von rd. 8 % der Ackerfläche 14 %. Sie liegt damit zwar unter dem Durchschnitt in Deutschland, in einigen Regionen erreicht sie aber bei 50 -60 % mit negativen ökologischen (Bodenfruchtbarkeit, Artenvielfalt, mehr Futtermittelimporte aus Südamerika und Asien) und sozioökonomischen Folgen (Pachtpreise, Verknappung der Anbauflächen für nicht spezialisierte Betriebe) (BUND Landesverband Mecklenburg-Vorpommern, 2013).

Die beschriebenen Folgen könnten ähnlich auch dann auftreten, wenn der Ausbau der Biomasseerzeugung zur Gewinnung von Rohstoffen für die Kunststoffproduktion sich regional konzentriert.

Wie unter Punkt 6 erläutert, sind biobasierte biologisch abbaubare und nicht abbaubare Kunststoffe ökologisch nicht besser zu bewerten als konventionelle. Allerdings besteht „Entwicklungspotenzial“ bei den biobasierten Kunststoffen im Hinblick auf die Verbesserung ihrer ökologischen Gesamtbewertung. Dies betrifft gerade auch die Form des Anbaus der Rohstoffpflanzen und eventuelle regionale Anbauschwerpunkte, die auch vor dem Hintergrund des Ausstiegs aus der fossilen Wirtschaft und der Entwicklung der zirkulären Wirtschaft besonders beachtet werden müssen.

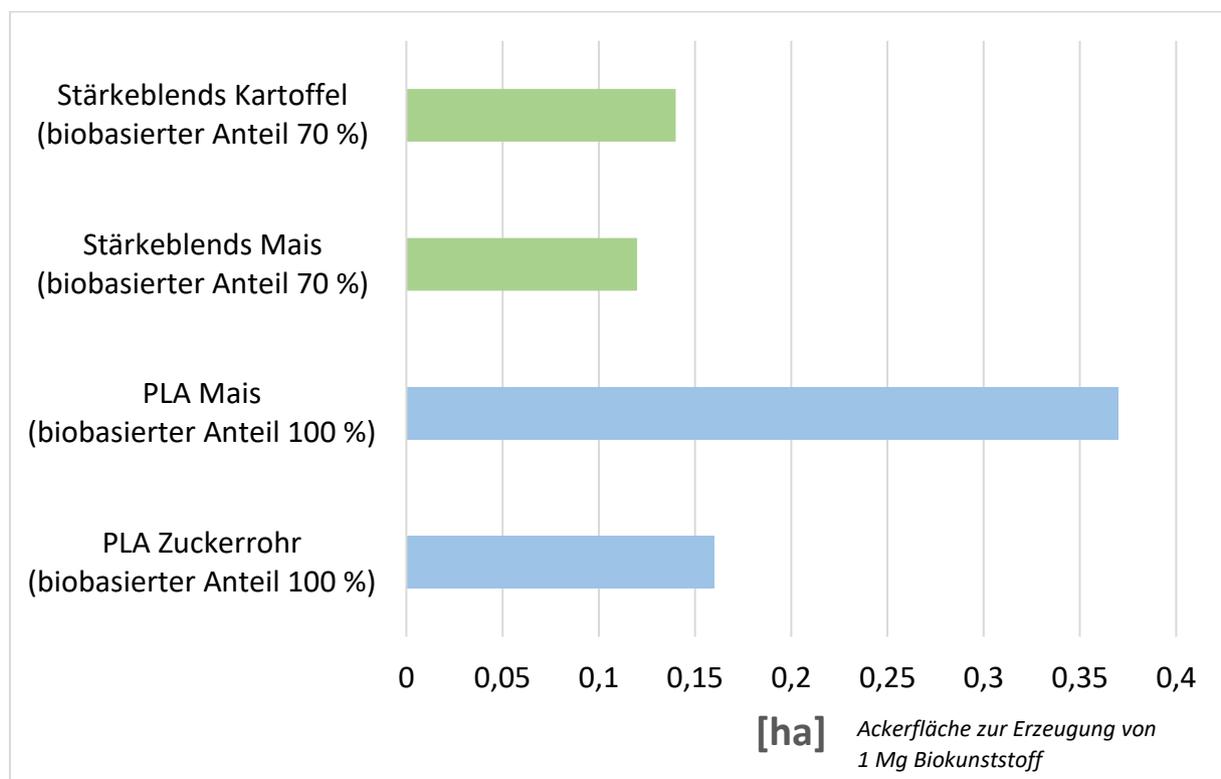


Abbildung 14: Flächeneffizienz landwirtschaftlicher Kulturen bei der Gewinnung von biobasierten Polymeren (Beispiele nach AÖL, 2015)

7.2 Gentechnik

Der Einsatz von Gentechnik in der Landwirtschaft ist ein Aspekt, der heute sehr gegensätzlich diskutiert wird.

In der EU besteht ein Rechtsrahmen für den Anbau gentechnisch veränderter Organismen und die Zulassung von gentechnisch veränderten Lebens- und Futtermitteln.

Die rechtlichen Vorgaben sind im Hinblick auf den Anbau von Rohstoffpflanzen zu prüfen und ggf. anzupassen bzw. zu erweitern.

8. Zusammenfassung

Biologisch abbaubare Kunststoffe sind dadurch gekennzeichnet, dass sie ganz oder teilweise durch Mikroorganismen mineralisiert werden können.

Wie schnell und in welchem Umfang dies geschieht ist von einer Vielzahl von Rahmenbedingungen abhängig. Es gibt diesbezüglich **keine allgemeinen, verbindlich festgelegten Anforderungen**, die biologisch abbaubare Kunststoffe erfüllen müssen, um als solche zu gelten.

Für bestimmte biologische Behandlungsverfahren existieren **europäische oder andere Normen**. In mehreren europäischen Ländern ist die Einhaltung dieser Normen (EN 13432 für Verpackungen und EN 14995 für Kunststoffe allgemein) Voraussetzung dafür, dass biologisch abbaubare Werkstoffe oder Produkte für bestimmte abfallwirtschaftliche Behandlungsverfahren zugelassen werden (z.B. Zulassung von Bioabfallsammelbeutel für die Kompostierung in Deutschland) bzw. unter bestimmte gesetzliche Ausnahmeregelungen fallen (z.B. Ausnahme von Verbotsregelungen für Kunststofftragetaschen oder Einweggeschirr für entsprechende Produkte aus kompostierbaren Kunststoffen in Frankreich und Italien). Der Nachweis der Erfüllung der Normen erfolgt über anerkannte Prüfsysteme. Das Gesetz über Verpackungen und Verpackungsabfälle in Luxemburg bezieht sich nicht auf die genannten Normen, sondern definiert biologisch abbaubare Verpackungen allgemeiner. Für diese Verpackungen wird lediglich verlangt, dass sie weder die bestehenden Sammelsysteme noch die Kompostierung, der sie zugeführt werden, behindern und dass der erzeugte Kompost größtenteils zu Wasser, Kohlendioxid und Biomasse mineralisiert.

Ob die bestehenden Normen und Prüfsysteme zum Nachweis der Kompostierbarkeit unter Praxisbedingungen ausreichen bzw. sinnvoll sind, ist Gegenstand kontroverser Diskussionen. In mehreren Quellen wird darauf hingewiesen, dass die in den Normen vorgeschriebenen Zeiten für eine Mineralisierung (6 Monate) bzw. eine Desintegration (12 Wochen) in vielen Kompostierungsanlagen bei der Rotte nicht erreicht werden. Ein weiterer Kritikpunkt an den Normen bezieht sich darauf, dass sie nur eine 90 prozentige Mineralisierung bzw. Desintegration vorschreiben.

Seit März 2018 ist eine europäische Norm (EN 17033) in Kraft, die Kriterien für den Abbau von in der Landwirtschaft und im Gartenbau verwendeten Mulchfolien vorgibt. In Luxemburg gibt es bislang keine rechtlichen Bestimmungen, die die Einhaltung dieser Norm für die Verwendung entsprechender Produkte vorschreiben würde. Wie weit dies im Ausland der Fall ist, ist nicht bekannt.

Neben den Normen für die Kompostierbarkeit und den Abbau von Mulchfolien im Boden bieten einige Prüfstellen Zertifizierungen für die Abbaubarkeit von Kunststoffen unter anaeroben Bedingungen und für verschiedene Umweltmilieus an (Boden, Süßwasser, Meerwasser) an. Sämtliche Prüfungen erfolgen unter Laborbedingungen und sind damit bezüglich des Abbauverhaltens unter natürlichen

Bedingungen nur eingeschränkt aussagekräftig. Versuche unter Umweltbedingungen zeigen eine große Abhängigkeit der Abbaukinetik von den jeweiligen Standortverhältnissen.

Zusammenfassend lassen sich die Literaturangaben bezüglich des Abbauverhaltens der gemessen an ihrem Marktanteil wichtigsten biologisch abbaubaren Kunststoffgruppen, wie folgt zusammenfassen:

Kunststoff	Abbauverhalten					
	Kompostierung		Vergärung	Boden	Süßwasser	Meer
	Großanlage	Garten				
Stärke-Blends	+	+	+	+	-	+
Polymilchsäure	+	-	-	- bis --	-	-
Biologisch abbaubare Polyester	+	+	-- ¹⁾	+	+ ²⁾	- ²⁾
Polyhydroxylalkanoat	+	+	-	+	+	+
Celluloseregenerate/ Cellulosederivate	+	+	+	+	+	?

+ *abbaubar*

- *schlecht abbaubar bzw. nicht unter regulären Prozessbedingungen (z.B. Temperatur oder Verweilzeiten)*

-- *kein Nachweis der Abbaubarkeit*

¹⁾ Ausnahme PCL (-) ²⁾ Ausnahme PCL (-) ³⁾ Ausnahme PCL (+)

Zu beachten ist, dass diese Einschätzungen nur tendenziell gelten und die tatsächliche Abbaubarkeit für jedes Produkt einzeln zu betrachten ist. Geringe Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung (z.B. Additive, Mischungsanteile verschiedener Compounds bei Blends) und der Materialdicke können bereits deutliche Veränderungen bewirken.

Die Hauptanwendungsgebiete von biologisch abbaubaren Kunststoffen sind Verpackungen incl. Kunststofftragetaschen und Bioabfallsammelbeutel (ca. 60 %) sowie Folien und verrottbare Materialien in Landwirtschaft und Gartenbau (ca. 14 %). Weitere mengenmäßig relevante Verwendungsfelder sind die Konsumwarenherstellung, die Textilindustrie und die Automobilindustrie. Für Luxemburg sind keine Zahlen zu Marktmengen oder -anteilen bekannt. Aufgrund von Literaturangaben wurde die jährlich auf den Markt gebrachte Menge von Produkten aus biologisch abbaubaren Kunststoffen im Großherzogtum auf ca. 67 bis 73 Tonnen geschätzt. In Luxemburg ist die Verwendung von Bioabfallsammelbeuteln aus biologisch abbaubaren Kunststoffen relativ verbreitet und wird teilweise gefördert. Ihre Menge wird mit 20 – 50 Tonnen jährlich geschätzt.

Der Anteil von biologisch abbaubaren Kunststoffen am Gesamtkunststoffabfall wird in Luxemburg auf deutlich unter 0,5 % geschätzt. Für keinen der Behandlungswege, denen die biologisch abbaubaren Kunststoffe zugeführt werden, sind durch sie verursachte Störungen oder Probleme des Prozessablaufes bekannt. Bei der Kompostierung und Vergärung ist allerdings darauf zu verweisen, dass eventuell im Bioabfallstrom enthaltene Produkte aus biologisch abbaubaren Kunststoffen größtenteils als Störstoffe ausgesondert werden. Allenfalls Bioabfallsammelbeutel werden in Kompostierungsanlagen, soweit sie als biologisch abbaubar identifiziert werden können, toleriert. Bei den spezifischen Prozessbedingungen in Luxemburg werden die bioabbaubaren Sammelbeutel augenscheinlich in den regulären Rottezeiten desintegriert, d.h. zu Partikelgrößen < 2 mm zersetzt.

Ökobilanzielle Betrachtungen konnten bislang noch keinen ökologischen Gesamtvorteil von biologisch abbaubaren Kunststoffen gegenüber konventionellen Kunststoffen nachweisen. Sie werden entweder ähnlich oder sogar schlechter bewertet, wobei die Art der Abfallbehandlung hierbei eine relativ große Rolle spielt. Würden biologisch abbaubare Kunststoffe mehrfach wiederverwendet und nach ihrer Gebrauchsdauer stofflich hochwertig recycelt, wäre ihre Bewertung deutlich besser. Bezüglich der Kompostierung ist anzumerken, dass sie geringere Vorteile aufweist als eine energetische Verwertung, da die inhärente Energie der bioabbaubaren Kunststoffe nicht genutzt wird und auch kein sonstiger

Vorteil (z.B. Steigerung der Kompostqualität oder Verbesserung des Kompostierungsprozesses) generiert wird.

Die Verwendung biologisch abbaubarer Kunststoffe zur Herstellung von Produkten ist dort zu befürworten, wo die Abbaubarkeit Teil des Produktnutzens ist. So ist ihre Verwendung bei landwirtschaftlichen Mulchfolien, die nach Gebrauch im Boden verbleiben können, auch aus arbeitswirtschaftlichen Gründen anerkannt. Bei den Bioabfallsammelbeuteln gilt es als Plus, dass diese zu einer höheren Erfassungsrate von Bioabfällen beitragen können und gleichzeitig den Gehalt an Fremdstoffen im Kompost senken helfen. Voraussetzung ist allerdings, dass die Desintegration der Beutel im regulären Betriebsablauf der Kompostierungsanlagen zuverlässig erfolgt. Papiertüten oder Einwickelpapier (z.B. Zeitungen) sind Alternativen zu den Bioabfallsammelbeuteln aus BAK. Wie deren Einsatz ökologisch zu bewerten ist, wäre zu klären. Ein Komplett-Verbot von Bioabfallsammelbeuteln aus Kunststoff bei der Bioabfallsammlung und der Verweis auf die Alternativen könnte ein Mittel sein, die Kunststoffanteil im organischen Abfall weiter zu senken.

Theoretisch wird weiteres Entwicklungspotenzial bei den biobasierten, biologisch abbaubaren Kunststoffen gesehen. Voraussetzungen für eine ökologische Vorteilhaftigkeit wären eine nachhaltige, umweltschonende Produktion der Rohstoffpflanzen bzw. ihre Gewinnung aus organischen Reststoffen und Abfällen, die Möglichkeit einer mehrfachen Wiederverwendung, der Aufbau von Erfassungs- und hochwertigen stofflichen Recyclingsystemen und ggf. ein hoher Produktnutzen aufgrund ihrer biologischen Abbaubarkeit.

Die Anforderungen hinsichtlich Wiederverwendung und hochwertiger stofflicher Verwertung stehen in einem gewissen Gegensatz zu der Materialeigenschaft der biologischen Abbaubarkeit. Die mehrfache Wiederbenutzung und die technischen Prozesse des Recyclings erfordern eine Mindeststabilität des Materials und Widerständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen, wie Feuchte und Temperatur. Umgekehrt erfordert der biologische Abbau vor allem in natürlichen Milieus eine leichte Spaltbarkeit der Polymere als Voraussetzung für eine Desintegration und die weitere Mineralisierung.

Nach Einschätzung des Autors ist das tatsächliche praktische Anwendungspotential von biologisch abbaubaren Kunststoffen relativ beschränkt.

Während für Produkte für einen einmaligen saisonalen oder temporären Einsatz z.B. in der Landwirtschaft (Bindematerial, Verbisschutz, Trägermaterial für Pheromone bei der biologischen Schädlingsbekämpfung, Mulchfolien etc.) die Kombination der Materialeigenschaften sinnvoll und gewünscht ist, scheinen Verwendungsfelder, die hohe Anforderung an die Robustheit der Werkstoffe stellen, wenig zukunftssträftig.

Bezüglich des Umgangs mit BAK in der luxemburgischen Abfallwirtschaft werden folgende Anregungen gegeben:

- Im Gesetz zu Verpackungen und Verpackungsabfällen, der einzigen rechtlichen Vorgabe, in der bislang auf biologisch abbaubare bzw. kompostierbare Kunststoffe verwiesen wird, sollten diese genauer definiert werden. So könnte, wie in anderen europäischen Ländern, die Erfüllung der europäischen Norm EN 13432 und die Zertifizierung der Verpackungen entsprechend dieser Norm als Voraussetzung für eine Anerkennung als kompostierbare Verpackung festgelegt werden. Hierdurch würde sichergestellt, dass Verpackungen auf dem luxemburgischen Markt einheitliche Standardeigenschaften bezüglich ihres Verhaltens bei der Kompostierung aufweisen. Die genauere Definition sollte unabhängig von vorzunehmenden weiteren Einstufungen und Regelungen in der Abfallwirtschaft erfolgen;
- Eine Direktkompostierung bzw. eine Vergärung mit nachgeschalteter Kompostierung sind, soweit erforderliche Prozesszeiten und -temperaturen eingehalten werden, technisch geeignete

Behandlungsmethoden zum Abbau von BAK entsprechend der europäischen Norm 13432. Für Vergärungsanlagen ohne aerobe Nachrotte trifft dies häufig nicht zu.

Ökologisch gelten die zusammenfassend als organisches Recycling bezeichneten Behandlungsverfahren für BAK als nicht vorteilhaft. Gründe hierfür sind, dass ihr Energiegehalt, der bei der Verbrennung in einer Anlage mit Energierückgewinnung genutzt würde, verloren geht (bei der Kompostierung ganz, bei der Vergärung teilweise) und dass sie nicht zu einer Verbesserung der Endprodukte (Kompost, Gärreste) bzw. des Behandlungsprozesses beitragen. Insoweit stellt das organische Recycling für BAK nur eine Entsorgungs- und keine Verwertungsmethode dar und sollte nicht als Behandlungsweg zugelassen werden. Produkte, die eventuell anderweitige deutliche Vorteile haben, könnten hier ausgenommen werden. Dies trifft, wie gezeigt, für bioabbaubare Bioabfallsammelbeutel zu, deren Verwendung in Luxemburg in Gemeinden mit getrennter Bioabfallsammlung, bereits seit Ende der 90iger Jahre verbreitet ist und als Möglichkeit zur Absenkung der in der Biotonne enthaltenen konventionellen Kunststoffe und zur Erreichung höherer Sammelmengen von Bioabfall angesehen wird. Eine Zulassung dieser Sammelbeutel für die Biotonne sollte die Behandlungsinfrastruktur berücksichtigen, d.h. nur in den Sammelgebieten zugelassen werden, in denen die Bioabfälle einer Direktkompostierung oder einer Kompostierung nach Vergärung zugeführt werden. Als Voraussetzung für die Zulassung wird weiterhin empfohlen, festzulegen, dass die Sammelbeutel nachweislich die geltenden europäischen Normen 13432 und 14995 erfüllen und entsprechend eindeutig zu kennzeichnen sind. Bei der Diskussion um die zulässigen Behandlungsverfahren von bioabbaubaren Sammelbeuteln sollten Alternativen (Papierbeutel) bewertet werden. Bei Akzeptanz von BAK in Kompostierungsanlagen sollte in deren Betriebsgenehmigung die zulässigen Produkte aus Kunststoffen genau definiert werden;

- Die Marktentwicklung der BAK und der Aufbau eventueller werkstofflicher Recyclinginfrastruktur für sie sollte beobachtet werden. Wenn bei Erreichen von Mengenschwellwerten Recyclingschienen für z.B. Verpackungen aus BAK in den Nachbarländern aufgebaut werden, sollte geprüft werden, ob sie für Luxemburg ökonomisch darstellbar und ökologisch vorteilhaft genutzt werden können.

Aktuelle Daten zur spezifischen Marktsituation in Luxemburg sollten systematischer als bisher erfasst werden. Hierzu böten sich als Möglichkeiten u.a. an:

- eine Berücksichtigung von Verpackungen aus BAK bei der Deklaration der auf den Markt gebrachten Verpackungen durch Hersteller, Importeure und Handel bei der Valorlux a.s.b.l. oder bei der Administration de l'environnement;
- eine Analyse der Anteile von Produkten aus BAK bei den regelmäßigen Abfalluntersuchungen in Luxemburg (Restabfallanalyse, Verpackungsabfälle, Störstoffanteile im Bioabfall);
- eine Befragung von Herstellern, Importeuren und Handel.

Generell verbessert sich die Ökobilanz von BAK, wenn diese stofflich hochwertig recycelt werden;

- Die Eigenkompostierung von BAK sollte nicht empfohlen oder gefördert werden. Ein sicherer Abbau auch von als garten- oder heimkompostierbar zertifizierten BAK ist aufgrund der Vielzahl der Einflussgrößen in der Fläche eher unwahrscheinlich. Es bestünde das Risiko, dass es zu einem Eintrag von nicht zersetzten Kunststoffen mit dem Kompost in Boden und Natur kommt.

Bezüglich weiterer Fragestellungen und Bewertungen im Zusammenhang mit den BAK werden folgende Hinweise gegeben:

- Ökobilanzielle Betrachtungen und Nachhaltigkeitsbewertungen von BAK kommen mehrheitlich zu dem Schluss, dass sie gegenüber herkömmlichen Kunststoffen bisher keinen Vorteil aufweisen. Insofern ist von einer allgemeinen Empfehlung zur Nutzung von Produkten aus BAK abzusehen. Für einzelne Verwendungsbereiche kann der Einsatz von BAK aber sinnvoll sein. Wie dargestellt, wird bioabbaubare Mulchfolie in Landwirtschaft und Gartenbau als eine solche Anwendungsmöglichkeit angesehen. Wenn Luxemburg sich dieser Einschätzung anschließt, sollte festgelegt werden, dass

nur nach der europäischen Norm 17033 geprüfte Folie für den Verbleib in der Fläche zugelassen wird. In welchem rechtlichen Rahmen eine entsprechende Regelung getroffen werden könnte, ist zu klären. Dabei wäre u.a. zu prüfen, ob zum Verbleib im Boden bestimmte Materialien als Abfall gelten oder nicht;

- Untersuchungen zum Abbau von BAK unter Praxisbedingungen in Kompostierungs- oder Vergärungsanlagen und in natürlichen Milieus zeigen tendenziell, wie die verschiedenen Arten von BAK dort abgebaut werden. Die Versuche zeigen aber auch, dass die spezifischen Prozessbedingungen bzw. die Standortverhältnisse, sowie die „Produktkonzeption“ (neben dem Basis-Kunststoff, die Art der Additive oder bei Blends die Art der Compounds, Materialstärke, etc.) großen Einfluss auf das Abbauverhalten haben. Eigene Abbauprobungen in Luxemburg mit hier auf dem Markt befindlichen Produkten aus BAK können weitere Erkenntnisse erbringen. Insbesondere wäre es interessant zu untersuchen, wie weit BAK, die bei der Kompostierung soweit zersetzt werden, dass sie im Kompost bei den vorgeschriebenen regelmäßigen Analysen nicht mehr in Partikelgrößen > 2 mm feststellbar sind, noch als kleinere Teilchen oder Mikroplastik vorliegen.
- Generell sind technische Entwicklungen denkbar, die zu einer anderen und besseren Bewertung von BAK unter den Gesichtspunkten Ökologie und Nachhaltigkeit führen. Hier sollte der Stand von Wissenschaft und Technik zeitnah beobachtet werden. Empfehlungen für die Verwendung von BAK oder ihre eventuelle weitergehende Förderung sollten abhängig von dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen in Luxemburg getroffen werden.

Abschließend sei darauf verwiesen, dass die Kunststoffproblematik zu einem zentralen Thema der europäischen und weltweiten Umweltpolitik geworden ist. Lösungsansätze und politische Programme, wie die Plastikstrategie der europäischen Kommission, sowie die Forschung in diesem Bereich bedingen eine zur Zeit sehr dynamische Entwicklung. Hierbei stellen die BAK aufgrund ihrer geringen Marktrelevanz derzeit eher noch einen Randaspekt dar. Dennoch könnten sich in diesem Segment Änderungen ergeben, die grundlegenden Einfluss auf eine zukünftige Bewertung haben.

- ADEME. (09 2016). *Plastiques biodégradable*. Von Les fiches techniques de l'ADEME:
https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique_plastiques_biodegradables-201609.pdf abgerufen
- Administration de l'Environnement. (2018). Mitteilung, Dezember 2018.
- Administration de l'Environnement. (2018). *Zusammenfassung der Jahresberichte 2017 der luxemburgischen Kompostierungsanlagen*. Von
https://data.public.lu/en/datasets/biodechets/#_ abgerufen
- Aöl - Assoziation ökologischer Lebensmittelhersteller. (15. 01 2015). *Biokunststoff-Tool*. Von Datenblatt Bio-PET:
http://biokunststofftool.aeel.org/fileadmin/aeel/BioVP_downloads/Datenblaetter/PET.pdf abgerufen
- Ass. Prof. Dr. Ines Fritz. (1 2018). Was sind biobasierte, biologisch abbaubare Werkstoffe (BAW)? *Müll und Abfall 1/2018*, S. 25 -29.
- ATSM International. (22. 10 2018). Von <https://www.astm.org/Standards/D5988.htm> abgerufen
- BUND Landesverband Mecklenburg Vorpommern. (2013). *Ökologische Kriterien bei der Nutzung landwirtschaftlicher Bio-Masse für Bio-Gas-Anlagen*.
- Bundesrat (Drucksache 224/18). (2018). *Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Verringerung der Auswirkungen bestimmter Kunststoffprodukte auf die Umwelt*.
- chemie.de. (Oktober 2018). *www.chemie.de*. Von www.chemie.de/lexikon/Polylactid.html abgerufen
- Consultic. (23. September 2016). *Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 - Kurzfassung* -. Von https://www.bkv-gmbh.de/fileadmin/documents/Studien/Consultic_2015__23.09.2016__Kurzfassung.pdf abgerufen
- Deutsche Umwelthilfe e.V. (DUH). (2018). *Bioplastik in der Kompostierung - Ergebnisbericht Umfrage*. Radolfzell.
- Deutschlandfunk. (19. 10 2018). Plastikmüll im Kompost.
- DIN - Deutsches Institut für Normung. (2011). *Biobasierte Produkte - Übersicht über Normen CEN/TR 16208:2011*.
- DIN CERTCO. (2016). *Zertifizierungsprogramm - Produkte aus kompostierbaren Werkstoffen für die Heim- und Gartenkompostierung*. Berlin: DIN CERTCO.
- DIN CERTCO, e. (2018). *Zertifizierung von Produkten*
http://www.dincertco.de/de/dincertco/produkte_leistungen/zertifizierung_produkte/umwelt_1/biobasierte_produkte/biobasierte_produkte_mehr_nachhaltigkeit.html.
- Douglas G. Hayes, Markus Flury. (Juni 2018). *Summary and Assessment of EN 17033:2018, a New Standard for Biodegradable Plastic Mulch Films*. Von
<https://ag.tennessee.edu/biodegradablemulch/Pages/default.aspx> abgerufen
- ECO-Conseil s.à.r.l. (2015). *Pilotversuch zur Einführung der getrennten Sammlung von organischen Küchenabfällen in den Gemeinden Grevenmacher und Betzdorf*.

- EUBP 2013. (kein Datum). *eupb_factsfigures_bioplastics_2013*. Von http://www.corbion.com/media/203221/eupb_factsfigures_bioplastics_2013.pdf abgerufen
- EUPB. (2018). *Bioplastics - facts and figures*. Berlin: European Bioplastics.
- Europäische Kommission. (2018). *Factsheet - Fragen und Antworten: Eine europäische Strategie für Kunststoffe*. Straßburg.
- Europäisches Komitee für Normung (CEN). (2009). *Kunststoffe - Bioabbaubare Kunststoffe in oder auf Böden - Verwertung, Entsorgung und verwandte Umweltthemen*. Brüssel: CEN.
- European Bioplastics. (2015). *Factsheet Energy recovery*.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). (2018). *Biokunststoffe (4. Auflage)*. Gülzow-Prüzen.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Projektträger). (2017). *Ergebnispapier - PLA-Abfälle im Abfallstrom*.
- FNR - Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V. (09 2018). *10 Punkte zu biobasierten Kunststoffen*. Von <https://biowerkstoffe.fnr.de/fileadmin/biopolymere/dateien/pdfs/BioKS-10-Punkte-final.pdf> abgerufen
- Forschungsgemeinschaft Biologisch abbaubare Werkstoffe e.V. / Staatliche Forschungsanstalt für Gartenbau Weißenstephan. (2009). *Biologisch abbaubare Mulchfolien aus nachwachsenden Rohstoffen*.
- Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik. (23. 07 2018). *Mikroplastik – überall und in großen Mengen, Pressemitteilung*. Von <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2018/konsortialstudie-mikroplastik.html> abgerufen
- Görmer, M. (16. 08 2018). *IfBB-Webinarreihe "Biowerkstoffe im Fokus"*. Von Harmonisierung von Ökobilanzregeln für biobasierte Werkstoffe: https://www.ifbb-hannover.de/files/IfBB/downloads/webinarreihe/20180816_Webinar_23_Harmonisierung_von_Oekobilanzregeln_fuer_biobasierte_Werkstoffe.pdf abgerufen
- IfBB . (2017). *Biopolymers - facts and statistics 2017*. Hannover: Institut für Biokunststoffe und Biowerkstoffe der Universität Hannover.
- IfBB. (05. November 2018). *FAQ . Von Stehen die Anbauflächen für Rohstoffe zur Produktion von Biokunststoffen und Lebensmittel in Konkurrenz zueinander?:* <https://www.ifbb-hannover.de/de/faq/stehen-die-anbauflaechen-fuer-rohstoffe-zur-produktion-von-biokunststoffen-und-lebensmittel-in-konkurrenz-zueinander.html> abgerufen
- IfBB, Institute for Bioplastics and Biocomposites. (18. 01 2018). *Webinar 16 - Marktzahlen und Marktentwicklung biobasierter und bioabbaubarer Kunststoffe (18.01.2018)*. Von https://www.ifbb-hannover.de/files/IfBB/downloads/webinarreihe/20180118_Webinar_16_Marktzahlen.pdf abgerufen
- ifeu (ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH). (2012). *Untersuchung der Umweltwirkungen von Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen - Endbericht*. Heidelberg.

- (2015). *LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte - Article 75*.
- Material Archiv. (04. Oktober 2018). *Thermoplastische Stärke: Material Archiv*. Von <http://www.materialarchiv.ch/app-tablet/#detail/1790/thermoplastische-staerke-> abgerufen
- M-Base Engineering und Software GmbH. (24. 10 2018). *Material Data Center*. Von <https://www.materialdatacenter.com/mb/main/page/9?key=Mater%20BI> abgerufen
- Mémorial A330. (27. 03 2017). *Loi du 21 mars 2017 relative aux emballages et aux déchets d'emballages*. Von environnement.public.lu:
https://environnement.public.lu/fr/emweltprozeduren/Autorisations/Gestion_des_dechets_et_ressources/Rapports_annuels_RA.html abgerufen
- Milhahn K. (November 2018). *Umweltkatastrophe Palmöl. GEO*.
- Minett Kompost. (31. 10 2018). *Le fonctionnement de l'usine Minett Kompost*. Von <https://minett-kompost.lu/fabrik-minett-kompost/> abgerufen
- N. Weithmann, J. N. Möller, M. G. J. Löder, S. Piehl, C. Laforsch, R. Freitag,. (2018). *Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. Sci. Adv. 4, eaap8060*.
- Niedersächsisches Umweltministerium, Expertenkommission. (1999). *Kunststoffindustrie in Niedersachsen am Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung*.
- nova-Institute/narocon. (2016). *Market study on the consumption of biodegradable and compostable plastic products in Europe 2015 and 2020*. 2016 nova-Institut GmbH.
- Partner BMEL-Verbundvorhaben Nachhaltige Verwertungsstrategien für Produkte und Abfälle aus biobasierten Kunststoffen. (2018). *PLA-Abfälle*.
- Plastics Europe. (2018). *Plastics - the Facts 2017*. Brüssel: Plastics Europe Association of Plastic Manufacturers und European Association of Plastics Recycling Recovery Organisations.
- Rausen T. et al. (2016). *Optionen zur Reduktion von Fremdstoffen bei Biogutvergärungen. In Tagungsband - Kasseler Abfallforum 2016 (S. 203 -217)*.
- SP Technical Research Institute of Sweden . (2010). *Certification rules for classification for treatment of*. Von http://www.biodeg.org/SPCR_141_EN.pdf abgerufen
- TÜV AUSTRIA. (2012). *Program OK 2 Home compostability of products*.
- TÜV AUSTRIA. (22. Oktober 2018). *Program OK 10 -Bio products - degradation in soli*. Von http://www.tuv-at.be/fileadmin/user_upload/docs/download-documents/english/Program_OK_10e_c_OK_biodegradable_SOIL.pdf abgerufen
- Umweltbundesamt. (2009). *Hintergrundpapier - Biologisch abbaubare Kunststoffe*.
- Umweltbundesamt. (2017). *Kurzposition Biokunststoffe*. Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt, Hrsg. (2009). *Biologisch abbaubare Kunststoffe*. Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt, Hrsg. (2018). *Gutachten zur Behandlung biologisch abbaubarer Kunststoffe*. Dessau-Roßlau.
- Valorlux. (2017). *Rapport annuel 2016*. Capellen.
- Valorlux a.s.b.l. und ECO-Conseil S.à.r.l. . (Oktober 2018). *Mündliche Auskunft*.

Venkatachalam V. (14. 12 2016). *Biowerkstoffe im Fokus: Nachhaltigkeitsbewertung von biobasierten Kunststoffen*. Von Webinarreihe der Forschernachwuchsgruppe an der Hochschule Hannover: https://www.ifbb-hannover.de/files/IfBB/downloads/webinarreihe/20161214-Webinar-4_Biowerkstoffe-im-Fokus_Nachhaltigkeit.pdf abgerufen

Wacker Chemie AG. (Oktober 2018). *PBS-Anwendungen - Wacker Chemie AG*. Von https://www.wacker.com/cms/de/industries/plastics/co_binder/pb/mcppbs_anwendungen.jsp abgerufen

WfBR. (2017). *Bio-based and biodegradable plastics – Facts and Figures*.

Wien, Medizinische Universität. (Oktober 2018). Erstmals Mikroplastik im Menschen nachgewiesen: <https://www.meduniwien.ac.at/web/ueber-uns/news/detailseite/2018/news-im-oktober-2018/erstmals-mikroplastik-im-menschen-nachgewiesen/> abgerufen

Wissenschaftlicher Dienst des Bundestages, F. W. (2015). *Biologisch abbaubare Kunststoffe*. Berlin.