biowerkstoffe.fnr.de

BIOKUNSTSTOFFE

PFLANZEN
ROHSTOFFE
PRODUKTE

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

FNR
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

IMPRESSUM

Herausgeber
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)
OT Gülzow, Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen
Tel.: 03843/6930-0
Fax: 03843/6930-102
info@fnr.de
www.fnr.de

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und
Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Text
Dr. Michael Thielen, bioplastics MAGAZINE

Redaktion
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR),
Abteilung Öffentlichkeitsarbeit

Bilder
Titel: FNR/Britta Autzen
Sofern nicht am Bild vermerkt: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)

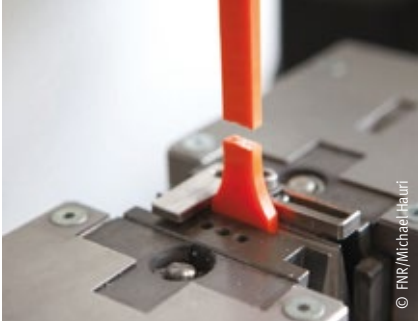
Gestaltung/Realisierung
www.tangram.de, Rostock

Druck
www.mkl-druck.de, Ostbevern

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier mit Farben auf Pflanzenölbasis

Bestell-Nr. 224
7., überarbeitete Auflage
FNR 2020

BIOKUNSTSTOFFE



INHALT

1	**Biokunststoffe, was ist das eigentlich?**	**4**
1.1	Grundlegendes	4
1.2	Biokunststoffe = biobasierte Kunststoffe	5
1.3	Normen und Zertifizierung: „biobasiert“	6
2	**Nachwachsende Rohstoffe**	**8**
2.1	Einführung	8
2.2	Natürliche Polymere	8
2.3	Weitere biogene Rohstoffe	9
2.4	Woher kommen die Rohstoffe	10
3	**Biokunststoffe**	**13**
3.1	Einführung	13
3.2	Modifizierte natürliche Polymere	14
3.3	Aus biobasierten Monomeren synthetisierte biobasierte Polymere	19
4	**Kunststoff-Verarbeitungsverfahren**	**30**
4.1	Einführung	30
4.2	Compoundieren	31
4.3	Weiterverarbeitung	31
5	**Anwendungen**	**39**
5.1	Verpackungen	39
5.2	Gartenbau und Landwirtschaft	41
5.3	Medizin und Körperpflege	42

© Sergey Nivens/Fotolia.com

© FNR/Britta Auzen

5.4 Unterhaltungselektronik 42
5.5 Automobilbau 43
5.6 Textil 44
5.7 Bauen und Wohnen 45
5.8 Spiel und Sport 46
5.9 Haushalt 48

6 Recycling – Verwertung – Entsorgung 49
6.1 Relevante deutsche Gesetze und Verordnungen 50
6.2 Recycling 50
6.3 Energetische Verwertung 52
6.4 Biologische Behandlung 53

7 Markt 56
7.1 Übersicht 56
7.2 Marktzahlen 56

8 Anhang 59
8.1 Internet-Informationsquellen 59
8.2 Quellenangaben 59
8.3 Abkürzungsverzeichnis 65
8.4 Stichwortverzeichnis 66

1 BIOKUNSTSTOFFE, WAS IST DAS EIGENTLICH?

1.1 Grundlegendes

Kunststoffe sind organische Polymere[1], die sich vielfältig verarbeiten lassen. Ihre technischen Eigenschaften wie Formbarkeit, Härte, Elastizität, Festigkeit, Wärmeformbeständigkeit und chemische Beständigkeit lassen sich durch die Wahl der Ausgangsmaterialien, Herstellungsverfahren und Beimischung von Additiven in weiten Grenzen variieren. Kunststoffe sind leichter und ökonomischer als viele andere Werkstoffe. Diese Eigenschaften und ihre extrem flexible und gute Verarbeitbarkeit machen sie für viele industrielle und gewerbliche Anwendungen zur ersten Wahl [2]. Seit der massenhaften Verfügbarkeit von Erdöl im frühen 20. Jahrhundert werden die meisten traditionellen Kunststoffe aus diesem fossilen Rohstoff hergestellt.

Kunststoff- bzw. Polymerprodukte kommen als Strukturpolymere in werkstofflichen Anwendungen zum Einsatz, was wir gemeinhin als Kunststoff, Plastik oder auch Plaste bezeichnen. Demgegenüber werden Funktionspolymere für nicht-werkstoffliche Anwendungen eingesetzt. Dies ist beispielsweise der Einsatz als Papieradditiv, Klebstoff, Lackharz, Verdickungsmittel und vieles mehr. Auch wenn der Anteil an biobasierten Rohstoffen (hierzu später mehr) bei den Funktionspolymeren deutlich höher ist als bei den Strukturpolymeren, liegt das Hauptaugenmerk dieser Broschüre auf den Strukturpolymeren, also den Kunststoff-Werkstoffen, die im Weiteren gemeint sind, wenn von Kunststoffen geschrieben wird.

Die Statistik ist beeindruckend: Die Kunststoffindustrie beschäftigt mehr als 1,6 Mio. Menschen in der Europäischen Union und setzt jährlich über 360 Milliarden Euro um. Von den weltweit erzeugten 359 Mio. Tonnen Kunststoffen stammt etwas mehr als ein Fünftel aus Europa und davon wiederum ein Viertel aus Deutschland. Nicht nur für Verpackungen (40 %) und Baumaterialien (20 %), sondern auch zur Automobil- (10 %) und Möbelherstellung sowie von der Elektroindustrie und der Haushaltswarenherstellung werden sie benötigt (Statistik Stand 2019) [3]. Und der Verbrauch steigt weiter kontinuierlich an.

Kunststoff ist allerdings nicht gleich Kunststoff: während duromere Kunststoffe vernetzt sind und daher nach dem Aushärten für immer fest bleiben, lassen sich thermoplastische durch Erwärmen verformen oder schmelzen. Diese thermoplastischen Kunststoffe sind mit einem Marktanteil von 80 % am weitesten verbreitet. Eine weitere Gruppe von Kunststoffen sind die dehnbaren oder gummielastischen Elastomere [1].

[1] *Polymere (von griech. Poly = viele, meros = Teilchen) sind chemische Verbindungen aus langkettigen oder verzweigten Molekülen (Makromoleküle), die wiederum aus gleichen oder gleichartigen Einheiten, den sogenannten Monomeren, bestehen, und auch verzweigt sein können.*

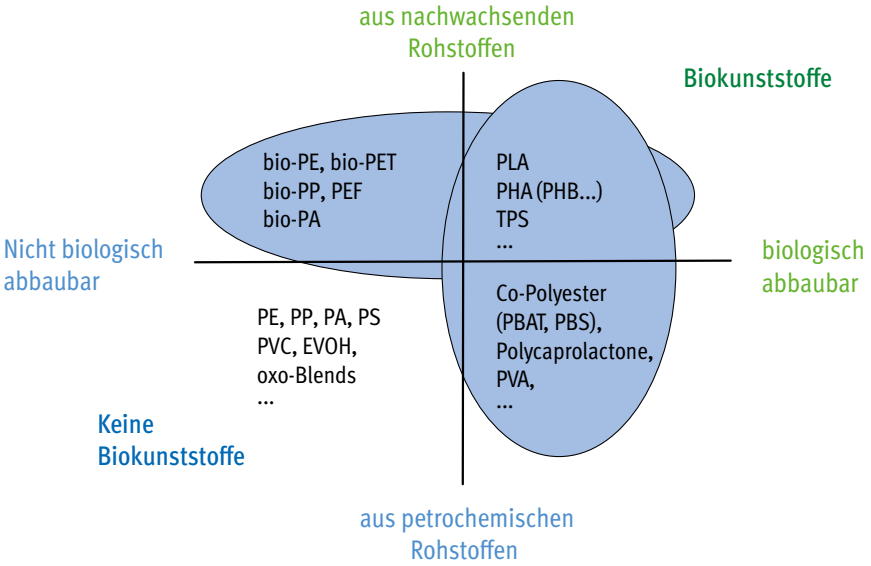
1.2 Biokunststoffe = biobasierte Kunststoffe

Biobasierte Kunststoffe bestehen zu einem wesentlichen Anteil oder vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen. Oft werden sie kurz auch als Biokunststoffe bezeichnet.

Die ersten modernen Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, die Ende der 1980er Jahre auf den Markt kamen, waren in der Regel biologisch abbaubar. Daraus ergab sich, dass der Begriff „Biokunststoff“ oft weniger mit der nachwachsenden Rohstoffbasis, sondern mit der Eigenschaft „biologisch abbaubar“ verknüpft wurde.

Aus heutiger Sicht ist die biologische Abbaubarkeit kein zwingendes Kriterium für einen Biokunststoff, sondern lediglich eine spezielle Eigenschaft einiger Bio-, aber auch einiger petrochemischer Kunststoffe.

BIOBASIERTE UND BIOABBAUBARE KUNSTSTOFFE



Quelle: Technische Biopolymere (Endres, Siebert-Raths) [5], modifiziert durch M. Thielen

© FNR 2020

Abb. 1.1: Biobasierte und bioabbaubare Kunststoffe

1.3 Normen und Zertifizierung: „biobasiert“

Biobasiert bzw. biogen bedeutet, dass ein Produkt ganz oder teilweise aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird [4].

Nachwachsende Rohstoffe wiederum sind organische Rohstoffe, die aus land- und forstwirtschaftlicher Produktion stammen und vom Menschen zielgerichtet für Anwendungszwecke außerhalb des Nahrungs- oder Futterbereiches verwendet werden.

Für Produkte, die nur teilweise aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen, ist es unter Umständen (z. B. bei der Vergabe von Zertifikaten) erforderlich, den genauen biobasierten Anteil zu kennen. Dieser lässt sich mithilfe der Radiocarbonmethode ermitteln. In der amerikanischen Norm ASTM D6866, auf die sich auch die deutschen Zertifizierungen stützen, ist die genaue Vorgehensweise festgelegt [65].

Die Methode macht sich zu Nutzen, dass in unserer Atmosphäre ständig winzige Spuren des radioaktiven Kohlenstoffisotops ^{14}C (Radiokarbon) gebildet werden. ^{14}C wird zu $^{14}CO_2$ oxidiert und gelangt über die Fotosynthese in Mikroorganismen und Pflanzen, von wo aus es seinen Weg in die verschiedenen Biomassen findet. ^{14}C zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa 5.000 Jahren.

Daher ist es in frischer Biomasse zu finden, nicht dagegen in fossilen Kohlenstoffquellen, wie z. B. Erdöl.

Bei der Angabe des biobasierten Anteils diskutieren Experten zwei unterschiedliche Ansätze. So wird zum einen nur der Kohlenstoff-Anteil des Produkts betrachtet und der biobasierte Anteil als Anteil des biobasierten Kohlenstoffs am Gesamtkohlenstoff angegeben. Die andere Betrachtungsweise berücksichtigt den gesamten biobasierten Massen-Anteil, also auch biobasierten Sauerstoff, biobasierten Wasserstoff und biobasierten Stickstoff, im Verhältnis zum nicht biobasierten Anteil.

Beide Betrachtungsweisen haben Vor- und Nachteile [14] — je nach Blickwinkel des Betrachters. Deshalb gelten beide als wichtig und notwendig.

Die hier angeführten Zertifizierungsprogramme beziehen sich auf den Kohlenstoffanteil.

TÜV Austria (früher Vinçotte) bietet mit dem OK-biobased Logo eine Zertifizierung an, bei der der biobasierte Kohlenstoffanteil mit ein bis vier Sterne (* 20–40 %/**40–60 %/***60–80 %/**** mehr als 80 %) gekennzeichnet wird (Bild 1.1).

Bild 1.1: OK-biobased Logo (TÜV Austria)

Auch der deutsche Zertifizierer DIN CERTCO vergibt ein Zertifikat, bei dem der Kohlenstoffanteil in Prozentwert-Gruppen angegeben wird (Bild 1.2).

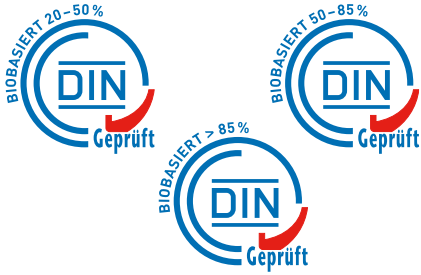


Bild 1.2: Biobasiert-Logos (DIN CERTCO)

In den USA gibt es seit einigen Jahren ein Programm, das unter der Bezeichnung „BioPreferred®“ die öffentliche Hand verpflichtet, Produkte mit einem möglichst hohen Anteil an nachwachsenden Rohstoffen zu kaufen. Im Rahmen dieses Programmes entstand auch ein Zertifizierungssystem, das auf den nach ASTM D6866 ermittelten Werten aufbaut und das „USDA CERTIFIED BIOBASED PRODUCT“ Logo mit Prozentangabe vergibt.

Mittlerweile wird auch in Deutschland überlegt, wie die öffentliche Hand angehalten werden kann, verstärkt Produkte einzusetzen, die zu einem großen Anteil aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden.

2 NACHWACHSENDE ROHSTOFFE

2.1 Einführung

Biokunststoffe lassen sich aus einer Vielzahl pflanzlicher Rohstoffe herstellen. Zum einen können natürliche Polymere, also Makromoleküle, die in der Natur vorkommen, genutzt werden. Zum anderen dienen kleinere Moleküle, wie Zucker, Disaccharide und Fettsäuren, als Ausgangsbasis für die Produktion. Alle diese nachwachsenden Rohstoffe können auf unterschiedliche Weise gewonnen, modifiziert und zu biobasierten Kunststoffen weiterverarbeitet werden.

2.2 Natürliche Polymere

Unter natürlichen Polymeren (Biopolymeren) verstehen wir von Lebewesen synthetisierte Polymere. Dies können beispielsweise Polysaccharide, Proteine oder Lignin sein, die als Energiespeicher dienen oder eine strukturelle Funktion für die Zelle oder den gesamten Organismus haben [2].

Die im Folgenden kurz vorgestellten natürlich vorkommenden Biopolymere können grundsätzlich für die Herstellung von biobasierten Kunststoffen verwendet werden.

2.2.1 Polysaccharide

Zu den Polysacchariden (Mehrfachzucker oder Vielfachzucker) gehören einige der wichtigsten organischen Verbindungen. Cellulose, als Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände, ist ein unverzweigtes Biopolymer, das aus einigen hundert bis zu zehntausenden Glukose-Bausteinen besteht. In der Pflanze lagern sich diese hochmolekularen Ketten zu höheren Strukturen zusammen, die als reißfeste Fasern auch statische Funktionen haben [2, 5, 16]. Bei Baumwollfasern liegt der Celluloseanteil bei 88–96 % [2], Holz besteht zu 41–52 % aus Cellulose [97].

Stärke wird als Energiespeicher in Pflanzen gebildet. Sie besteht aus zwei Komponenten, dem verzweigten Amylopektin und der unverzweigten Amylose.

Ein wichtiges, nicht pflanzliches Polysaccharid ist Chitin. Bei Pilzen bildet es einen Hauptbestandteil der Zellwände, bei Gliedertieren (u. a. Insekten und Spinnentiere) ist es Hauptbestandteil des Exoskeletts.

2.2.2 Proteine

Proteine sind aus Aminosäuren aufgebaute Biopolymere. Sie kommen in allen Lebewesen vor und dienen dem Stofftransport, als Struktur verleihende Gerüstsubstanz, Signalstoffe oder Katalysatoren.

Zu den Proteinen gehört Casein (oder Kasein) aus der Milch von Säugetieren. Gluten (auch Kleber oder Klebereiweiß) ist ein Gemisch aus verschiedenen Proteinen, das in Getreidekörnern vorkommt. Collagen ist ein Strukturprotein des Bindegewebes (z. B. Haut, Zähne, Sehnen, Bänder oder Knochen) vieler höherer Lebewesen. Es ist der Hauptgrundstoff für die Herstellung von Gelatine.

Bild 2.1: Stärke aus Kartoffeln und Getreide

2.2.3 Lignin

Lignin ist ein dreidimensional vernetztes aromatisches Makromolekül. Der feste farblose Stoff ist in der pflanzlichen Zellwand eingelagert und bewirkt die Verholzung (Lignifizierung) von Gräsern, Stauden, Sträuchern, Bäumen etc. Neben Cellulose ist Lignin der häufigste organische Stoff der Erde. Als Nebenprodukt der Zellstoffindustrie fällt Lignin weltweit jährlich zu etwa 50 Mio. Tonnen an [8]. Der Großteil davon wird heute zur Energieerzeugung verbrannt.

2.2.4 Naturkautschuk

Ein elastisches Biopolymer ist Naturkautschuk, der in erster Linie aus dem Milchsaft (Latex) bestimmter Bäume, wie Kautschukbaum, Balata oder Guttapercha gewonnen wird. Naturkautschuk ist der wichtigste Rohstoff zur Herstellung von Gummi, der durch Vulkanisierung daraus hergestellt wird.

2.2.5 Sonstige

Eine interessante Gruppe von Biopolymeren sind die Polyhydroxyalkanoate (PHA), Polyester, die in bestimmten Mikroorganismen als Energiespeicher gebildet werden (siehe Kap. 3.2.5).

2.3 Weitere biogene Rohstoffe

2.3.1 Pflanzenöle

Pflanzenöle bestehen in der Regel aus Glycerin und verschiedenen Fettsäuren. Sie finden Verwendung in der menschlichen und tierischen Ernährung, als Schmierstoff und vor allem auch als Energieträger. Insbesondere die enthaltenen Fettsäuren sind aber auch eine interessante Rohstoffquelle zur Herstellung von Biokunststoffen.

2.3.2 Kohlenhydrate

Über die oben genannten Substanzen hinaus können noch eine Reihe weiterer Kohlenhydrate wie Monosaccharide (wie Glukose und Fruktose) oder Disaccharide (wie Saccharose) als Ausgangsstoffe für die Produktion von biobasierten Kunststoffen dienen.

Auch bestimmte zweiwertige Alkohole, die als Bausteine für die Herstellung (teilweise) biobasierter Kunststoffe herangezogen werden können, sind aus nachwachsenden Rohstoffen herstellbar. So wird seit einigen Jahren biobasiertes 1,3-Propandiol als Bio-PDO und bald auch 1,4-Butandiol als Bio-BDO aus nachwachsenden Rohstoffen wie z. B. Maisstärke vermarktet [9, 10].

Ein wichtiger Baustein, der zur Herstellung von Biokunststoffen eingesetzt wird, ist die Bernsteinsäure ($C_4H_6O_4$), die sich auch fermentativ aus Stärke und verschiedenen Oligosacchariden herstellen lässt.

Das derzeit wirtschaftlich wichtigste Monomer ist Milchsäure, aus der Polylactid (PLA), sprich Polymilchsäure, hergestellt wird (siehe Kap. 3.3.1).

Der weltweit häufigste Massenkunststoff ist das Polyethylen (PE). Dessen Monomer Ethylen wird heute zumeist durch Steamcracken von Kohlenwasserstoffen, wie z. B. Naphta (Erdöl), aber auch aus Ethan, Propan und Flüssiggas gewonnen. Durch die Dehydrierung von zuckerrohrbasiertem Bio-Ethanol kann ein biobasiertes Ethylen für die Herstellung von Bio-Polyethylen gewonnen werden (siehe Kap. 3.3.4).

2.4 Woher kommen die Rohstoffe

2.4.1 Agrar- und Forstrohstoffe

Eine vielfach geführte Diskussion ist der potenzielle Konflikt der Nutzung von Nahrungs- oder Futtermitteln zur Herstellung von Bioenergie oder Biokraftstoffen. Wenn auch im ungleich geringeren Maßstab trifft dies auch für die industriell-stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen zu, wie eben den Biokunststoffen. So wird immer wieder die Frage nach der Verfügbarkeit von Agrarflächen gestellt und in dem Zusammenhang über den Hunger in der Welt diskutiert. Da dies ein sehr sensibles Thema ist, sollen hierzu ein paar Zahlen und Fakten zusammengetragen werden.

Wichtig ist es, in dem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass wir für die nächsten Jahre von einem geringen Marktvolumen für Biokunststoffe sprechen. Erst für längerfristige Szenarien werden zweistellige Marktanteile erreicht. Entsprechend sollten wir uns darüber im Klaren sein, dass es bei dieser Diskussion vor allem um die langfristige Verfügbarkeit von Agrarflächen zur nachhaltigen Erzeugung von Rohstoffen für Biokunststoffe geht. Um ein Gefühl für die Größenordnung der langfristig benötigten Flächen zu bekommen, sollte man sich vor Augen halten, dass derzeit zwischen 3 und 4 % des Erdölbedarfs in die Produktion von Kunststoffen fließen. Der allergrößte Teil des genutzten Erdöls wird also energetisch genutzt [55].

Je nach Biokunststoff-Typ, genutzter Pflanzenart und dem jeweiligen landwirtschaftlichen Ausgangsmaterial lassen sich von nachwachsenden Rohstoffen, die von einem Hektar Ackerfläche gewonnen werden können, durchschnittlich zwei bis vier Tonnen Biokunststoff produzieren [57, 58]. Ge-

mäß den Schätzungen in Kap. 7.2 ist demnach davon auszugehen, dass für die 2024 prognostizierte weltweite Produktionskapazität an Biokunststoffen rund 1 Mio. Hektar landwirtschaftlicher Fläche benötigt werden. Dies entspricht etwa 0,02 % der weltweit landwirtschaftlich genutzten Fläche von ca. 4,7 Mrd. Hektar [57].

Für langfristige Szenarien, bei denen tatsächlich die weltweite Kunststoffproduktion weitestgehend auf biobasierte Kunststoffe umgestellt wird, würden dazu 4–7 % der weltweit zur Verfügung stehenden Landwirtschaftsfläche benötigt [55].

Nicht berücksichtigt ist in diesen Szenarien, dass die Forstwirtschaft ebenfalls ein wichtiger Rohstoff-Lieferant für biobasierte Kunststoffe ist. Aus der Nutzung von Cellulose und zunehmend auch Lignin ergibt sich keine Konkurrenzsituation zu Nahrungs- und Futtermitteln.

2.4.2 Nutzung von Rest- und Abfallstoffen

Um den zukünftigen Flächenbedarf so gering wie möglich zu halten, arbeiten Forschung und Industrie mit Hochdruck daran, dass für die Produktion von Biokunststoffen zukünftig vor allem Rest- und Nebenstoffe der Agrar- und Forstwirtschaft genutzt werden.

Die Herausforderung besteht darin, perspektivisch die Produktions-, Verarbeitungs- und Vermarktungsstrukturen entlang der gesamten Wertschöpfungskette so weiter zu entwickeln, dass eine Balance zwischen Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit unter der Prämisse einer bevorzugten Nahrungsmittelbereitstellung und unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten bei Biokunststoffen sichergestellt wird.

Ein Beispiel kommt aus den Niederlanden, wo es eine florierende Kartoffelindustrie (Pommes-Frites) gibt. Beim industriellen Schälen und Schneiden der Kartoffeln fällt neben den Schalen eine große Menge an Schnittwasser an. Dieses Prozesswasser enthält wie die Schalen und weitere Abfälle einen hohen Anteil an nutzbarer Stärke. So gibt es u. a. in den Niederlanden und in Deutschland Unternehmen, die aus so gewonnener Stärke Kunststoff produzieren.

In Neuseeland und in den Niederlanden wird Polyhydroxyalkanoat (PHA) versuchsweise im Labormaßstab erzeugt, wobei die „Nahrung“ für die PHA erzeugenden Bakterien aus kommunalen Abwässern gewonnen wird [25, 69].

Ein großer Markenartikel-Hersteller hat vor einigen Jahren erfolgreich das Frittierfett von Kartoffelchips nach der Nutzungsdauer als „Nahrung“ für PHA erzeugende Mikroorganismen eingesetzt. So wurde aus altem Frittierfett ein hochwertiger Kunststoff [41]. Ein tschechisch/chinesisches Unternehmen entwickelt derzeit die großtechnische Umsetzung von gebrauchtem Frittierfett aus gastronomischen Betrieben in PHA-Biokunststoffe [70].

Schwarzlauge, ein Abfallprodukt der Zellstoffindustrie enthält neben Lignin (vgl. Kap. 3.2.3)

auch sogenannte Tallöle. Die Produkte aus der Talllöldestillation finden in der weiterverarbeitenden Industrie vielfältig Verwendung. So können Tallölfettsäuren (TOFA) in der Regel für die gleichen Zwecke verwendet werden wie andere Fettsäuren. Sie kommen als Rohstoffe für Lacke, Polyamidharze für die Druck- und Klebstoffindustrie und Epoxidharze zum Einsatz. In der Gummiindustrie werden Tallharze als Emulgiermittel bei der Herstellung von synthetischem Kautschuk verwendet. Dimerfettsäuren aus Tallölfettsäuren können zudem mit Diaminen zu Polyamiden umgesetzt werden.

Ein weiterer Trend ist die Biomassevergasung zu Synthesegas. Durch eine nachfolgende chemische oder biotechnologische Umwandlung des so gewonnenen Synthesegases können auch Biopolymer-Monomere erzeugt werden. Beide Wege sind aber noch im Forschungsstadium. Ein chemischer Weg könnte über die Umwandlung von Synthesegas zu Ethanol und schließlich zu Ethylen und dann zu Polyethylen führen (vgl. Kap 3.3.4). Derzeit wird jedoch eher der biotechnologische Weg intensiv verfolgt, der Synthesegas als Kohlenstoffquelle für Mikroorganismen nutzt, wobei durch Fermentation Polymermonomere gebildet werden können [2, 11, 12].

Die Produktion von biobasierten Polyoleofinen (PE, PP) (s. a. Kap. 3.3.4) aus Bio-Naphtha wurde 2018 von einem finnischen Chemieunternehmen in Kooperation mit Kunststoff- und Produktherstellern angekündigt. Bio-Naphtha fällt entweder als Nebenprodukt bei der Erzeugung von biobasiertem Dieselkraftstoff an, oder es wird aus nachhaltig erzeugten Pflanzenölen sowie aus gebrauchten Speiseölen hergestellt. Nach dem Start einer Pilotanlage im Herbst 2018 wurde im Juni 2019 die parallele Produktion von biobasiertem Polypropylen und Polyethylen in kommerziellem Maßstab an einen deutschen Standort bekannt gegeben. Im März 2020 folgte dann die Bekanntgabe der Produktion von biobasiertem Polypropylen in Belgien [98, 99, 100, 101, 102].

3 BIOKUNSTSTOFFE

3.1 Einführung

Kunststoffe wurden nicht immer aus fossilen Rohstoffen hergestellt. Ganz im Gegenteil: die ersten Kunststoffe waren biobasierte Kunststoffe.

Als erster „Kunststoff“ der Welt gilt Celluloid, erfunden 1855 vom Engländer Alexander Parkes und zunächst unter dem Namen Parkesine veröffentlicht [13]. Ein Preisausschreiben gab damals den legendären Anstoß für die Entwicklung eines Kunststoffes, der das teure Elfenbein in den Billardkugeln ersetzen sollte. Celluloid aus Cellulosenitrat und Campher machte das Rennen und wurde rasch auch für fotografische Filme, dekorative Manufakturware, Brillengestelle, Kämme, Tischtennisbälle und andere Produkte verwendet [1].

Bild 3.1: Haarnadel 1920/1950 aus Celluloid

Vom Ende des 19. Jahrhunderts bis in die 1930er Jahre war Casein, ein Protein aus Milch, u. a. ein Rohstoff für den Kunststoff Galalith, der beispielsweise für Knöpfe und Schmuck, aber auch zu Isolationszwecken für elektrische Anlagen verwendet wurde [2].

Bild 3.2: Knöpfe 1920/1940 aus Casein

In den 1910er Jahren experimentierte Henry Ford in den USA mit Weizen und Soja. Eine der ersten Serienanwendungen war eine Starterbox des 1915er T-Modell-Fords. In der Folge versuchte Ford viele Anwendungen für Produkte aus Sojaöl umzusetzen, wie z. B. Farben und Lackierungen, als Gummiersatz und für die Produktion von Polsterstoffen.

Diese frühen Biokunststoffe verloren im Zuge des Erdölbooms schnell an Bedeutung. Erst ab 1980, und verstärkt nach der Jahrtausend-

wende setzten Forschung und Entwicklung von Biokunststoffen wieder ein. Dabei stand zunächst die biologische Abbaubarkeit und Kompostierbarkeit überwiegend erdölbasierter Kunststoffe im Mittelpunkt des Interesses. Inzwischen setzt sich allerdings zunehmend die Erkenntnis durch, dass die Kompostierbarkeit nur dort sinnvoll ist, wo sie einen echten Zusatznutzen erbringt, und nicht nur eine weitere Entsorgungsvariante darstellt.

Die Renaissance der Biokunststoffe begann mit Entwicklungen auf der Basis von Stärke (sogenannten Stärkeblends). Stärke wird zudem, nach hydrolytischer Spaltung in Traubenzucker (Glukose), auch als Rohstoff für Fermentationsprozesse eingesetzt. Auf diese Weise werden neuere Biokunststoffe wie Polylactid (PLA) oder Polyhydroxyalkanoat (PHA) erzeugt (siehe Kap. 3.3.1 und 3.2.5). Zucker ist auch der Rohstoff für die aktuell letzte Generation von Biokunststoffen, den biobasierten Polyolefinen Polyethylen (PE), bald auch Polypropylen (PP) sowie dem teilweise biobasierten Polyester Polyethylenterephthalat (PET, siehe Kap. 3.3.4 und 3.3.1) und dem neu entwickelten Polyethylenfuranoat (PEF, siehe Kap 3.3.1), die aufgrund ihres chemischen Aufbaus nicht biologisch abbaubar sind.

Weitere Beispiele für teil-biobasierte Kunststoffe sind einige Biopolyamide. So wird von einer ganzen Reihe von Herstellern Polyamid 6.10 angeboten, wobei die zur Herstellung benötigte Dicarbonsäure aus Rizinus- oder Sojaöl (über Sebacinsäure) hergestellt wird, das Diamin jedoch petrochemisch. Aber auch vollständig biobasierte Polyamide sind verfügbar (siehe Kap. 3.3.2).

Blends aus biobasierten und petrochemischen Kunststoffen sind beispielsweise Mischungen aus PLA (100 % biobasiert) und PBAT (Polybutylen-Adipat-Terephthalat).

Auch wenn es das erklärte Ziel vieler Unternehmen und Forscher ist, Kunststoffe möglichst vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen herzustellen, so sind doch alle Ansätze in Richtung teil-biobasierter Kunststoffe immer Schritte in die richtige Richtung.

3.2 Modifizierte natürliche Polymere

3.2.1 Polysaccharid-basierte Kunststoffe

3.2.1.1 Thermoplastische Stärke

Zur Herstellung von Thermoplastischer Stärke (TPS) werden Stärkekörner durch Extrusionsprozesse destrukturiert [1, 2]. Um die Stärke zu destrukturieren, d.h. ihre granuläre Struktur und ihre Kristallinität zu zerstören, werden sogenannte Weichmacher sowie mechanische Energie und Wärme eingesetzt [15]. Geeignete Weichmacher sind z.B. Wasser (in Anteilen unter 45 %), Glycerin und Sorbitol.

3.2.1.2 Cellulose-basierte Kunststoffe

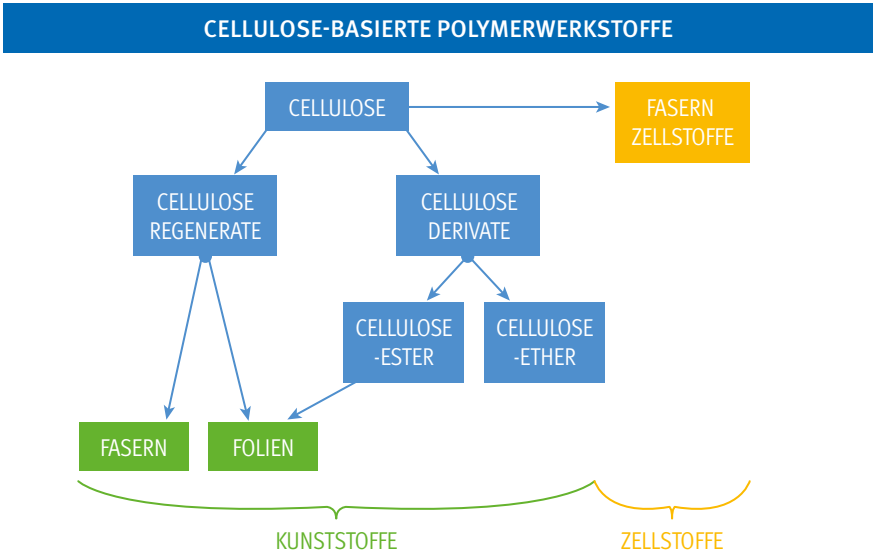
Cellulose kann in Form von Celluloseregeneraten und Cellulosederivaten industriell genutzt werden (Abb. 3.1).

Bild 3.3: Zellglas – glasklares Celluloseprodukt

Celluloseregenerate

Wird Cellulose chemisch gelöst und neu in Form von Fasern oder Folien zusammengesetzt, so spricht man von Celluloseregeneraten. Die bekanntesten Vertreter dieser Stoffgruppe sind Viskose, Viskoseseide, Zellwolle, Rayon, Lyocell oder Kunstseide und einige mehr auf dem Gebiet der Fasern und Textilien. Der Anteil cellulosischer Chemiefasern lag 2018 weltweit bei 9,2 % (6,8 Millionen Tonnen) [17].

Im Bereich der Folien ist das bekannteste Celluloseregenerat Cellulosehydrat oder auch Zellglas (früherer Markenname Cellophan) (siehe Bild 3.3) [5].



Quelle: Technische Biopolymere (Endres, Siebert-Raths) [5], modifiziert durch FNR © FNR 2020

Abb 3.1: Cellulose-basierte Polymerwerkstoffe

Cellulosederivate

Eine größere Bedeutung im Hinblick auf industrielle Nutzung haben die Cellulosederivate, die in die Hauptgruppen Celluloseether und Celluloseester unterteilt werden [5].

Zu den Celluloseestern, der wichtigsten Gruppe, gehört auch Celluloid, welches aus 75 % Cellulosenitrat (gewonnen aus Salpetersäure und Cellulose) und 25 % Campher hergestellt wurde.

Grundsätzlich entstehen Celluloseester durch die Veresterung der Cellulose mit organischen Säuren. Die technisch wichtigsten Celluloseester sind Celluloseacetat (CA), Cellulosepropionat (CP) und Cellulosebutyrat (CB), wobei CA die größte Marktbedeutung hat.

Bild 3.4: Schweizer Offiziersmesser, Griffschale aus Celluloseacetobutyrat

Bild 3.5: Transparente Würfel aus Celluloseacetat

3.2.2 Protein-basierte Kunststoffe

Zu den Protein-basierten Kunststoffen gehört Casein (siehe Kap. 2.2.2), das schon zu Beginn des Kunststoffzeitalters eine gewisse Bedeutung hatte (siehe Kap. 3.1). Zur Herstellung eines Casein-Kunststoffs wird das aus Magermilch gewonnene und plastifizierte Casein durch Einwirken von Formaldehyd und Austritt von Wasser zu einem vernetzten Kunststoff verarbeitet. In diesem Zusammenhang ist daher auch der Begriff Casein-Formaldehyde gebräuchlich.

Wegen ihrer vergleichsweise minderwertigen Eigenschaften werden Casein-Kunststoffe heute jedoch nur noch in kleineren Nischenmärkten eingesetzt [5].

Neuere Ansätze nutzen u. a. nicht zum Verzehr geeignete Milch, um daraus Casein zu gewinnen und beispielsweise Fasern und Textilien [71] oder wasserlösliche Folien, z. B. für Spülmaschinentabs [72] herzustellen.

Ein Protein-basierter Biokunststoff im weiteren Sinn ist die Gelatine (siehe Kap. 2.2.2). Sie wird neben den bekannten Anwendungszwecken als Nahrungsmittelzusatz u. a. auch als Bindemittel oder Kapsel für Tabletten verwendet [5].

3.2.3 Lignin-basierte Kunststoffe

Durch Modifizierung ist es möglich, das Eigenschaftsspektrum der Ligninpolymere zu verändern. Dadurch sind sowohl thermoplastische als auch duromere Materialien herstellbar. Im Bereich der Thermoplaste kann Lignin als Blendpartner für Kunststoffe (PE, PVC, PA) oder als Verbundwerkstoff (Composit) mit Naturfasern verstärkt eingesetzt werden.

Bild 3.6: Lautsprechergehäuse aus einem Lignin-basierten Biokunststoff

Der bekannteste Biokunststoff auf der Basis von Lignin (siehe Kap. 2.2.3) wird unter der Bezeichnung „flüssiges Holz“ vermarktet [20, 109] und ist sehr gut im Spritzgießprozess (siehe Kap. 4.3.3) verarbeitbar. Er wird u. a. mit Naturfasern verstärkt (Flachs, Hanf etc.) angeboten [67]. Im Bereich der Duromere werden Rezepturen mit Lignin für Phenol-, Epoxy- und Polyurethan-Harze entwickelt [2, 21, 22].

3.2.4 Naturkautschuk und thermoplastische Elastomere

Ein sehr populärer „Verwandter“ der Kunststoffe ist Gummi. Andere Begriffe in diesem Zusammenhang sind Kautschuk und Elastomere. Auch wenn mehr als die Hälfte des weltweiten Bedarfs an Gummi heute petrochemisch hergestellt wird (synthetische Kautschuke meist aus Styrol und Butadien), so geht doch der Ursprung auf nachwachsende Rohstoffe zurück. Auch heute noch werden rund 40 % des Gummibedarfs aus Naturkautschuk gedeckt [23].

Unter Naturkautschuk[2] versteht man Polymere, die auf Pflanzenprodukten wie vor allem Milchsaft (Latex) basieren. In der Natur tritt dieser Latexsaft aus verletzten Stellen der Baumrinde aus und dient so dem Schutz des Baumes, denn er dichtet verletzte Stellen vor dem Befall mit Mikroorganismen ab. In nachhaltig bewirtschafteten Plantagen wird der Saft durch gezieltes Anritzen gewonnen. Gummi entsteht durch die Vulkanisierung von Rohkautschuk mit Schwefel [2].

Als alternative Rohstoffquelle für Naturlatex wird heute auch die Wurzel des russischen Löwenzahns untersucht [73].

Neben Gummi, das als biobasierter Werkstoff schon seit vielen Jahrzehnten bekannt ist, gibt es die sogenannten thermoplastischen Elastomere (TPE). Diese ebenfalls sehr elastischen Kunststoffe sind nicht vernetzt und daher auch wieder aufschmelzbar (thermoplastisch). Auch hier gibt es eine ganze Reihe biobasierter oder teil-biobasierter Typen [74, 75].

Eine wichtige Gruppe sind die thermoplastischen Polyurethane (TPU). Anwendungsgebiete gehen von Schuhsohlen und anderen Schuhkomponenten über Folien bis hin zu Weichkomponenten in Hart-Weichverbunden (siehe Kap. 3.3.3).

[2] *indianisch „Baum der weint“, aus cao = Baum und ochu = Träne*

Thermoplastisches Ether-Ester-Elastomer (TPC-ET) mit Hartsegmenten aus petrochemisch hergestelltem Polybutylenterephthalat (PBT) und Weichsegmenten, die einen Polyether enthalten, der unter Verwendung von biobasiertem 1,3-Propandiol (siehe Kap. 2.3.2) hergestellt wird, eignet sich für technische Anwendungen, von Auto-Airbagabdeckungen, Luftführungselementen bis zu Möbeln, Sportartikeln und Fasern [18].

Bild 3.7: Wanderschuhe mit teil-biobasiertem Polyurethan (TPU)

Zu 100 % biobasiert ist ein Block-Copolymer (Polyether-Block-Amid), das 2010 u. a. für Ski-Schuhe vorgestellt wurde. Das TPE-Material besteht aus 100 % biobasiertem Polyamid 11 (siehe Kap. 3.3.2) und biobasiertem Polyether [19].

3.2.5 Polyhydroxyalkanoate

Stärke und andere Kohlenstofflieferanten können auch fermentativ unter Mitwirkung von Mikroorganismen in Biokunststoffe umgewandelt werden. Ein Beispiel sind die Polyhydroxyalkanoate (PHA) oder Polyhydroxyfettsauren, eine Familie von Polyestern. So wie viele Säugetiere, einschließlich der Menschen, Energiereserven in Form von Fett im Körper einlagern, gibt es Bakterien, die Polyhydroxyalkanoate intrazellular als Speicher- oder Reservestoff einlagern [5]. Wenn das Nahrungsangebot verknappt wird, können diese Energiereserven bis zu 80 % des Bakteriengewichts ausmachen. Durch die Kultivierung derartiger Bakterien, die mit Zucker oder Stärke (meist aus Mais), seltener mit Pflanzenöl oder anderer kohlenstoffreicher Kost „gefüttert“ werden, können PHAs industriell gewonnen werden.

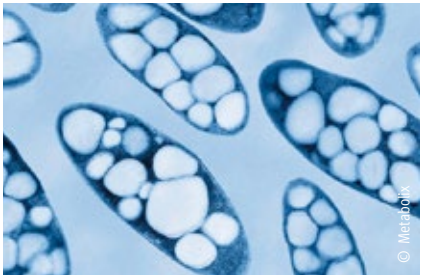


Bild 3.8: Elektronenmikroskop-Aufnahme von Bakterien mit eingelagerten PHA-Partikeln

Von wirtschaftlicher Bedeutung sind heute am ehesten PHB (Polyhydroxybutyrat) oder Copolymere wie PHBV (Poly-3-hydroxybutyrat-co-valerat), PHBH (Poly-3-hydroxybutyrat-co-hydroxyhexanoat) oder PHBHV, das bereits in den 1990 für eine Shampooflasche u. a. in Deutschland und den USA eingesetzt wurde, dann aber wieder vom Markt verschwand.

Verarbeitbare Biokunststoffe aus Polyhydroxyalkanoaten werden in der Regel gewonnen, indem das Biopolymer vom Zellmaterial

der Bakterien getrennt, gereinigt und compoundiert wird. PHAs sind als Folien- und Spritzgießtypen und zunehmend auch als Extrusions- und Blasformtypen verfügbar. Ein japanischer Anbieter stellte 2010 einen Partikelschaum (ähnlich Styropor®) aus PHBH vor [24].

Eine Besonderheit der Polyhydroxyalkanoate ist, dass sie sowohl in industrieller Kompostierung (siehe Kap. 6.4) und Biogasanlagen, als auch im heimischen Komposthaufen, in Erde und in Süß- und Meerwasser vergleichsweise schnell und zu 100 % biologisch abgebaut werden.

Weltweit arbeiten eine ganze Reihe von Unternehmen daran, verschiedene Polyhydroxyalkanoate großtechnisch herzustellen [76]. Darunter sind auch Anstrengungen PHA aus gebrauchtem Frittierfett [70], oder aus CO_2 und CH_4 (Methan) herzustellen.

3.3 Aus biobasierten Monomeren synthetisierte biobasierte Polymere

3.3.1 Biobasierte Polyester

Polylactid (PLA)

Unter den biobasierten Polyestern ist heute Polylactid bzw. Poly-Lactic-Acid (PLA) oder Polymilchsäure einer der bedeutendsten Biokunststoffe [5]. PLA basiert auf Milchsäure, einer natürlichen Säure, die größtenteils fermentativ aus Zucker oder Stärke mithilfe von Mikroorganismen hergestellt wird.

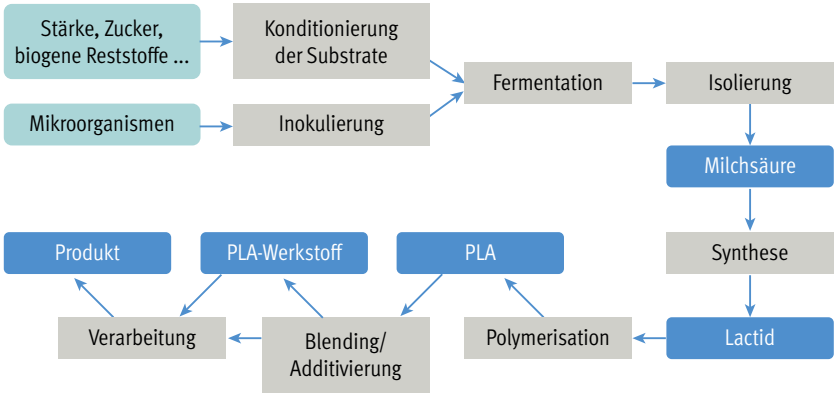
Die weltweit erste größere PLA-Produktionsanlage mit 150.000 Tonnen Jahreskapazität wurde 2002 in den USA in Betrieb genommen. Die zweitgrößte Anlage mit einer Kapazität von 75.000 Tonnen nahm Ende 2018 in Thailand ihren Betrieb auf. Weitere industrielle PLA-Produktionsanlagen sind geplant bzw. in der Entstehung (z. B. auch in China).

PLA ist, so wie es aus dem Reaktor kommt, nicht gut als Kunststoff verarbeitbar. Wie für den größten Teil der Kunststoffe üblich, wird auch der Polymerrohstoff PLA erst durch Compoundieren mit entsprechenden Additiven, durch Copolymerisieren oder Blenden mit anderen Kunststoffen (Biokunststoffen oder traditionellen Kunststoffen) für die jeweilige Anwendung maßgeschneidert.

Das durchsichtige PLA ähnelt herkömmlichen thermoplastischen Massenkunststoffen nicht nur in seinen Eigenschaften, sondern lässt sich auch auf den vorhandenen Anlagen ohne weiteres verarbeiten. PLA und PLA-Blends werden als Granulate in verschiedenen Qualitäten für die kunststoffverarbeitende Industrie zur Herstellung von Folien, Formteilen, Dosen, Bechern, Flaschen und sonstigen Gebrauchsgegenständen angeboten [1].

Vorteile der PLA-Kunststoffe sind die hohe Festigkeit, die Transparenz der Folien, Becher und Behälter, die Thermoplastizität und gute Verarbeitung auf den vorhandenen Anlagen der kunststoffverarbeitenden Industrie. Nichtsdestotrotz hat PLA aber

PROZESSSCHRITTE ZUR ERZEUGUNG V. POLYLACTIDWERKSTOFFEN U. -BAUTEILEN



Quelle: Technische Biopolymere (Endres, Siebert-Raths) [5], modifiziert durch FNR

© FNR 2013

Abb. 3.2: Erzeugung von PLA-Produkten

auch Nachteile: Da der Erweichungspunkt bei etwa 60 °C liegt, ist das Material für die Herstellung von Trinkbechern für Heißgetränke nur bedingt geeignet [1]. Durch eine gezielte Additivierung, bestimmte Verarbeitungsmethoden oder auch durch gezielte Kombination von L- und D-Lactiden (Stereokomplexe) lassen sich modifizierte PLA-Typen herstellen, die eine ausreichende Formbeständigkeit bei höheren Gebrauchstemperaturen aufweisen [26]. Eine zweite Eigenschaft, die PLA mit anderen Biokunststoffen gemeinsam hat, ist die geringe Wasserdampfbarriere. Während diese Eigenschaft beispielsweise für Flaschenanwendungen negativ ist, kann sie im Sinne einer Atmungsaktivität für die Verpackung von Brot oder Gemüse von Vorteil sein.

Neben der Möglichkeit des Einsatzes für kurzlebige Verpackungsfolien oder Tiefziehprodukte (z. B. Getränke- oder Joghurtbecher, Obst-, Gemüse- und Fleischschalen) birgt dieser Biokunststoff auch ein großes Potenzial für dauerhafte, langlebige Produkte. Beispiele dafür sind Babyspielzeug, Schreibtischutensilien, Lippenstiftgehäuse und vieles mehr. Auch in der Automobilindustrie gibt es erste Serienanwendungen aus Kunststoffen auf der Basis von PLA. Einige japanische Autobauer haben eigene Blends entwickelt, aus denen Teile der Armaturentafel [27], Einstiegsleisten etc. gefertigt werden.

Bild 3.9: Babyspielzeug aus PLA

Bild 3.10: Transparente PLA-Folie zur Verpackung von Gemüse

Bild 3.11: Untere Armaturentafel aus PLA-Blend

Auch für textile Anwendungen kommt zu Fasern gesponnenes PLA zum Einsatz. Hier sind von Kleidungsstücken über Kinderschuhe bis hin zu Autositzbezügen bereits viele Anwendungen am Markt zu finden.

Bild 3.12: Baby-Schuhe aus einem PLA/PET Mischgewebe und Sohlen aus einem weichen PLA-Compound [28]

Polyethylenterephthalat (PET)

PET gehört seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu den Massenkunststoffen. Ein regelrechter Boom begann 1975 durch den umfassenden Einsatz als „gutgreifige“ und „unkaputtbare“ Getränkeflaschen durch die großen nordamerikanischen Erfrischungsgetränke-Hersteller.

PET ist ein thermoplastischer Polyester, der durch Polykondensation aus Monoethylenglykol (oder Ethylenglykol, einem zweiwertigen Alkohol) und Terephthalsäure oder Dimethylterephthalat hergestellt wird.

Seit 2010 werden erste Getränkeflaschen aus teilweise biobasiertem PET angeboten [29, 30]. Dabei wird das Monoethylenglykol (etwa 30 Gewichts-%) aus Zuckerrohr-Melasse hergestellt. Die Terephthalsäure wird in diesem Fall noch petrochemisch produziert.

© Coca-Cola

Bild 3.13: Getränkeflaschen aus teil-biobasiertem PET

Die Terephthalsäure als zweite Komponente für die Herstellung von PET (und anderen Kunststoffen) aus nachwachsenden Rohstoffen herzustellen, galt bis dato als aufwendig und teuer. Nun gibt es erste Ansätze, Terephthalsäure über Bio-Paraxylen (Bio-PX) wirtschaftlich biobasiert herzustellen [31, 77, 78].

Ganz egal, ob das PET teilweise oder komplett aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird, chemisch ist der Werkstoff mit konventionellem PET identisch und kann insofern problemlos mit diesem zusammen recycelt werden.

Polyethylenfuranoat (PEF)

Eine 100 % biobasierte Alternative zu PET könnte Polyethylenfuranoat (PEF) sein. Hier wird 2,5-Furandicarbonsäure (FDCA) mit Monoethylenglykol zu PEF polymerisiert. In den Niederlanden wurde eine Technologie entwickelt, um FDCA aus Biomasse herzustellen [68].

Trotz der Unterschiede zwischen PEF und PET führt ihre chemische Ähnlichkeit zu sehr ähnlichen Produktionsschritten wie bei PET und anderen Polyestern. Auch die Verarbeitung kann typischerweise auf Anlagen für PET, andere Polyester und oft sogar andere Kunststoffe erfolgen. In vielen Fällen sind nur Änderungen der Bedingungen erforderlich oder geringfügige Anpassungen an den Maschinen, wie sie beim Wechsel zwischen verschiedenen Materialien auch sonst üblich sind.

Der niedrigere Schmelzpunkt von PEF ermöglicht typischerweise niedrigere Verarbeitungstemperaturen als PET, was Energiekosten sparen kann, während das Verarbeitungsfenster groß genug ist, um einen reibungslosen Betrieb zu ermöglichen. Darüber hinaus ist PEF dem PET ähnlich genug, um das Recycling nach den gleichen Verarbeitungsschritten zu ermöglichen, die in den vielen PET-Recyclingprozessen zu finden sind.

PEF weist, verglichen mit PET, eine 10-fach höhere Sauerstoff- und CO_2-Barriere und eine doppelt so hohe Wasserdampfbarriere auf. Auch die Glasübergangstemperatur (+12 °C) und der E-Modul von PEF (+60 %) sind höher als bei PET. Diese vorteilhaften Eigenschaften ermöglichen neue Verpa-

ckungsmöglichkeiten und zusätzliche Funktionen, bei denen PET oft nicht den Anforderungen entspricht [79].

Polytrimethylenterephthalat (PTT)
Das ebenfalls teil-biobasierte Polytrimethylenterephthalat (PTT) ist sicher nicht so bekannt und von so hoher Marktrelevanz wie PET. PTT ist aber als teil-biobasierter Kunststoff bereits deutlich länger auf dem Markt als teil-biobasiertes PET.

Ähnlich wie PET wird auch PTT aus Terephthalsäure oder Dimethylterephthalat und einem zweiwertigen Alkohol hergestellt. In diesem Fall handelt es sich um biobasiertes 1,3-Propandiol, auch bekannt als Bio-PDO (siehe Kap. 2.3.2).

Biobasiertes Polysuccinat
Weitere Biopolyester sind zum Beispiel das Polybutylensuccinat (PBS), ein biologisch abbaubarer Biokunststoff, der aus Butandiol (z. B. Bio-BDO) und Bernsteinsäure, die auch biobasiert darstellbar ist (siehe Kap. 2.3.2), hergestellt wird.

Bild 3.14: Verpackung aus Polybutylensuccinat (PBS)

Beim Polybutylensuccinat-Adipat (PBSA) wird neben der Bernsteinsäure noch Adipinsäure einpolymerisiert. Auch dieser Kunststoff kann je nach Monomerherkunft mehr oder weniger biobasiert sein.

Biobasiertes Polycarbonat
Ein zur Familie der Polycarbonate (formal gesehen auch ein Polyester) gehörender partiell bio-basierter und beständiger technischer Kunststoff wird aus Isosorbid hergestellt, welches wiederum aus Sorbitol gewonnen wird. Sorbitol ist der Zuckeralkohol der Glucose [85]. Es ist somit ein weithin verfügbarer Rohstoff.

Es handelt sich hier um ein aliphatisches Polycarbonat (APC), genauer ein cycloaliphatisches Polycarbonat aus Isosorbid, CO_2 und biobasierter Bernsteinsäure. Die Doppelringstruktur des Isosorbids wird genutzt, um die Bisphenol-A-Struktur in der Molekülstruktur nachzuahmen, was zu Materialeigenschaften führt, die mit denen konventionellen Polycarbonats vergleichbar sind [103].

Das Material verbindet die positiven Eigenschaften von Polycarbonat (PC) (Schlagfestigkeit) und Polymethylmethacrylat (PMMA) (Kratzfestigkeit) und zeichnet sich zudem durch eine geringere Neigung zum Vergilben (Yellowing) aus [86, 87]. Hinzu kommen gute optische (Transmission und UV-Beständigkeit) und mechanische Eigenschaften sowie Hitzebeständigkeit.

Es eignet sich für Anwendungen wie Touchscreens, wo die Kratzfestigkeit und Schlag-

zähigkeit in Verbindung mit der guten optischen Oberfläche zum Tragen kommen. Bei Fahrzeug-Innenraumverkleidungen und -abdeckungen sowie Fahrzeugaußenteile wie Kühlergrills zeichnet sich das Material durch seine Hochglanzoberfläche aus, die ein zusätzliches Lackieren überflüssig macht [88].

Bild 3.15: Automobil-Innenraumverkleidung in Klavierlackoptik aus APC

Sonstige biobasierte Polyester

Weitere (ganz oder teilweise) biobasierte Polyester sind Polybutylenterephthalat (PBT) aus Terephthalsäure oder Terephthalsäuremethylester und biobasiertem Butandiol (Bio-BDO). PBT wird gerne als der „technische Bruder“ des eher für Verpackungen verwendeten PET bezeichnet.

Es sind inzwischen auch erste Erfolge erzielt worden, den am Markt sehr erfolgreichen biologisch abbaubaren Kunststoff PBAT (Polybutylenadipat-Terephthalat) teilweise aus nachwachsenden Rohstoffen herzustellen [7].

Darüber hinaus gibt es weitere pflanzenölbasierte Polyester, die zur Herstellung von Druckfarben, Klebstoffen, Isoliermaterialien, Vergussmassen, als Mittel zur Textilveredlung und als Fußbodenbelag dienen können. Letzterer, meist als Linoleum bezeichnet, wird seit Jahrzehnten nach komplexen Verfahren aus Leinöl hergestellt.

Ungesättigte Polyesterharze

Ungesättigte Polyesterharze aus der Gruppe der Duromere (vernetzte, nicht wieder aufschmelzbare Kunststoffe) kennt man beispielsweise als glasfaserverstärkter Verbundwerkstoffe aus dem Boots- oder Fahrzeugbau (SMC, BMC) oder der Reparatur von Karosserieschäden am Auto.

Bild 3.16: Rennboot aus teil-biobasiertem UP-Harz

Polyesterharze sind Kondensationsprodukte aus zwei- oder mehrwertigen Alkoholen (z. B. Glykolen oder Glycerin) und Dicarbonsäuren [2], die wie oben dargestellt (siehe Kap. 2.3.2 und 3.3) aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden können. So sind heute bereits eine Reihe von teil-biobasierten, ungesättigten Polyesterharzen auf dem Markt [37, 38].

3.3.2 Biobasierte Polyamide

Polyamide sind Kunststoffe, die sich sehr gut zur Herstellung von Fasern und für technische Anwendungen eignen. Die bekanntesten Vertreter, die in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts für Aufsehen sorgten, sind Nylon® und Perlon®. Polyamide werden heute für anspruchsvolle Spritzgussanwendungen, extrudierte Produkte, Hohlkörper und Bekleidungs-, Dekor- und technische Textilien eingesetzt.

Polyamide werden in der Regel aus Dicarbonsäuren und Diaminen hergestellt. Biopolyamide sind ganz oder teilweise biobasiert, je nachdem ob die Dicarbonsäure, das Diamin oder beide aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden.

Eine wirtschaftlich bedeutende Dicarbonsäure zur Herstellung von Bio-Polyamiden ist die Sebacinsäure, die beispielsweise aus Rizinusöl hergestellt werden kann. Mit diesem Monomer sind dann teil-biobasierte Polyamide wie PA 4.10 oder PA 6.10 möglich. Hier ist die „10er"-Komponente der biobasierte Anteil. Sowohl teil-biobasiertes PA 4.10 als auch PA 6.10 sind kommerziell am Markt verfügbar.

Bild 3.17: Dübel aus teil-biobasiertem PA 6.10

Ein anderes Beispiel ist das ebenfalls kommerziell verfügbare PA 10.10. Hier ist auch die „erste 10er" Komponente biobasiert. Der Grundstoff 1,10-Diaminodecan kann ebenfalls aus Rizinus hergestellt werden, sodass PA 10.10 auch 100 % biobasiert machbar ist.

Bild 3.18: Kraftstoff-Nippel aus 100 % biobasiertem PA 11

Das komplett biobasierte PA 11 ist bereits seit rund 70 Jahren auf dem Markt und wird aus Rizinusöl hergestellt. PA 11 eignet sich aufgrund seiner besonderen Resistenz u. a. für die Herstellung von Biokraftstoff-führenden Leitungen und Bauteilen.

Über die hier genannten hinaus gibt es noch eine Reihe weiterer biobasierter Polyamide [32].

3.3.3 Biobasierte Polyurethane

Polyurethane entstehen durch eine Reaktion von Polyolen und Diisocyanaten und können hart und spröde oder elastisch, ge-

schäumt oder kompakt sein. Sie können in thermoplastischer oder duromerer Form vorliegen.

© Ford Motor Company

Bild 3.19: Autositz aus PU-Schaum (Soy-foam)

Da sich Polyole auch aus pflanzlichen Ölen von Rizinus, Raps, Sonnenblumen oder Soja herstellen lassen, sind heute bereits eine große Zahl teil-biobasierter Polyurethane am Markt erhältlich. Während die Fettsäuren aus Rizinusöl bereits OH-Gruppen enthalten, werden Polyole aus Pflanzenölen wie Raps-, Sonnenblumen- oder Sojaöl über Epoxidierung der ungesättigten Fettsäuren und anschließende Addition von mehrfachen Alkoholen über die Ringöffnung der Epoxide hergestellt.

Sogenanntes Thermoplastisches Polyurethan (TPU) aus der Familie der Elastomere wurde bereits in Kap. 3.2.4 erwähnt.

Eine weitere bedeutende Gruppe von Polyurethanen kommt in Form von Schäumen zum Einsatz. Als ein Vorreiter setzt ein nordamerikanischer Automobilkonzern bereits seit einigen Jahren Polyurethanschäume ein, deren Polyol auf der Basis von Sojaöl hergestellt wird.

Aber auch bei den Diisocyanaten gibt es erste Erfolge, diese aus nachwachsenden Rohstoffen herzustellen. Ein 2017 vorgestelltes aliphatisches Polyisocyanat basiert auf einem zu 70 % biobasierten Pentamethylen-Diisocyanat (PDI-Trimer). Es wird als Härterkomponente für lichtechte Polyurethan-Lacksysteme eingesetzt [80].

3.3.4 Biobasierte Polyolefine

Zu den wichtigsten und mengenmäßig am häufigsten vorkommenden Kunststoffen gehören die Polyolefine (wichtigste Vertreter: Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP)). Sie lassen sich am einfachsten dadurch erkennen, dass ihre Dichte kleiner als 1 g/cm³ ist – sie schwimmen in Wasser. Sowohl PE als auch PP lassen sich aus nachwachsenden Rohstoffen herstellen [33].

Biopolyethylen (Bio-PE)

Polyethylen (PE) ist der einfachste und zugleich häufigste Kunststoff mit einer globalen Produktionskapazität von 110 Mio. Tonnen ([33]). Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig, von Folienanwendungen (Beutel, Säcke, Schrumpffolien) über blasgeformte Hohlkörper wie Shampoo-Flaschen, Benzinkanister bis hin zu Fässern und KFZ-Benzintanks und Spritzgussartikeln sowie Extrusionsprodukten wie Rohre und Profile.

Polyethylen kann durch Polymerisation von petrochemisch hergestelltem Ethylengas hergestellt werden. Eine weitere Möglichkeit das Monomer Ethylen herzustellen ist durch Dehydrierung von Ethanol. Diese Methode wurde bereits zu Beginn der großtechnischen PE-Produktion in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, vor der Verfügbarkeit von petrochemisch hergestelltem Ethylengas, eingesetzt [2].

Mit Blick auf die Kunststoffherstellung aus nachwachsenden Rohstoffen ist dieses Verfahren wieder interessant geworden. So wird in Brasilien seit vielen Jahren Bio-Ethanol fermentativ aus Zuckerrohr produziert. Dieses Bio-Ethanol kann nun auch zur Herstellung von Ethylen und somit Bio-Polyethylen herangezogen werden. Dabei wird mit der Herstellung einer Tonne Bio-PE der Atmosphäre 3,09 Tonnen CO_2 entzogen. Seit 2010 gibt es in Brasilien eine entsprechende Produktionsanlage mit einer Jahreskapazität von 200.000 Tonnen.

Bild 3.20: Spielzeug aus Bio-PE

Biopolypropylen (Bio-PP)

Polypropylen (PP) wird ebenfalls für viele technische Anwendungen eingesetzt. Die jährliche Produktionskapazität liegt weltweit bei 56 Millionen Tonnen (2018) [104]. Biobasiertes Polypropylen kann wie Bio-PE aus Bio-Ethanol erzeugt werden, allerdings ist das Verfahren deutlich komplexer.

Zur Herstellung des Monomers Propylen aus nachwachsenden Rohstoffen gibt es mehrere Möglichkeiten [34]. Ein großer brasilianischer Hersteller von Polyolefinen hat den Produktionsstart einer Anlage von Bio-PP angekündigt, ohne bekannt zu geben, auf welche Weise der Kunststoff hergestellt wird.

2018 hat ein finnisches Chemieunternehmen angekündigt, aus biobasierten Rohmaterialien wie gebrauchten Speiseölen und nachhaltig produzierten Pflanzenölen in kommerziellem Maßstab die Grundstoffe für Bio-PP herzustellen. Im Herbst 2019 und im Frühjahr 2020 gaben mittlerweile mehrere Kunststoff-Produzenten die darauf basierende, großtechnische Herstellung von Bio-PP bekannt (siehe Kap. 2.4.2) [98, 99, 100, 101, 102].

Ein japanischer Konzern kündigte 2019 die Entwicklung biobasierten Polypropylens an. Dessen Methode beinhaltet die Fermentierung verschiedener Arten von Biomasse, hauptsächlich nicht essbarer Pflanzen, zu Isopropanol (IPA), das dann dehydriert wird, um Propylen zu erhalten [36].

3.3.5 Biobasiertes Polyvinylchlorid

Ethylen aus Bio-Ethanol kann darüber hinaus auch für die Produktion von teil-biobasiertem Polyvinylchlorid (PVC) verwendet werden. Entsprechende Anstrengungen hierzu gab es vor rund 10 Jahren vorwiegend in Brasilien [35].

Ein belgisches Chemieunternehmen hat Anfang 2020 teilbiobasiertes PVC auf den Markt gebracht hat, für dessen Produktion ebenfalls biobasiertes Ethylen verwendet wird [110].

Aktiver ist die Forschung auf dem Gebiet der Weichmacher für fossil basiertes PVC. Viele konventionelle Weichmacher, vor allem die sogenannten Phthalate, sind gesundheitlich bedenklich und können beispielsweise den Hormonhaushalt stark beeinflussen [81]. So werden nun neuartige, biobasierte Alternativen, beispielsweise auf Basis von PHA, zu herkömmlichen Weichmachern in PVC entwickelt [81, 82].

3.3.6 Biobasierte Epoxidharze

Ein weiterer duromerer Kunststoff, der ebenfalls im Bootsbau aber auch in der Luft- und Raumfahrt, dem Automobilrennsport, zur Herstellung von Tennisschlägern oder Windkraftanlagen zum Einsatz kommt, ist Epoxidharz. Solche Epoxidharze werden oft mit Verstärkungsfasern wie Glasfasern, Kohlenstofffasern, Aramidfasern (Kevlar®, Twaron®), aber auch mit Naturfasern verstärkt.

Die Möglichkeiten Epoxidharze herzustellen, sind sehr unterschiedlich und komplex. So werden zur Herstellung biobasierter Epoxidharze epoxidierte Pflanzenöle, im Wesentlichen Leinöl, eingesetzt. Anwendungen sind neben Strukturpolymeren und Epoxidschäumen auch Funktionspolymere (z. B. Epoxidharze für Klebstoffe und Beschichtungen).

Häufig wird auch Epichlorhydrin verwendet, welches auch aus biobasiertem Glycerin, einem Abfallprodukt der Biodieselherstellung, erzeugt werden kann [39]. Es wird bereits im industriellen Maßstab produziert.

Eine Alternative, ein 100 % biobasiertes Epoxidharz zu erzeugen, wurde Anfang 2011 vorgestellt [40]. Die Forscher stellten aus Traubenkernöl ein Polyamin her, das dann als Härter für eine Reaktion mit epoxidiertem Leinöl verwendet wurde.

3.3.7 Weitere biobasierte Kunststoffe

Wie bisher schon zu erkennen ist, sind eine Vielzahl von Kunststoffen ganz oder teilweise biobasiert herstellbar, da es eine Fülle von Monomeren, Plattformchemikalien oder chemischen Grundbausteinen, sogenannten Building Blocks, gibt, die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden können. Dies sind z. B. die Diole Bio-PDO und Bio-BDO, Monoethylenglykol, Sebacinsäure, Bernsteinsäure, Terephthalsäure, Itaconsäure und viele mehr. Diese Monomere oder Building Blocks werden in der Regel für biobasierte Polyamide und Polyester eingesetzt.

Als schnell wachsende Biomasse haben Algen das Interesse vieler Forscher geweckt.

Erste Produkte sind auch bereits am Markt verfügbar. Dabei setzen einige Unternehmen Algen als Füllstoff ein. So gaben zwei nordamerikanische Hersteller 2015 bekannt, die weltweit ersten Weichschaumstoffe mit Algenprodukten als Füllstoff zu produzieren [83].

Ein anderes Unternehmen aus Mississippi (USA) verwendet Algenbiomasse, die aus Süßwasserquellen auf der ganzen Welt gewonnen wird (und diese dabei reinigt), um EVA-Schäume herzustellen. Zur Herstellung des flexiblen, biegsamen Schaums wird die gewonnene Algenbiomasse entwässert und getrocknet, polymerisiert und schließlich mit anderen Inhaltsstoffen vermischt. Der biobasierte Gehalt (Algengehalt) des Endprodukts liegt je nach Formulierung und Anwendungszweck zwischen 15 und 60 % [84].

Darüber hinaus gibt es eine Fülle weiterer Ansätze Biokunststoffe oder Building-Blocks aus den unterschiedlichsten, teils exotisch anmutenden Rohstoffquellen zu erzeugen. Hier seien Molke, Chicoree-Wurzeln oder Schalen von Sonnenblumenkernen auf pflanzlicher Seite, aber auch Schlachtabfälle, Federn oder die Panzer von Schalentieren auf tierischer Seite als Beispiele genannt.

Dabei ist jeder Ansatz, fossil basierten Kohlenstoff durch „jungen“ Kohlenstoff aus nachwachsenden Rohstoffen zu ersetzen, ein Schritt in die richtige Richtung.

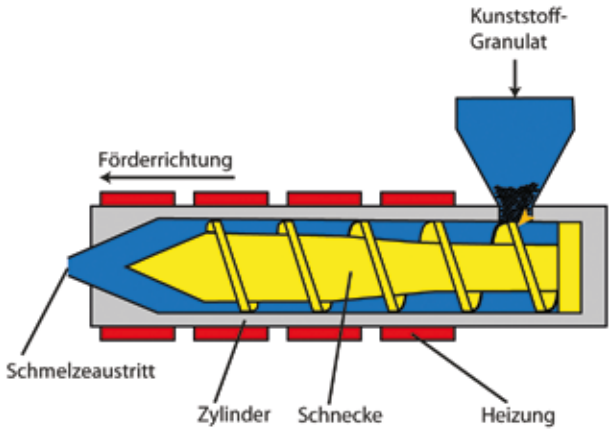
4 KUNSTSTOFF-VERARBEITUNGSVERFAHREN

4.1 Einführung

In dieser Broschüre geht es im Wesentlichen um thermoplastische Kunststoffe. Das sind Kunststoffe, die unter Wärmeeinwirkung wieder weich (plastisch) und somit schmelzbar und plastisch formbar werden. In den meisten Fällen geschieht das Aufschmelzen, oder besser die Plastifizierung, in Schneckenaggregaten (siehe Abb. 4.1). Der Kunststoff-Rohstoff wird in Granulatform in den Maschinentrichter gegeben und von der rotierenden Plastifizierschnecke transportiert, aufgeschmolzen, homogenisiert und schmelzeförmig an der sogenannten Düse ausgestoßen.

Bild 4.1: Kunststoff-Plastifizierschnecken

SKIZZE EINES PLASTIFIZIER-AGGREGATES



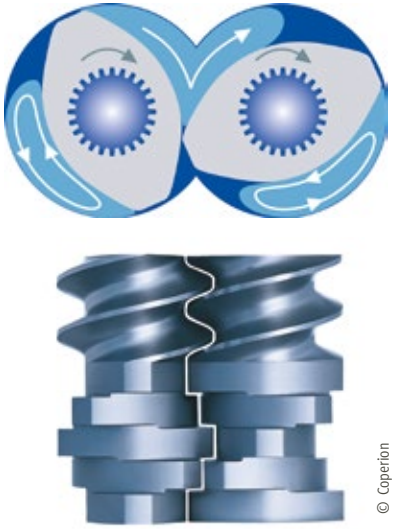
Quelle: Michael Thielen

© FNR 2020

Abb. 4.1: Skizze eines Plastifizier-Aggregates

4.2 Compoundieren

Ein Polymer wird erst dann zu einem „Kunststoff“, wenn es mit gängigen Verarbeitungsverfahren zu Produkten verarbeitet werden kann. Wie die meisten „konventionellen“ Kunststoffe sind auch die Biokunststoffe als „Roh-Kunststoffe“ – so wie sie aus dem Reaktor kommen – in der Regel nicht zu Endprodukten verarbeitbar. Sie müssen durch Compoundieren für die jeweiligen Anwendungen maßgeschneidert werden. Compoundieren bedeutet Aufbereiten und beschreibt den Veredelungsprozess von Kunststoffen durch Beimischung von Zuschlagstoffen (Füllstoffe, Additive usw.) zur gezielten Optimierung der Eigenschaftsprofile [2]. Solche Additive können Verarbeitungshilfsmittel sein, UV-Stabilisatoren, Schlagzäh-Modifikatoren, Weichmacher, Farbpigmente und vieles mehr. Ziel ist, das mechanische oder thermische Eigenschaftsprofil des Kunststoffs den erforderlichen Eigenschaften des Endproduktes anzupassen und die Kunststoffe gut verarbeitbar zu machen.



© Coperion

Bild 4.2: Prinzip eines gleichlaufenden Zweischneckenextruders

Das Compoundieren geschieht häufig auf speziell für diesen Zweck verwendeten Doppelschneckenextrudern, wo die Komponenten besonders intensiv gemischt und homogenisiert werden können (Bild 4.2).

4.3 Weiterverarbeitung

Die verarbeitungsfertigen Biokunststoff-Compounds werden nun auf unterschiedlichste Weise in Halbzeuge oder Endprodukte weiterverarbeitet. Dazu können in den meisten Fällen existierende Maschinen und Anlagen der Kunststoffverarbeitung verwendet werden. Es müssen lediglich die Verarbeitungsparameter wie Temperatur, Druck etc. angepasst werden. Hygroskopische Materialien müssen in entsprechenden Aggregaten vorgetrocknet werden.

4.3.1 Extrusion

Extrusion oder Extrudieren bezeichnet das kontinuierliche Aufschmelzen, Fördern und Austragen von thermoplastischen Kunststoffen durch eine formgebende Düse. Auf diese Weise lassen sich endlose Produkte wie Rohre, Profile, Folien oder Platten herstellen. Solche Halbzeuge sind beispielsweise dickere Folien, die dann im Thermoformverfahren (siehe Kap. 4.3.5) weiterverarbeitet werden.

Eine Möglichkeit, die mechanischen Eigenschaften extrudierter Folien zu verbessern, ist das Verstrecken unmittelbar nach der Extrusion (in-line). Dabei werden die Moleküle orientiert, sodass die Zugfestigkeit und Steifigkeit erhöht werden. Das Verstrecken kann in einer Richtung (z. B. in Längsrichtung) oder in Längs- und Querrichtung erfolgen. Ein Anwendungsbeispiel ist biaxial orientierte PLA-Folie (BoPLA) [42].

Durch die Zugabe von Treibmittel kann auch ein geschäumtes Extrudat erzeugt werden (siehe Kap. 4.3.6).

Und schließlich sind Extruder auch Maschinenelemente für komplexere Prozesse wie das Folienblasen (siehe Kap. 4.3.2) oder das Extrusionsblasformen (siehe Kap. 4.3.4).

4.3.2 Blasfolien-Extrusion

Um dünne Folien zu blasen, wird ein Extruder mit einer Ringdüse kombiniert. Die plastifizierte Kunststoffmasse wird zu einem Schlauch ausgeformt und durch die Düse nach oben ausgestoßen. Dort wird der Schmelzeschlauch mit Luft aufgeblasen und mit erhöhter Geschwindigkeit nach oben abgezogen. Nicht nur der Zug in Längs- und Querrichtung, sondern auch der Zeitpunkt des Abkühlens entscheiden über die Foliendicke.

Flach zusammengelegt wird der Schlauch dann entweder als Schlauchfolie oder seitlich aufgeschnitten als Flachfolie aufgewickelt. Derartige Folienblasanlagen sind nicht selten Türme von über 10 m Höhe.

Bild 4.3: Blasfolien-Extrusion

Durch den Einsatz mehrerer Extruder für unterschiedliche Kunststoffe können mehrschichtige Folien produziert werden. Jeder Kunststoff übernimmt dann eine bestimmte Aufgabe, wie Festigkeit, Barriere, Schweißbarkeit.

Erzeugnisse aus geblasenen Folien kommen beispielsweise als Verpackungen, Müllsammelsäcke und Beutel für Biomüll, Hygienefolien für Windeln, Versandhüllen, Einmalhandschuhe und Tragetaschen in den Handel [1].

4.3.3 Spritzgießen

Nahezu alle Größen und Formen von Kunststoffformteilen können im Spritzgießverfahren hergestellt werden. Ein Schnecken-Plastifizieraggregat sorgt für die Plastifizierung der

Kunststoffmasse, wobei sich die Schnecke während des Aufschmelzvorgangs langsam nach hinten bewegt und vor der Schneckenspitze ein Schmelzepolster bildet. Ist die für einen Schuss benötigte Menge erreicht, fährt die Schnecke vor und presst die Schmelze durch die erwärmte Düse und durch Angusskanäle unter Druck in den Hohlraum der kalten Form, des sogenannten Werkzeugs. Der Kunststoff kühlt nun im Werkzeug ab und wird als gebrauchsfertiges Formteil ausgestoßen [1].

Die Anwendungsmöglichkeiten für das Spritzgießen sind schier unendlich. Beispiele sind Kugelschreiber, Lineale und andere Büroutensilien, Spielzeug, Gartenmöbel, Stoßstangen, Getränkekästen, Knöpfe, mechanische Kleinteile und vieles mehr.

Bild 4.4: Spritzgießmaschine

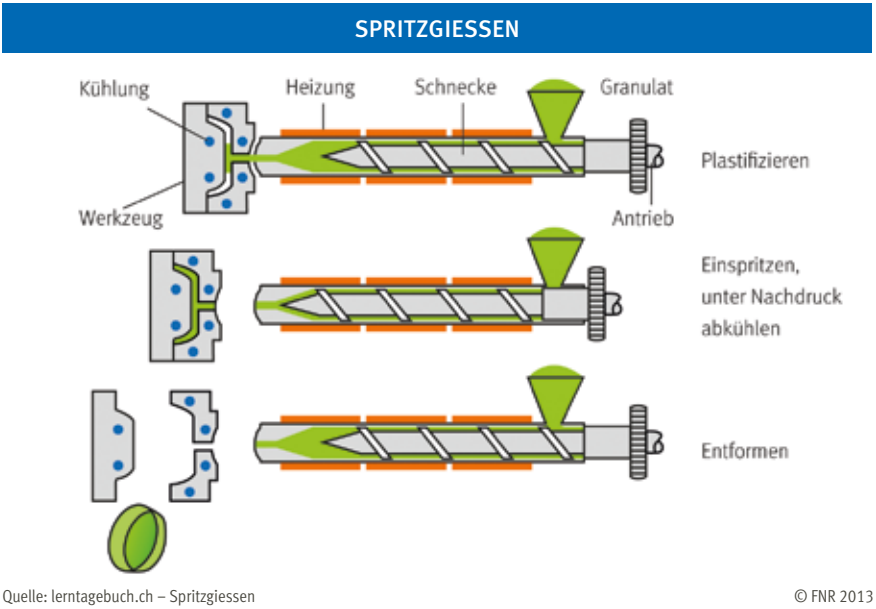
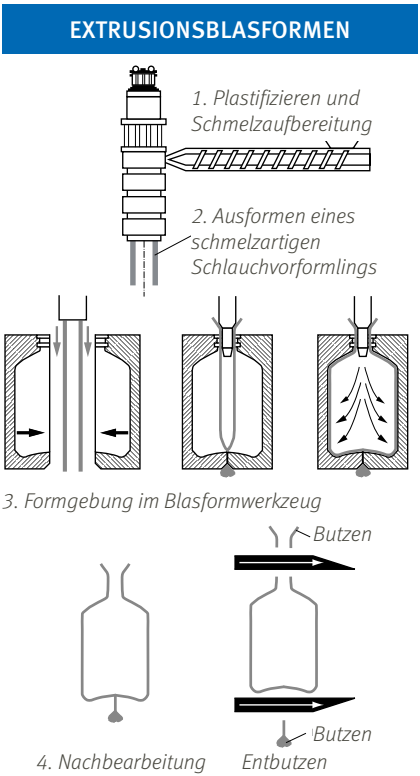


Abb. 4.2: Der Spritzgießprozess

4.3.4 Blasformen

Durch Blasformen werden Hohlkörper hergestellt. Dazu gibt es unterschiedliche Verfahren, von denen das Extrusionsblasformen und das Streckblasformen die am weitesten verbreiteten sind [43, 45].

Beim Extrusionsblasformen wird die thermoplastische Schmelze in einem Extruder erzeugt, anschließend nach unten durch eine Ringspaltdüse gedrückt und so ein schlauchförmiger Schmelze-„Vorformling“ erzeugt. Eine aus zwei Halbschalen bestehende Form, das Blasformwerkzeug, wird um den frei hängenden Vorformling herumgeschlossen und quetscht diesen an beiden Enden (oben und unten) ab. Nun wird der plastische Vorformling mit Luft „aufgeblasen“ und gegen die gekühlten Wände des Blasformwerkzeugs gedrückt, wo der Kunststoff abkühlt, erhärtet und die endgültige Gestalt des Formteils annimmt.



Quelle: Blasformen von Kunststoffhohlkörpern (Thielen, Hartwig, Gust), 2019

© FNR 2020

Abb. 4.3: Extrusionsblasformen (Grafik aus [43])

Bild 4.5: Rutsche-LKW, extrusionsblasgeformt aus Bio-PE

Typische Anwendungsbereiche für dieses Verfahren sind Flaschen (Shampoo, Ketchup, Spülmittel etc.), Kanister, Fässer, Tanks, aber auch Spiel- und Sportgeräte wie Kajaks oder Rutsche-Autos und vieles mehr.

In den 1990er Jahren kam eine extrusionsblasgeformte Shampoo-Flasche aus Polyhydroxyalkanoat (PHA) auf den Markt. Zu den jüngsten Beispielen zählt ein Rutsche-LKW aus Bio-PE [44].

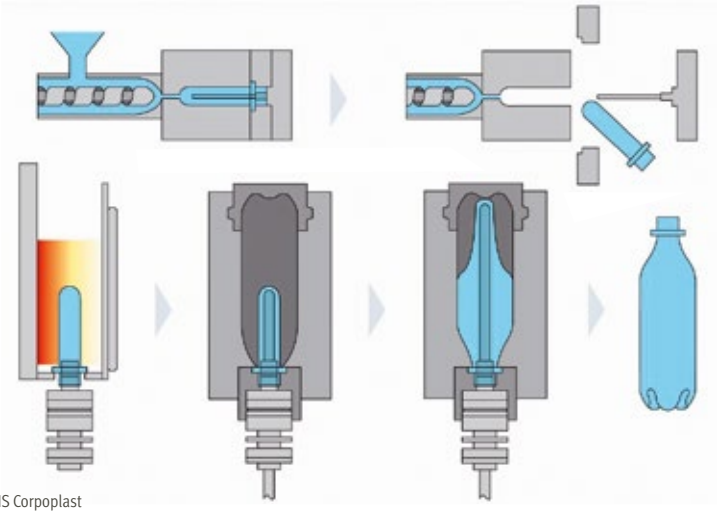
Anders als das vielseitige Extrusionblasformen kommt das Streckblasformen nahezu ausschließlich für die Herstellung von (Getränke)-Flaschen zum Einsatz. Hier wird zunächst ein kleiner Vorformling (Preform), der einem dickwandigen Reagenzglas mit Gewindehals ähnelt, im Spritzgießverfahren hergestellt.

Dieser Preform wird anschließend in einer separaten Maschine zunächst durch Strahler erwärmt und dann innerhalb der geschlossenen Form durch einen Reckdorn in der Länge und durch Aufblasluft in Umfangsrichtung verstreckt. Durch dieses biaxiale Verstrecken der Moleküle erhält der Kunststoff eine enorme Festigkeit, sodass sehr dünnwandige Behälter hergestellt werden können.

Bild 4.6: Preforms und Flaschen (v. l. n. r.: PLA, PP, PET)

Biokunststoffe, die durch Streckblasen verarbeitet werden können, sind u. a. Bio-PET, PEF und PLA.

STRECKBLASFORMEN



Quelle: KHS Corpoplast

© FNR 2013

Abb. 4.4: Streckblasformen

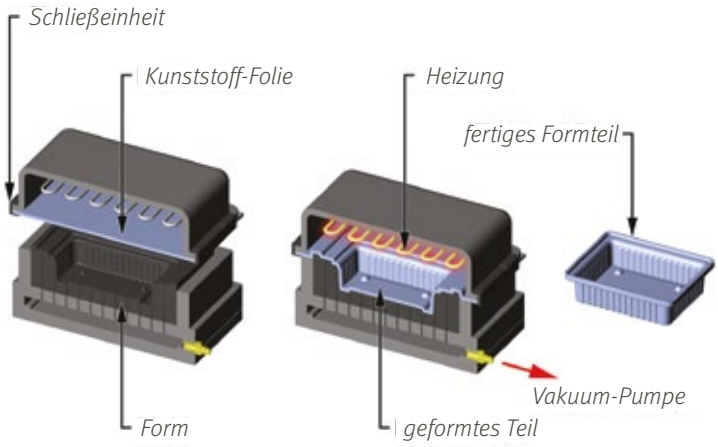
4.3.5 Thermoformen

Unter Thermoformen (früher auch Warmformen, Tiefziehen oder Vakuumtiefziehen genannt) versteht man die Herstellung dreidimensionaler Formteile aus flächenförmigen Kunststoffhalbzeugen (Folien, Platten) [2]. Dabei kommen Wärme, Druckluft und/oder Vakuum und ggf. Hilfsstempel zum Einsatz.

Bild 4.7: Thermogeformte Fleisch-Verpackung aus PLA

Von großen Rollen (oder in-line direkt vom Extruder) wird die Folie abgezogen und dem Formautomaten zuerst zugeführt und dann taktweise hindurchgeleitet. In einer Aufwärmstation wird mittels Heizstrahler die Folie ein- oder beidseitig erwärmt. In der Werkzeugstation wird sie dann mittels Spannrahmen festgehalten. Bei Bedarf geben ein Stempel oder ein Vorblasluftpolster die Kontur schon grob vor. Dann kommt Druckluft von der einen und Vakuum von der anderen Seite, um die Folie rasch an die kalte Wand des formgebenden Werkzeuges zu bringen. Die erkaltete, nun feste Folie wird von dem Formwerkzeug getrennt und im nächsten Arbeitstakt der Ausstanzstation zugeführt.

THERMOFORMEN



Quelle: CUSTOMPARTNET

© FNR 2013

Abb. 4.5: Thermoformen

Typische Anwendungsbeispiele sind Pralinenschachteleinlagen, Blisterverpackungen, Joghurt- oder Margarinebecher, Trinkbecher, Fleischschalen, Schalen mit Klappdeckel (clamshell) und ähnliche Packmittel. Es können aber auch technische Teile wie Sandkästen und Planschbecken für Kinder bis hin zu Automobilteilen im Thermoformverfahren hergestellt werden.

4.3.6 Schäumen

Um Formteile zu erhalten, die besonders leicht sind, gute Wärme- oder Schalldämmeigenschaften oder eine gute mechanische Dämpfung aufweisen, oder schlicht um Material einzusparen, können Kunststoffe geschäumt werden.

Die Poren entstehen beim Schäumen durch physikalische, chemische oder mechanische Treibverfahren. Beim physikalischen Schäumen werden dem Kunststoff niedrig siedende Flüssigkeiten (z. B. Kohlenwasserstoffe) zugesetzt, die im Verlauf der Polymerisation verdampfen und so die typischen Gasblasen bilden. Das chemische Schäumen ähnelt dem Einsatz von Backpulver. Chemische Treibmittel sind häufig Feststoffe, die dem Kunststoff beigefügt werden und bei höheren Temperaturen unter Freisetzung von Gasen zerfallen [46]. Und beim mechanischen Schäumen wird schließlich in die Kunststoffschmelze unter Rühren ein Gas eingeblasen (vgl. Sahneschlagen).

Nun gibt es je nach Verarbeitung unterschiedliche Kunststoffschaum-Produkte. Mit einem Extruder können Tafeln oder Profile mit gleichmäßiger Zellstruktur oder solche mit einem geschäumten Kern und einer kompakten Randzone (Integralschaum) produziert werden [1]. Extrudierte Schaumtafeln oder -folien können auch durch Thermoformen weiterverarbeitet werden. Ein Anwendungsbeispiel sind geschäumte PLA-Fleischschalen.

Bei Polyurethan entsteht die Schaumstruktur durch die Abspaltung von Wasser (Dampf) bei der Reaktion von Polyol mit Isocyanat (siehe Kap. 3.3.3).

Bild 4.8: Partikelschaum aus PLA/PBAT-Blend

Ein weiteres interessantes Gebiet sind die Partikelschäume. Bekannt vom EPS (Expandiertes Polystyrol) haben nun auch Partikelschäume aus PLA und Polyhydroxyalkanoat (PHA) Einzug in den Markt gehalten [47]. Dazu werden kleine Kügelchen mit einem Treibmittel (z. B. Pentan oder auch CO_2) beladen. Eine Form wird volumetrisch mit diesen Kügelchen gefüllt und dann erhitzt. Dabei vergrößern sich die Kügelchen und verschmelzen aufgrund des hohen Druckes miteinander. Seit einigen Jahren wird auch ein Partikelschaum aus einem PLA/PBAT-Blend angeboten (s. Foto) [89].

Partikelschäume aus reinem PBAT und Blends mit anderen Biokunststoffen wurden 2019 von einem chinesischen Unternehmen vorgestellt [105].

4.3.7 Gießen

Es gibt allerdings auch Biokunststoffe, die sich nicht thermoplastisch nach den oben genannten Verfahren verarbeiten lassen. So werden Folien aus Celluloseacetat nicht extrudiert oder geblasen, sondern gegossen.

4.3.8 Duromerverarbeitung

Im Gegensatz zu Thermoplasten sind Duromere vernetzt und daher nicht mehr unter Wärmeeinwirkung plastisch formbar und aufschmelzbar. Duromere sind meist Harzsysteme aus mehreren Komponenten, die zunächst recht dünnflüssig sind und durch die Vernetzungsreaktion aushärten. Duromere (oder duroplastische) Formmassen bestehen häufig aus dem Harz, Füllstoffen und/oder Verstärkungsfasern. Diese Formmassen können je nach Harz-Füllstoffzusammensetzung nach den unterschiedlichsten Verfahren weiterverarbeitet werden. Hierzu gehören das Pressen von SMC (Sheet-Moulding-Compound)- und BMC (Bulk-Moulding-Compound)-Verfahren, Handlaminieren, Faserspritzen, Faserwickeln, Prepregverfahren, Pultrusion, Harzinjektionsverfahren (RTM = Resin Transfer Moulding) und viele mehr.

4.3.9 Weitere Kunststoffverarbeitungsverfahren

Über die hier kurz beschriebenen hinaus gibt es noch eine Fülle weiterer Kunststoffverarbeitungsverfahren, die aber bislang nur sehr selten oder sehr bedingt für Biokunststoffe eingesetzt werden. Hierzu gehört das Rotationsformen zur Herstellung sehr großer und dickwandiger Hohlkörper wie große Erdtanks etc. Beim Kalandrieren wird ein Kunststoff-Compound auf einem großen Walzenstuhl geknetet. Weitere Verfahren sind beispielsweise das Pressformen und das Spritzprägen.

4.3.10 Fügen von Kunststoffen

Halbzeuge oder Bauteile aus thermoplastischen Kunststoffen lassen sich auf vielfältige Weise miteinander verbinden (fügen). Zu den bekanntesten Fügeverfahren gehört sicher das Kleben. Unter dem Einfluss von Druck und Wärme können thermoplastische Kunststoffe auch verschweißt werden. So können Rohre zusammengefügt oder Behälter, Verpackungen, Tragetaschen, Beutel und Säcke hergestellt werden. Dieses Prinzip der Kunststoffverarbeitung durch Schweißen ist in vielen Variationen weit verbreitet und hat beispielsweise als Folienschweißgerät zum Verpacken von Lebensmitteln in PE-Folienbeuteln bereits Einzug in viele Haushalte gehalten [1].

Im Gegensatz zu verschweißten Folien haben Peelfolien entlang der Siegelnaht eine Sollbruchstelle, durch die sich die obere Folie mit geringer Kraft von der unteren abziehen – peelen – lässt. Bei vielen Lebensmittelverpackungen (Wurst, Fleisch, Kaffee und Snacks) ist diese verbraucherfreundliche Verschlusstechnik nicht mehr wegzudenken. Die technische Machbarkeit von Peelfolien aus biobasierten Kunststoffen, wie z. B. PLA, wird zurzeit untersucht.

5 ANWENDUNGEN

Biokunststoffe werden heute bereits in einer Fülle von Anwendungen eingesetzt. Über die Marktentwicklung in Zahlen wird in Kap. 7 detaillierter eingegangen.

5.1 Verpackungen

Neben einfach aufgeschäumten Verpackungschips auf Stärkebasis (Bild 5.1), die eingefärbt auch als Kinderspielzeug verwendet werden können, gibt es mittlerweile eine Vielzahl von Verpackungen aus biobasierten Kunststoffen. Denn technisch ist fast alles möglich: Biokunststoffe lassen sich als Folien oder Mehrschichtfolien blasen, als Flachfolie extrudieren, sie können thermoformbar sein, können bedruckt, geschweißt, verklebt, mehrschichtig laminiert und auf vielfältige Weise zu Verpackungen konfektioniert werden. Kurzum: Verpackungsmittelhersteller und Verpacker können viele verschiedene Biokunststoffe auf fast allen herkömmlichen Maschinen ohne Probleme verarbeiten [1].

Erste Verpackungsanwendungen von biobasierten Kunststoffen waren Tragetaschen, die als Sammelbeutel für kompostierbare Küchen- und Gartenabfälle noch einen Zweitnutzen besitzen, thermogeformte Einleger für Pralinen, Schalen für Obst, Gemüse, Fleisch und Eier (auch geschäumt), Becher für Molkereiprodukte, Flaschen, Netze oder Beutel für Obst und Gemüse. Auch Blisterverpackungen, bei denen die Folie eng an die Kontur des verpackten Produktes angepasst ist, sind möglich. Für den Kosmetikbedarf gibt es Dosen oder Tuben. Packstoffe aus Biokunststoffen mit Sperrwirkung, Aromadichte und guter Maschinengängigkeit sind verfügbar und werden permanent weiterentwickelt [1].

Bild 5.1: Verpackungsflocken auf Stärkebasis

Beschichtungen von Papier- und Kartonverbunden mit Biokunststoffen führen zu neuen Verpackungen mit guter Feuchtigkeits- und Fettbeständigkeit [48].

In den USA wurde bereits 2005 eine Mineralwasserflasche aus PLA im Markt eingeführt. Dieser folgten noch eine Reihe weiterer Flaschen für Wasser, Milch und Säfte in Nordamerika, Europa, Australien, Neuseeland und weiteren Regionen. Viele dieser Flaschen

sind aus unterschiedlichen Gründen vom Markt wieder verschwunden. Wurden die Flaschen zunächst mit ihrer biologischen Abbaubarkeit beworben, stellte man schnell fest, dass dies nicht auf Dauer funktionieren kann.

Dem Verpackungsbereich wird nach wie vor ein großes Wachstumspotenzial für Biokunststoffe zugesprochen. Auch wenn die Entsorgung von gebrauchten Verpackungen aus diesen Kunststoffen auf verschiedene Weise erfolgen kann (siehe Kap. 6), ist zu bedenken, dass eine Entsorgung via Kompostierung in Deutschland aufgrund gesetzlicher Regelungen nicht möglich ist.

© Unicoop

© FKuR

Bild 5.2: Dünne Obstbeutel, können auch als Bioabfallbeutel genutzt werden

Bild 5.3: Obstnetz aus Biokunststoff

Ähnlich kurzlebig wie Verpackungen sind in der Regel auch Cateringprodukte. Einmal verwendet wandern Becher, Teller und Besteck mitsamt den anhaftenden Essensresten in den Müll, der sich bei Festen und anderen Großveranstaltungen schnell in großen Mengen anhäuft. Geschirr aus biobasiertem Kunststoff, das zu dem noch kompostierbar ist, bietet eine Alternative. So lassen sich Cateringprodukte mit samt den Essensresten (wo erlaubt) gemeinsam verwerten.

© FKuR

Bild 5.4: Tuben aus Bio-PE

© Vegware

Bild 5.5: Catering-Geschirr aus PLA

5.2 Gartenbau und Landwirtschaft

Neben den allgemeinen, bereits umfassend diskutierten Vorteilen biobasierter Kunststoffe spielen im Garten- und Landschaftsbau sowie in der Landwirtschaft die biologische Abbaubarkeit und damit eine mögliche Kompostierbarkeit eine besondere Rolle. Sinnvoll eingesetzt kann sie dem Gärtner oder Landwirt eine Menge Arbeit sparen. Mulchfolien (Bild 5.6) aus biologisch abbaubaren Kunststoffen lassen sich nach Gebrauch unterpflügen und müssen nicht mühsam wieder eingesammelt und als verschmutzter Kunststoffabfall teuer entsorgt werden. Pflanz- und Anzuchttöpfe zersetzen sich im Boden und fallen erst gar nicht mehr als Abfall an. Schalen aus entsprechenden biologisch abbaubaren Kunststoffen für Blumen- und Gemüsepflanzen können gemeinsam mit Gartenabfällen kompostiert werden [1].

Kostensparend sind auch Biokunststoff-Bindegarne, -Bänder und -Clips (Bild 5.7) zum Befestigen von hochwachsenden Pflanzen wie beispielsweise Tomaten oder für andere Halteaufgaben. Während die bisher eingesetzten Produkte nach der Ernte von Hilfskräften mühsam wieder abgesammelt werden oder gegen hohe Aufpreise mit dem Grünabfall entsorgt werden müssen, können die biologisch abbaubare Varianten mitsamt den Pflanzen auf den Kompost wandern [1].

Auch kompostierbare Samenbänder und Wirkstoffverkapselungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen sind gebräuchlich. Abbaubare Folien und Netze werden in der Pilzzucht verwendet, ebenso für die Ummantelung von Baum- und Strauchwurzeln als Verkaufsware. Folien, Gewebe und Netze aus abbaubaren Biokunststoffen sollen frisch angelegte Böschungen befestigen und die Bodenerosion verhindern, bis sie durch Pflanzen stabilisiert werden.

Bild 5.6: Mulchfolie

Bild 5.7: Clip aus Wein-Trester-Biokomposit – hält ein Netz, um reifende Trauben zu schützen

5.3 Medizin und Körperpflege

Im medizinischen Bereich werden seit vielen Jahren spezielle Biokunststoffe verwendet. Solche resorbierbaren Biokunststoffe sind vielfältig einsetzbar [1]: Thermoplastische Stärke (TPS) stellt beispielsweise eine Alternative zur Gelatine als Kapsel- und Pillenmaterial dar. PLA und deren Copolymere werden als chirurgisches Nahtmaterial, als Wirkstoffdepot oder als resorbierbare Implantate wie Schrauben, Nägel und Platten verwendet, die im Körper über den Stoffwechsel abgebaut werden und so eine weitere Operation zur Entnahme überflüssig machen.

Besondere Eigenschaften bestimmter Biokunststoffe prädestinieren sie auch für Hygieneartikel: diese Materialien lassen zwar Wasserdampf durch, sind zugleich aber wasserdicht. Als Windelfolie, Bettunterlage, für Inkontinenzprodukte, Damenhygieneerzeugnisse und Einmalhandschuhe werden diese „atmenden“ und weichen Folien bereits verwendet [1].

Im großen Bereich der Körperpflege halten immer mehr Biokunststoffe Einzug. Lippenstiftgehäuse und Tiegel für Puder und Cremes sind ebenso erhältlich wie die ersten Shampooflaschen aus biobasiertem Polyethylen. Dies ist sicher ebenso wie im Verpackungsbereich nur eine kleine Auswahl der Vielzahl bereits am Markt verfügbarer Produkte.

5.4 Unterhaltungselektronik

Im Gegensatz zum medizinischen Bereich oder dem Gartenbau spielt bei Anwendungen in der Unterhaltungselektronik die biologische Abbaubarkeit keine Rolle. Hier, wie bei allen langlebigen Gütern, ist die biologische Herkunft aus nachwachsenden Rohstoffen der wesentliche Aspekt.

Zu den ersten Unterhaltungsgeräten, bei denen biobasierte Kunststoffe zum Einsatz kamen, gehörte der Sony Walkman™. Hier wurde bereits im Jahr 2002 PLA verwendet.

Ein japanisches Smartphone wurde im Jahr 2015 mit einer Touchpanel-Frontscheibe aus einem Isosorbid-basierten Biokunststoff (vgl. Kap 3.3.1 – Biobasiertes Polycarbonat) ausgestattet. Das Material zeichnet sich gegenüber Glas durch die gute Schlagzähigkeit aus und ist teilweise biobasiert. Heute sind bereits eine Fülle von elektronischen Geräten von der Computermaus über Tasta-

© Sharp/Mitsubishi Chemical

Bild 5.8: Smartphone mit Isosorbid-basiertem Biokunststoff im Touchpanel

© FKuR/Fujitsu | allefarben-foto

Bild 5.9: Computertastatur – Gehäuse aus Cellulose-basiertem Kunststoff, Handauflage aus Lignin-basiertem Material

Bild 5.10: Computermaus – Gehäuse aus PLA

turen bis hin zu Kopfhörerkomponenten mit Gehäuse- oder Bauteilen aus biobasierten Kunststoffen am Markt erhältlich.

5.5 Automobilbau

Wie in Kap. 3.1 dargestellt, hat Henry Ford in den USA bereits zu Beginn des letzten Jahrhunderts mit Weizen und Soja für Biokunststoffe in Automobilanwendungen experimentiert. Seit 2011 setzt Ford bei allen in Nordamerika gebauten Fahrzeugen Soja-basiertes Polyol als Polyurethan-Komponente für Sitze, Kopfstützen oder Armlehnen ein.

Ein weiterer Pionier ist Toyota. Im Prius, einem der ersten Hybrid-Fahrzeuge des japanischen Herstellers, wurde eine Reserverad-Abdeckplatte aus PLA mit Kenaf-Faserverstärkung vorgestellt. Bei einer nur in Japan erhältlichen Hybridlimousine von Toyota sowie bei Honda wurden erstmals die Sitzbezüge und die Fußraumauslage aus teil-biobasiertem PET gefertigt [49].

Auch im Motorraum kommen Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zum Einsatz. Polyamid 11 aus Rizinusöl ist seit rund 70 Jahren für Automobilanwendungen bekannt und eignet sich hervorragend für Kraftstoffleitungen und Anschlussstücke, gerade auch für Bio-Ethanol (E10 etc.) und Biodiesel-Kraftstoffe. 2013 stellte Mercedes eine A-Klasse vor, in der ein vollständig biobasiertes PA 4.10 als Motorraumabdeckung zum Einsatz kam [90].

Ein biobasiertes Polyester-Elastomer bildet die Grundlage für die Entwicklung eines vollfunktionsfähigen Lenkrades mit eingebautem Airbag, das zu mehr als 50 % aus nachwachsenden Rohstoffen besteht [50].

Der bereits mehrfach erwähnte Isosorbid-basierte Biokunststoff wird u. a. bei Mazda als unlackiertes Hochglanz-Bauteil im Kühlergrill eingesetzt [88].

Bild 5.11/5.12: Mazda CX-5 mit Kühlergrill aus Isosorbid-basiertem Biokunststoff

Dass auch tragende Karosserieteile aus biobasierten Materialien erzeugt werden können, zeigen die Forschungsarbeiten am sogenannten „Bioconcept-Car“, das als Modell für die Erprobung verschiedener biobasierter, teilweise faserverstärkter Karosserie-Bauteile dient [66].

Bild 5.13: Autotür aus naturfaserverstärkten Kunststoff

5.6 Textil

Mit dem Begriff Polyester verbinden ohnehin viele Menschen zunächst einmal Textilien und erst bei genauerem Hinsehen einen „Kunststoff“. Und so ist es nicht verwunderlich, dass sich auch die meisten Biopolyester zu Fasern verspinnen und zu Textilien verarbeiten lassen. Dies sind in erster Linie PLA und PTT.

Die Anwendungsbeispiele sind vielfältig und reichen von Kinderschuhen über Bademoden und Brautkleider bis hin zu Herren-Business-Oberhemden und Haute-Couture Kleidern.

Letztendlich sind Textilien aus nachwachsenden Rohstoffen fast so alt wie die Menschheit: Leinen, Baumwolle und andere natürliche Fasern haben im Textilbereich eine lange Geschichte. Die modernen Textilien aus nachwachsenden Rohstoffen verbinden jedoch ihre „biologische“ Herkunft

mit den technischen Errungenschaften moderner Mikrofasertextilien wie insbesondere dem guten Feuchtigkeitstransport, sodass Schwitzen (fast) kein Problem mehr ist.

Ein österreichischer Anbieter von Cellulosebasierten Viskosefasern, Modalfasern und Lyocellfasern erhielt 2019 von einem unabhängigen belgischen Forschungslabor weitere internationale Zertifizierungen, die bestätigen, dass diese Faserprodukte sowohl in der industriellen Kompostierung als auch in der Erde, sowie in Süß- und Meerwasser biologisch abbaubar sind [106].

© FENC

Bild 5.14: T-Shirt aus 100 % biobasiertem PET

5.7 Bauen und Wohnen

Ein weiterer Anwendungsbereich, in dem Biokunststoffe bereits heute in vielfältiger Weise zum Einsatz kommen, ist der Bereich Bauen und Wohnen. Anwendungsbeispiele sind Teppiche aus PLA oder PTT sowie sonstige Wohn- und Heimtextilien. Biobasierte Schäume wie Polyurethan eignen sich zur Herstellung von Polstermöbeln, Partikelschäume aus PLA werden zur Gebäudeisolation eingesetzt. Gerade im Bereich der Dämmstoffe haben auch Naturfaserdämmungen und cellulosebasierte Einblasdämmstoffe bereits seit langem einen Markt. Ein großes Anwendungsfeld für sogenannte WPC (Wood Plastic Composites, meist mit PP als Matrixwerkstoff) sind Terrassendecks und auch Fassadenverkleidungen.

© DuPont

Bild 5.15: Teppich aus PTT-Fasern

Bild 5.16: Umleimer aus PLA

Bild 5.18: Biokunststoff-Fassade

Auch im Bereich der Möbelindustrie halten biobasierte Kunststoffe Einzug. 2019 kam in den USA ein PLA basierter Umleimer für Möbelplatten auf den Markt (Bild 5.16). Ein italienisches Unternehmen stellte 2017 einen Stuhl und 2019 ein Schubladenschränkchen aus PHA vor (Bild 5.17).

Für den Außenbereich stellten verschiedene Stuttgarter Hochschulinstitute 2013 ein Moos-Fassadenmodul vor, das auf thermogeformten PLA-basierten Elementen basiert (Bild 5.18). Das Moos nimmt Feinstaub als Dünger auf und setzt ihn in Pflanzenmasse um. Zudem weist 1 cm³ Moos eine Oberfläche von 0,17 m² auf. Diese Oberflächenvergrößerung um den Faktor 30 führt zu einer hohen Schallabsorption [91].

Bild 5.17: Schubladenschränkchen aus PHA

5.8 Spiel und Sport

Plastik ist das am häufigsten verwendeten Material für Spielzeug und viele Freizeitprodukte. Nach wie vor rangieren Kunststoffe vor Holz, Pappe und Textilien (einschließlich Plüsch), die letztlich auch sehr oft aus synthetischen Fasern bestehen. Da Spielzeug so gesund und nachhaltig wie möglich sein sollte, haben die ersten Hersteller von Kunststoffspielzeug inzwischen damit begonnen, auf Kunststoffe aus biobasierten Materialien umzustellen.

So gibt es inzwischen Babyspielzeug aus PLA, Bio-PE oder stärke-basierten Biokunststoffen. Strandspielzeug wird aus Bio-PE oder PHA angeboten, wobei letzteren die Eigenschaft zugesprochen wird, dass sie bei versehentlichem „Abhandenkommen“ auch im Meerwasser biologisch abgebaut werden können.

Weitere Beispiele sind Bauklötze aus Holzfaser- oder Holzmehl gefüllten Biokunststoffen oder Spielzeugautos und -traktoren aus Bio-PE oder WPC.

Bild 5.19: System-Steck-Elemente aus PLA/PHA Blend

Selbst Rutscheautos werden inzwischen aus Bio-PE angeboten (s. Bild 4.5).

Ebenfalls aus Bio-PE sind seit 2018 die weichen Bäume und Sträucher eines weltbekannten dänischen Herstellers von Bausteinen.

Auch im Sport- und Freizeitbereich nimmt die Anzahl der Anwendungen stetig zu. Dazu zählen der Griff eines Nordic-Walking Stockes aus teil-biobasiertem Polyamid 6.10, der bereits 2009 vorgestellt wurde, ebenso wie der Skischuh und Sportschuhe für die unterschiedlichsten Sportarten mit Teilen aus biobasierten Elastomeren. Ergänzt wird das Sport-Sortiment u. a. durch Brillen und Sonnenbrillen mit hochwertigen optischen „Gläsern“ aus klarem Bio-Polyamid.

Der zur Fußball-Weltmeisterschaft 2010 eingesetzte Ball bestand zu großen Teilen aus einem biobasierten Elastomer (Bild 5.21).

Bild 5.20: Bauklötze aus holzgefülltem Bio-PE

Bild 5.21: Fußball der WM 2010 aus biobasiertem Elastomer [107]

5.9 Haushalt

Schreibtisch-Utensilien können aus PLA hergestellt werden. Klebebänder aus Cellulose-Materialien oder biaxial orientiertem PLA (BoPLA) werden inzwischen auch mit weiteren bio-basierten Klebstoffen kombiniert.

2017 wurde eine Getreidemühle vorgestellt, deren Gehäuse aus einem speziellen Blend auf der Basis von PLA/PHA besteht (Bild 5.23).

Weitere Beispiele sind Frischhaltedosen aus Bio-PE oder PLA/PHA-Blends sowie Klebestifte und Textmarker mit Bio-PE-Gehäusen.

Bild 5.22: Schreibtisch-Utensilien aus PLA

Bild 5.23: Getreidemühle mit Gehäuse aus PLA/PHA Blend

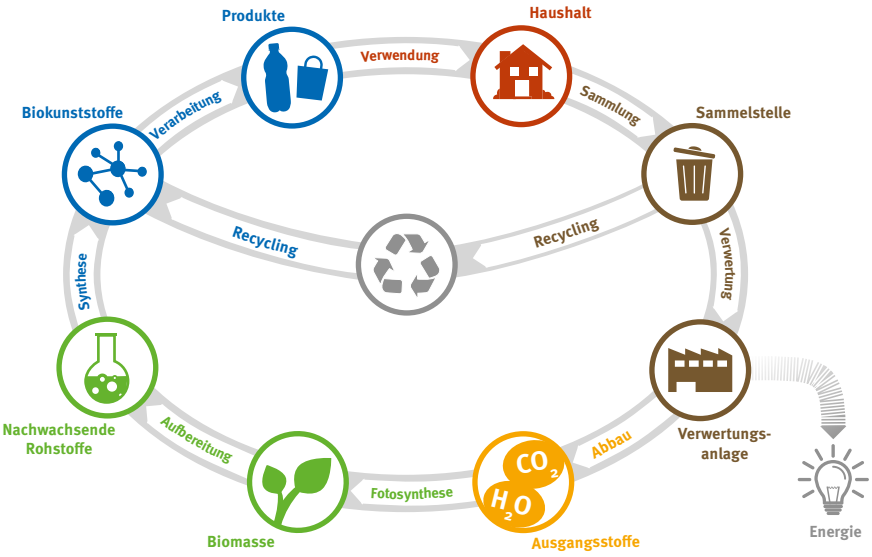
6 RECYCLING – VERWERTUNG – ENTSORGUNG

Und was ist, wenn die schönen Kunststoffprodukte irgendwann kaputt, verbraucht oder nicht mehr nutzbar sind? Hier gibt es eine ganze Reihe sogenannter „End-of-Life"-Szenarien. Prinzipiell gilt für die Verwertung und Entsorgung von biobasierten Kunststoffen, wie bei anderen Wertstoffen auch, dass geschlossene Kreisläufe anzustreben sind.

Gemäß dem 2012 novellierten Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) wird Kreislaufwirtschaft als „Vermeidung und Verwertung von Abfällen" definiert.

Bei der Verwertung von Biokunststoffen sollte immer im Vordergrund stehen, dass sowohl der gespeicherte biobasierte Kohlenstoff als auch die enthaltene Energie in technischen Kreisläufen recycelt werden. Gerade Biokunststoffe ermöglichen eine intelligente Ressourcennutzung und sorgen für eine hohe Wertschöpfung in einer CO_2-armen Wirtschaft.

BIOKUNSTSTOFF-KREISLAUF



Quelle: FNR

© FNR 2015

Abb. 6.1: Biokunststoff-Kreislauf

6.1 Relevante deutsche Gesetze und Verordnungen

Es gibt in Deutschland eine Reihe von Gesetzen und Verordnungen, die auch für Produkte aus biobasierten Kunststoffen relevant sind. Neben der Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV), dem Batteriegesetz (BatterieG) sowie dem Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) ist dies zurzeit vor allem das Verpackungsgesetz (VerpackG).

6.1.1 Verpackungsgesetz

Das VerpackG regelt, das Inverkehrbringen von Verpackungen sowie den Umgang mit gebrauchten Verpackungen. Es ist am 01.01.2019 in Kraft getreten und hat die bis dahin gültige Verpackungsverordnung (VerpackV) abgelöst.

Laut § 21, Abs. 1, Satz 2 des VerpackG ist neben dem Einsatz von Recyclaten die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen zu fördern. Die Unternehmen müssen zur Sammlung und Entsorgung von gebrauchten Verkaufsverpackungen Beteiligungsentgelte so bemessen, dass Anreize zur Herstellung von Verpackungen aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Das gesetzliche Ziel ist die „Förderung“ dieser Verpackungen im Sinne einer „gesamtökologischen“ Entwicklung (vgl. [51]).

Neben bekannten Verpackungsmaterialien wie Papier, Pappe oder Holz gehören auch Kunststoffverpackungen, welche zumindest teilweise aus nachwachsenden (biobasierten) Rohstoffen hergestellt werden dazu. Derartige Produkte, zu denen verschiedene Polymere und Verpackungsanwendungen gehören, besitzen ein erhebliches wirtschaftliches und ökologisches Potenzial im Sinn einer nachhaltigen Entwicklung. Hier kann § 21 (1) 2 VerpackG eine Unterstützung leisten (vgl. [51]).

6.1.2 Bioabfallverordnung

Mit der Novellierung der Bioabfallverordnung (BioAbfV – Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden) Mitte 2012 wurde die Kompostierung als Entsorgungsoption für biobasierte Produkte, die biologisch abbaubar sind, stark eingegrenzt. So sind in Deutschland derzeit nur noch wenige Produkte, wie z. B. zertifiziert kompostierbare Bioabfallbeutel oder Kaffeekapseln in der Biotonne erlaubt, und auch nur dort, wo die zuständigen Gebietskörperschaften keine weiteren Einschränkungen erlassen.

6.2 Recycling

Unter Recycling (aus dem Englischen für „Wiederverwertung“ oder „Wiederaufbereitung“) versteht man ganz allgemein Vorgänge, bei denen aus nicht mehr benötigten Produkten ein Sekundärrohstoff hergestellt wird. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) definiert Recycling als – „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und

die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.“ – Damit zählt die Kompostierung zu den Recycling-Verfahren, sie wird aber hier separat unter dem Aspekt der„biologischen Behandlung“ betrachtet.

Eine möglichst sortenreine Sortierung der Abfälle ist eine wesentliche Voraussetzung für die hier vorgestellten Recyclingverfahren.

6.2.1 Werkstoffliches Recycling

Werkstoffliches Recycling, auch stoffliches, physikalisches oder mechanisches Recycling, ist vereinfacht dargestellt das Zerkleinern, Reinigen, Wiederaufschmelzen und Regranulieren von Kunststoffabfällen. Hierbei bleibt der chemische Aufbau des Werkstoffs erhalten und der Sekundärrohstoff kann im Wesentlichen ohne Verluste wiederverwendet werden. Solches Recyklatmaterial, in Granulatform, ist je nach Reinheit und Qualität vielfältig für neue Kunststoffprodukte einsetzbar. Extrem sortenreine Abfälle, wie etwa Produktionsabfälle (Folien-Randbeschnitt, Angüsse etc.), werden oft sofort dem Produktionsprozess wieder zugeführt. Aber auch stark verunreinigte und sorten-unähnliche Kunststoffabfälle können unter Wärme und Druck zu Sekundärprodukten wie Parkbänken oder Böschungsabstützungen verarbeitet werden.

Die meisten Recyclingabfälle liegen irgendwo dazwischen. Werden in einer erneuten Verwendung der rezyklierten Kunststoffe Produkte von geringerer Qualität als zuvor produziert, spricht man auch von „Downcycling“. Dies versucht man, wo immer es geht, zu vermeiden oder so gering wie möglich zu halten.

Im Idealfall nutzt man Kunststoffe mehrere Male im Sinne eines Kaskaden-Recyclings, z. B. Waschmittelflasche – Tragetasche – Müllsack – Parkbank. Am Ende eines Kaskadenrecyclings kann aber auch eine energetische Verwertung stehen. Die meisten Biokunststoffe können werkstofflich wiederaufbereitet werden. In einigen Fällen sind unter Umständen zusätzliche Schritte erforderlich. So kann es z. B. bei PLA nötig sein, einen Aufkondensationsschritt oder einen speziellen Kristallisationsschritt durchzuführen.

Ein werkstoffliches Recycling ist bei sogenannten Drop-In-Biokunststoffen (Bio-PE, Bio-PP, Bio-PA, Bio-PET, etc.) auch zusammen mit den erdölbasierten Typen völlig problemlos, da diese chemisch absolut identisch sind. Auch das werkstoffliche Recycling neuartiger Bio Kunststoffe, wie beispielsweise PLA, ist technisch machbar. Wegen der zurzeit noch zu geringen Mengen ist dies jedoch noch nicht wirtschaftlich umsetzbar. Geringe Mengen solcher Biokunststoffe (PLA, PHA) stellen beim Co-Recycling mit Massenkunststoffen ebenfalls keine problematische Kontamination dar [108].

6.2.2 Rohstoffliches Recycling

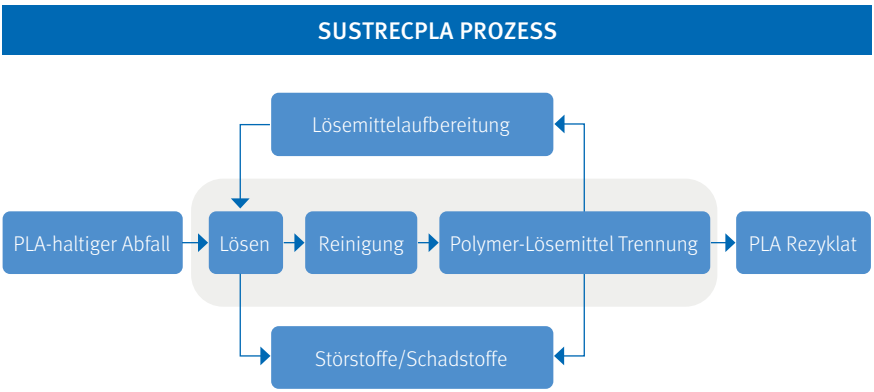
Wird der Altkunststoff nicht durch Schmelzen und Regranulieren einer erneuten Verwendung zugeführt, sondern in die chemischen Bausteine (Monomere) zurückgeführt, so spricht man von rohstofflichem oder chemischem Recycling (Feedstock-Recycling).

Ein lösungsmittelbasiertes Recycling hat sich für konventionelle Thermoplaste (PET, PS, ABS, PA, PVC etc.) bewährt und erzeugt aus kontaminierten und heterogenen Abfällen sehr reine und hochwertige Polymerrezyklate. Auch für PLA-haltige Kunststoffabfälle ist dieser Ansatz möglich. Dazu werden die Abfälle mit einem spezifischen Lösungsmittel behandelt, das in der Lage ist, PLA selektiv aus Abfallgemischen, Verbundverpackungen und PLA-Blends zu extrahieren (SustRecPLA Prozess, siehe Abb. 6.2) [92].

Ein weiteres Beispiel ist das chemische Recycling von PLA. In Anlagen, wie sie beispielsweise in USA und Belgien in Betrieb sind bzw. waren, wird das PLA wieder in Milchsäure umgewandelt und kann so anschließend entweder zu neuem PLA verarbeitet oder anderweitig verwendet werden [93, 94].

6.3 Energetische Verwertung

Biokunststoffe können nach ihrer Nutzung und einem möglichst häufigen Recycling energetisch verwendet werden. Die Erzeugung von Energie in Form von Wärme und Strom durch Verbrennung von Kunststoffabfällen ist das am häufigsten genutzte Verfahren zur Verwertung von Kunststoffabfällen in Europa. Und so lange für ein wirtschaftliches stoffliches Recycling keine ausreichenden Mengen zur Verfügung stehen, ist diese Art der Verwertung nach Meinung vieler Experten auch die sinnvollste. Der hohe Brennwert von Kunststoffen macht sie zu einem idealen Ersatz für Kohle oder Heizöl. Ob biobasiert oder aus fossilen Rohstoffen – technisch unterscheidet sich die energetische Verwertung nicht. Im Falle von biobasierten Kunststoffen lässt sich aus dem biogenen Kohlenstoff jedoch erneuerbare Energie gewinnen – und das ist ein großer Vorteil im Vergleich zur Verbrennung fossiler Ressourcen.



Quelle: Fraunhofer IVV

© FNR 2020

Abb. 6.2: SustRecPLA Prozess

6.4 Biologische Behandlung

6.4.1 Kompostierung

Für Kunststoffe, die unter bestimmten Bedingungen biologisch abbaubar sind, das heißt von Mikroorganismen in CO_2, Wasser und Mineralstoffe umgesetzt werden, besteht die Möglichkeit einer Kompostierung. Hierzu sind die einschlägigen Normen wie EN 13432, EN 14855, ASTM D6400 u. a. zu beachten.

Es gibt einige Anwendungen, bei denen die biologische Abbaubarkeit oder die Verwertung durch Kompostierung Zusatznutzen bringt.

Bei Events können, wo dies erlaubt und eine entsprechende Infrastruktur vorhanden ist, Catering-Geschirr und Speisereste zusammen einer Kompostierung zugeführt werden.

Bei der Treibhausproduktion von Tomaten werden seit jeher Kunststoff-Clips eingesetzt, um die Tomatenpflanzen an den Drähten festzuhalten und ein Wachstum in die Höhe zu ermöglichen. Nach der Tomatenernte können solche Clips aus kompostierbaren Kunststoffen zusammen mit den Grünabfällen entsorgt werden und müssen nicht getrennt eingesammelt werden. Trotz eines höheren Anschaffungspreises gegenüber herkömmlichen Clips ergeben sich so wirtschaftliche Vorteile für den Tomatenzüchter.

Als letztes Beispiel sei noch einmal die Mulchfolie genannt, die nach der Ernte untergepflügt werden kann (siehe Kap. 5.2).

Definition, Normen und Zertifizierung: „kompostierbar“

Ein Stoff, ein Material oder eine Substanz ist biologisch abbaubar oder bioabbaubar, wenn sie durch Mikroorganismen wie Bakterien, Protozoen[3] oder Pilze bzw. Enzyme abgebaut wird. Die Mikroorganismen nutzen die Substanz als Nahrung bzw. als Energiequelle. Dabei bleiben als Abbauprodukte Kohlendioxid (CO_2), Wasser und mineralische Salze sonstiger vorliegender Elemente (Mineralisierung) zurück [6].

Die Kompostierung ist ein Sonderfall des biologischen Abbaus, den sich der Mensch zur Verwertung von Abfällen zu Nutze macht. Dabei sind die Anforderungen einer industriellen Kompostierung anders als z. B. bei der Kompostierung im Garten (home composting) oder bei der natürlichen Abbaubarkeit in der Umwelt. In jedem Fall ist zu bedenken, dass bei der Kompostierung der Energiegehalt, der im Kunststoff steckt und während der Kompostierung zur Abwärme wird, nicht genutzt werden kann und somit verloren geht.

Gerade im Hinblick auf die Abbaubarkeit in der Umwelt wird gegenwärtig viel über den Abbau im Boden (soil degradability) sowie in Süß- und Meerwasser diskutiert. Dabei

[3] *Protozoen sind Einzeller mit Zellkern, wie Pantoffeltierchen, Amöben etc.*

ist zu anzumerken, dass eine Abbaubarkeit in diesen Umgebungen keine Lösungsansätze zum Thema Littering (unachtsames Wegwerfen), der Meeresverschmutzung durch Kunststoffabfälle oder inklusive der Mikroplastik-Problematik bieten kann. All dies ist eine Frage des Verhaltens der Bevölkerung und des Abfallmanagements in bestimmten Ländern, das nicht durch spezielle Materialien gelöst werden kann.

Kunststoffprodukte, die einer industriellen Kompostierung zugeführt werden sollen, müssen zunächst entsprechend der Normen, wie z.B. EN 13432 zur Kompostierbarkeit von Verpackungen [59] oder etwas allgemeiner von Kunststoffen (EN 14995 [60] und ASTM D6400 [61]), zertifiziert werden. Auf europäischer Ebene gehören DIN CERTCO (Deutschland) und TÜV Austria (Belgien) zu den unabhängigen Zertifizierungsgesellschaften. In den USA ist dies das BPI (Biodegradable Products Institute). Bei Einhalten der gesetzten Normwerte zur zeitabhängigen Umwandlung des Kohlenstoffs in CO_2, zum Verlust physikalischer Eigenschaften wie Gewicht und Größe sowie zu den toxikologischen Eigenschaften hergestellter Komposte darf ein entsprechendes, registriertes Logo vergeben werden. So muss sich ein Werkstoff, der ein Kompostierbarkeits-Logo trägt, innerhalb von sechs bis zwölf Wochen in der industriellen Kompostieranlage vollständig abbauen.

Wie eingangs dieses Kapitels erwähnt, sind in Deutschland gemäß Bioabfallverordnung (BioAbfV) derzeit nur noch wenige Produkte in der Biotonne, mit der der Abfall für die industrielle Kompostierung gesammelt wird, erlaubt. Bilder 6.1 bis 6.3 zeigen die bekanntesten Logos [62, 63, 64].

Bild 6.1: Logo für industrielle Kompostierung (European Bioplastics/DIN CERTCO)

Bild 6.2: Logo für industrielle Kompostierung (DIN CERTCO)

Bild 6.3: OK-Compost-Logo (TÜV Austria)

Eine Kompostierbarkeit in einer industriellen Anlage bedeutet nicht automatisch, dass sich das Produkt auch im Gartenkompost (home composting) biologisch abbaut. Für die Entsorgung im Gartenkompost eignen sich nur Kunststoffprodukte, die sich nachweislich bei weniger als 30 Grad Celcius innerhalb eines Jahres fast vollständig biologisch abbauen. Auch hier bieten DIN CERTCO und TÜV Austria eine Zertifizierung (nach

australischem Standard AS 5810) und ein entsprechendes Logo an.

Die von der EN 13432 festgelegte Kompostierbarkeit wird von weiteren gesetzlichen Rahmenbedingungen flankiert. Dazu zählen die EU-Verpackungsrichtlinie 94/62/EG und ein Entwurf für eine EU-Bioabfall-Direktive.

Bild 6.4: Logo für die Gartenkompostierbarkeit (DIN CERTCO)

6.4.2 Vergärung

Eine weitere Möglichkeit der Verwertung ist die Biogasifizierung, auch Anaerobic Digestion (AD) oder Vergärung genannt. Dabei bauen Mikroorganismen biogenes Material in Abwesenheit von Sauerstoff, d. h. unter anaeroben Bedingungen, ab [52].

Biologische Abfälle wie z. B. aus der Biotonne oder Gülle aus der landwirtschaftlichen Produktion eignen sich für die Vergärung. Das beim Vergärungsprozess entstandene Methangas kann zudem energetisch verwendet werden. Die Gärreste werden unterschiedlich weiterverwendet (z. B. Kompostierung, Düngung, Trocknung und Verbrennung).

Die Möglichkeiten, Abfälle aus biologisch abbaubaren Kunststoffen in Biogasanlagen in energetisch nutzbares Methan umzuwandeln, werden derzeit intensiv untersucht.

7 MARKT

7.1 Übersicht

Seit etlichen Jahren werden für die Produktion von Kunststoffen, vor allem im Bereich der Funktionspolymere (siehe Kap. 1), in großen Mengen nachwachsende Rohstoffe eingesetzt [53].

Betrachtet man allerdings nur die Strukturpolymere, also die Kunststoffe, mit denen sich die vorliegende Broschüre beschäftigt, machen nachwachsende Rohstoffe nur einen sehr geringen Teil der Rohstoffbasis aus. Der Biokunststoff-Markt hat zurzeit nur ein Volumen von ca. 1 % des Kunststoffmarktes.

Bis vor wenigen Jahren war der Biokunststoff-Markt im Wesentlichen geprägt durch Biokunststoffe, die sich die natürlichen Polymerstrukturen der nachwachsenden Rohstoffe zu Nutze machen. Die wichtigsten Vertreter dieser Gruppe sind Thermoplastische Stärke (TPS) und Cellulosederivate.

In den letzten Jahren hat sich diese Situation grundlegend geändert. Mittlerweile wird der Markt von den sogenannten Drop-In-Biokunststoffen dominiert. Das sind biobasierte (und teil-biobasierte) Standardkunststoffe wie Bio-Polyethylen (PE), Bio-Polyamid (PA) oder Bio-Polyethylenterephthalat (PET). Dieser schnelle Marktumbruch war zum einen möglich, da mehrere global agierende Unternehmen vor allem im Bereich Lebensmittelverpackung (Getränkeflaschen) ihre Produkte teilweise auf diese Biokunststoffe umgestellt haben. Zum anderen wurden diese Drop-In-Biokunststoffe von Beginn an auf großen Anlagen in vergleichsweise großen Mengen produziert. Da die Drop-In-Biokunststoffe im Vergleich zu den erdölbasierten Typen die gleichen Eigenschaften mitbringen, unterliegen sie einem direkten Preiskampf mit ihren konventionellen Geschwistern, sodass ihre Massenproduktion auf großen Anlagen eine wichtige Rolle bei ihrer Markteinführung spielt [54].

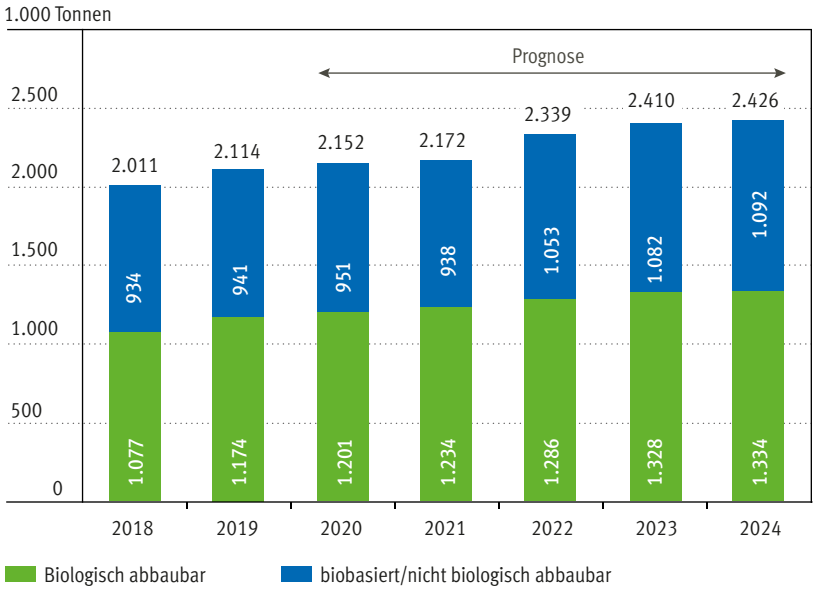
7.2 Marktzahlen

Alljährlich werden von verschiedenen Institutionen aktuelle Marktübersichten und -prognosen veröffentlicht. Dazu gehören beispielsweise die „Biopolymers facts and statistics“ des Instituts für Biokunststoffe und Biowerkstoffe der Hochschule Hannover (IfBB) [95] und die „Bioplastics market data“ [96] des Verbandes European Bioplastics, die in Zusammenarbeit mit dem nova-Institut zusammengestellt werden.

Wie in Abbildung 7.1 zu sehen ist, wird erwartet, dass die Produktionskapazitäten für Biokunststoffe bis 2024 auf mehr als 2,4 Mio. Tonnen steigen werden [96].

Welche Biokunststoff-Typen sich hinter diesen Marktzahlen verbergen, zeigt die Abbildung 7.2, in der die Produktionskapazitäten für Biokunststoffe aufgeteilt nach Kunststofftypen für 2019 zu sehen sind.

WELTWEITE PRODUKTIONSKAPAZITÄTEN FÜR BIOKUNSTSTOFFE



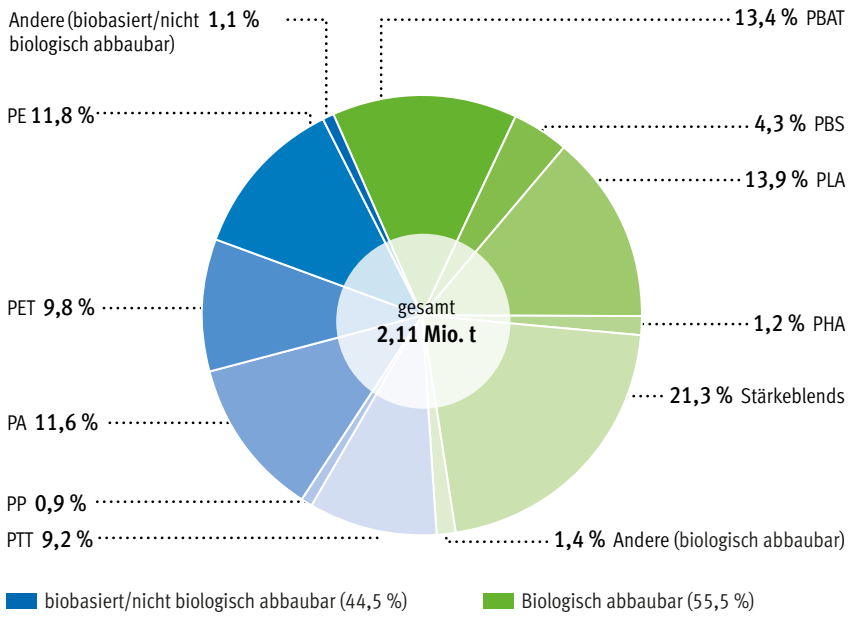
Quelle: european bioplastics, nova-Institut

© FNR 2020

Abb. 7.1: Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe (Werte ab 2020 geschätzt)

Trotz der oben beschriebenen Marktzuwächse stehen Biokunststoffe immer noch am Anfang ihrer Entwicklung. Bei einem Gesamtmarkt für Kunststoffe von geschätzten 348 Mio. Tonnen in 2017 [3] werden Biokunststoffe als werkstoffliche Anwendung auch in den nächsten Jahren mengenmäßig nicht mehr als 2 % ausmachen. Rein technisch gesehen könnten jedoch bis zu 90 % aller Kunststoffe von fossilen auf nachwachsende Quellen umgestellt werden. Kurz- und mittelfristig wird diese Umstellung jedoch u. a. aufgrund der wirtschaftlicher Hürden und auch der kurzfristig in diesem Umfang nicht verfügbaren Biomasse nicht möglich sein [56].

MARKTANTEILE DER VERSCHIEDENEN BIOKUNSTSTOFF-TYPEN



Quelle: european bioplastics, nova-Institut

© FNR 2020

Abb. 7.2: Marktanteile Biokunststoffe (2019)

8 ANHANG

8.1 Internet-Informationsquellen

www.fnr.de	FNR – Allgemeine Informationen
www.biowerkstoffe.fnr.de	FNR – Informationen rund um biobasierte Kunststoffe und Verbundwerkstoffe
www.bmel.de	BMEL – Informationen zu Bioökonomie und Nachwachsenden Rohstoffen
www.european-bioplastics.org	Informationen des europäischen Industrieverbands
www.bio-based.eu	Nachrichtenportal
www.bioplasticsmagazine.com	Fachmagazin
www.materialdatacenter.com	Biopolymerdatenbank

8.2 Quellenangaben

[1] Lörcks, J.: Biokunststoffe, Broschüre der FNR, 2005

[2] N. N.: Wikipedia, Internetzugriff Januar 2020

[3] N. N.: Plastics – the Facts 2019, An analysis of European plastics production, demand and waste data, Plastics Europe, Brüssel, 2019

[4] DIN CEN/TR 16208:2011-07 (D) „Biobasierte Produkte – Übersicht über Normen; Deutsche Fassung CEN/TR 16208:2011“

[5] Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A.: Technische Biopolymere, Carl Hanser Verlag, 2009

[6] N. N.: DIN EN ISO 14855-1

[7] N. N.: Leistungsfähig und bioabbaubar, Presseinformation P-09-445, BASF 2009

[8] Kamm, B.; Kamm, M.; Schmidt, M.; Hirth, T.; Schulze, M.: Lignocellulose-based Chemical Products and Product Family Trees. In: Kamm, B.; Gruber, P.R.; Kamm, M. (Hrsg.): Biorefineries – industrial processes and products. Status quo and future directions. Wiley-VCH, Weinheim 2006, ISBN 3-527-31027-4, S. 67–84

[9] N. N.: www.duponttateandlyle.com, Internetzugriff Januar 2020

[10] N. N.: https://bioplasticsnews.com/wp-content/uploads/2018/08/bio-bdo-novamont.pdf, Internetzugriff Januar 2020

[11] N. N.: www.clib2021.de, Internetzugriff Februar 2012

[12] Raschka, A.: Machbarkeits- und Potenzialstudie zu den Nutzungsmöglichkeiten von biomassebasiertem Synthesegas, http://nova-institute.eu/project/machbarkeits-und-potenzialstudie-zu-den-nutzungsmoglichkeiten-von-biomassebasiertem-synthesegas/, Internetzugriff Januar 2020

[13] Worden, E. C.: Nitrocellulose industry. New York, Van Nostrand, 1911, S. 568. (Parkes, Englisches Patent 2359 aus dem Jahr 1855)
[14] Carus, M.; Scholz, L.: How to Measure the Bio-based Content, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 03/2010
[15] Bastioli, C.: Basics of Starch-Based Materials, bioplastics MAGAZINE, Vol. 4, Ausgabe 05/2009
[16] Zepnik, S.; Kesselring, A.; Kopitzky,R.; Michels, C.: Basics of Cellulosics, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 01/2010
[17] N. N.: Weltproduktion von Chemiefasern, https://www.ivc-ev.de/de/weltproduktion-von-chemiefasern-balkendiagramm, Internetzugriff Februar 2020
[18] N. N.: Steigerung der Leistungsfähigkeit von biobasierten Kunststoffen, http://www.dupont.de/produkte-und-dienstleistungen/plastics-polymers-resins/thermoplastics/brands/hytrel-thermoplastic-elastomer/products/hytrel-rs-biobased-polymers.html, Internetzugriff September 2019
[19] N. N.: www.pebax.com, Internetzugriff, Januar 2020
[20] Fink, H.-P.: Basics of Lignin, MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 01/2011
[21] Fink, H.-P.; Engelmann, G.; Ebert, A.: Lignin als Polymerwerkstoff, FNR-Fachgespräch Stoffliche Nutzung von Lignin, Berlin, März 2009
[22] N. N.: Stoffliche Nutzung von Lignin, Gülzower Fachgespräche, Band 31, FNR, 2009
[23] N. N.: www.wdk.de, Internetzugriff Januar 2020
[24] N. N.: Bio-Based Biodegradable PHA Foam, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 01/2010
[25] Fernyhough, A.: From Waste 2 Gold: Making bioplastic products from biomass waste streams, bioplastics MAGAZINE, Vol. 2, Ausgabe 04/2007
[26] N. N.: High heat becomes a reality (2017), https://www.total-corbion.com/about-pla/performance/, Internetzugriff September 2019
[27] N. N.: Mazda introduced 'Biotechmaterial' for interior applications, bioplastics MAGAZINE, Vol. 3, Ausgabe 02/2008
[28] Inomata, I.: The Current Status of Bioplastics Development in Japan, bioplastics MAGAZINE, Vol. 4, Ausgabe 01/2009
[29] N. N.: The Coca-Cola PlantBottle, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 06/2010
[30] N. N.: Bio-PET, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 06/2010
[31] Morgan, K.: Completing the Puzzle: 100 % plant-derived PET, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 04/2011
[32] Thielen, M.: Basics of bio-polyamides, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 03/2010

[33] Mostyn, T.: Global polyethylene capacity growth to be led by Asia and North America, https://www.hydrocarbonengineering.com/petrochemicals/22042019/global-polyethylene-capacity-growth-to-be-led-by-asia-and-north-america/, Internetzugriff Oktober 2019
[34] N. N.: Mitsui Chemicals working on commercialisation bio-PP, https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20190930Mitsui-Chemicals-working-on-commercialisation--bio-PP.php, Internetzugriff Oktober 2019
[35] N. N.: Solvay Indupa will produce bioethanol-based vinyl in Brasil, Solvay Presse-Information, Dezember 2007
[36] Smith, C.: Braskem commits to producing bio-based polypropylene, Plastics News online, 28.10.2010
[37] Mannermaa, T.: The First Step to Sustainable Composites, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 03/2011
[38] N. N.: Full System Ahead: The Rise of Bio-Based Thermoset, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 03/2011
[39] Boonyaporn, P.: Enabling Sustainable Epoxy Resins, European Coatings Journal 04 – 2019
[40] Stemmelen, R. et al.: A Fully Biobased Epoxy Resin from Vegetable Oils, Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 49: 2434–2444. doi: 10.1002/ pola.24674
[41] Verlinden, R.; Hill, D.; Kenward, M.; Williams, C.; Piotrowska-Seget, Z.; Radecka, I.: Production of polyhydroxyalkanoates from waste frying oil by Cupriavidus necator, www.amb-express.com/content/1/1/11, Internetzugriff Dezember 2011
[42] N. N.: How to Produce BOPLA Films, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 06/2010
[43] Thielen, M.; Hartwig, K.; Gust, P.: Blasformen von Kunststoffhohlkörpern, Carl Hanser Verlag, 2. Auflage 2019
[44] Petrascheck, E.: You never forget your first car, bioplastics MAGAZINE, Vol. 14, Ausgabe 03/2019
[45] Yoder, L.; Plastic Technologies, Inc.: Basics of Stretch Blow Moulding, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 04/2011
[46] Oberbach, K.; Baur, E.; Brinkmann, S.; Schmachtenberg, E.: Saechtling Kunststoffhandbuch, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004
[47] N. N.: Kaneka @ Foam Expo Europe 2018, http://www.kaneka.be/news/kaneka-foam-expo-europe-2018, Internetzugriff Oktober 2019
[48] Manjure, S.: PLA for Paper Coating, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 05/2011
[49] N. N.: Toyota setzt auf Biokunststoff, http://nachrichten.rp-online.de/auto/toyota-setzt-auf-biokunststoff-1.2509333, Internetzugriff Januar 2020

[50] Gaumann, U.: Biobased polymers for automotive safety components, bioplastics MAGAZINE, Vol. 8, Ausgabe 01/2013
[51] Kaeb, H.: Infopapier: Biobasierte Kunststoffverpackungen im Verpackungsgesetz (FNR) https://biowerkstoffe.fnr.de/fileadmin/biopolymere/dateien/pdfs/Infopapier-Systeme-final.pdf, Internetzugriff Januar 2020
[52] de Wilde, B.: Basics of Anaerobic Digestion, bioplastics MAGAZINE, Vol. 4, Ausgabe 06/2009
[53] Schütte, A.: Biobasierte synthetische Polymere – ein Überblick, Dechema, Workshop: Polymermonomere aus nachwachsenden Rohstoffen, 2011
[54] Carus, M. (Hrsg.): Market study on Bio-based Polymers in the world, 2013
[55] Endres, H.-J. et al.: Marktchancen, Flächenbedarf und zukünftige Entwicklungen, KUNSTSTOFFE 09/2011. S. 105ff
[56] Shen, L.; Haufe, J.; Patel, M.: Product overview and market projection of emerging bio-based plastics, PRO-BIB Studie, Universiteit Utrecht, 2009
[57] N. N.: Häufig gestellte Fragen zur Nutzung von landwirtschaftlichen Ressourcen für die Produktion von Biokunststoffen (FAQ Januar 2020), European Bioplastics
[58] Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A.: Raw materials and arable land required for biopolymers, Bioplastics Magazine, Vol. 4, Ausgabe 05/09
[59] N. N.: Verpackung – Anforderungen an die Verwertung von Verpackungen durch Kompostierung und biologischen Abbau – Prüfschema und Bewertungskriterien für die Einstufung von Verpackungen, Deutsche Fassung EN 13432:2000
[60] N. N.: Kunststoffe – Bewertung der Kompostierbarkeit – Prüfschema und Spezifikationen, Deutsche Fassung EN 14995:2006
[61] N. N.: ASTM D6400 – 04 Standard Specification for Compostable Plastics
[62] N. N.: Logos Part 1: The “Compostable” logo of European Bioplastics (Basics), bioplastics MAGAZINE, Vol. 1, Ausgabe 01/06
[63] https://www.dincertco.de/de/dincertco/produkte_leistungen/zertifizierung_produkte/umwelt_1/industriell_kompostierbare_produkte/industriell_kompostierbare_produkte.html, Internetzugriff März 2020
[64] N. N.: http://www.tuv-at.be/de/ok-compost/zertifizierungen/ok-compost-seedling/ Internetzugriff Januar 2020
[65] N. N.: ASTM D6866: Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis
[66] Habermann, C.: Mobility of the future, bioplastics MAGAZINE, Vol. 8, Ausgabe 01/2013
[67] Ziegler, L. et al.: Biopolymer Composites based on Lignin and Cellulose, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 01/2011
[68] Mangnus, P.: The world‘s next-generation polyester, bioplastics MAGAZINE, Vol. 7, Ausgabe 04/2012

[69] Korving, L.: High quality PHBV from wastewater (Phario, Netherlands), Vortrag 1st PHA platform World Congress, 2018, Köln
[70] Mynářová, L.: PHA – Circular Economy Concept (Hydal/Nafigate, Czech Republic), Vortrag 1st PHA platform World Congress, 2018, Köln
[71] Thielen, M.: Bioplastic fibres from milk, bioplastics MAGAZINE, Vol. 8, Ausgabe 05/13
[72] Chabance, P.: Packaging made with 100 % bio-based raw material (Lactips), Vortrag, 3. bio!PAC Konferenz, 2019, Düsseldorf
[73] Thielen, M.: Advances in the development of dandelion rubber, bioplastics MAGAZINE, Vol. 14, Ausgabe 02/2019
[74] N. N.: First Bio-based EPDMRubber in the World, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 06/2011
[75] Bradford, J.: Green Thermoplastic Elastomer (TPE) compounds, bioplastics MAGAZINE, Vol. 11, Ausgabe 05/2016
[76] N. N.: diverse Autoren: Vorträge beim 1st PHA platform World Congress 2018, Köln
[77] N. N.: BP, Virent Inc. and Johnson Matthey join forces to advance bio-paraxylene development, News am 11.03.2019, www.bioplasticsmagazine.com, Internetzugriff Januar 2020
[78] Garelik, A.: Making 100 % biobased PET a reality (Anellotech), Vortrag 3. bio!PAC Konferenz, 2019, Düsseldorf
[79] Kemeling, N.; van Berkel J.: PEF, a biobased polyester with a great future, bioplastics MAGAZINE, Vol. 10, Ausgabe 04/2015
[80] N. N.: Pentamethylen-Diisocyanat liefert biobasierten Vernetzer für Polyurethane, www.farbeundlack.de, 16. Januar 2015, Internetzugriff Januar 2020
[81] N. N.: Biobasierte Weichmacher für PVC, https://biooekonomie.de/nachrichten/biobasierte-weichmacher-fuer-pvc, 7. Dezember 2018, Internetzugriff Januar 2020
[82] Thielen, M.: New amorphous PHA grades as performance additives for PVC and PLA, bioplastics MAGAZINE, Vol. 11, Ausgabe 01/2016
[83] Thielen, M.: Flexible foams with algae, bioplastics MAGAZINE, Vol. 10, Ausgabe 05/2015
[84] Thielen, M.: Barefoot shoe made from algae, bioplastics MAGAZINE, Vol. 12, Ausgabe 04/2017
[85] N. N.: Sorbitol, DocCheck Flexikon, https://flexikon.doccheck.com/de/Sorbitol, Internetzugriff Januar 2020
[86] N. N.: Durabio, https://www.mcpp-global.com/de/europa/produkte/brand/durabioTM/ Internetzugriff Juni 2019
[87] N. N.: In a world first, Sharp selects bio-based engineering plastic for smartphone front panel, https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20150710Shap-selects-Durabio-for-fron-panel.php, Internetzugriff Juni 2019

[88] Thielen, M.: Front grill of Mazda CX-5, bioplastics MAGAZINE, Vol. 13, Ausgabe 01/2018
[89] Sampath, B.: New compostable particle foam, bioplastics MAGAZINE, Vol. 12, Ausgabe 01/2017
[90] Thielen M.: Mercedes engine cover, bioplastics MAGAZINE, Vol. 8, Ausgabe 02/2013
[91] Köhler, C.: Biobased plastics for exterior facades, bioplastics MAGAZINE, Vol. 8, Ausgabe 04/2013
[92] N. N.: Nachhaltige Verwertungsstrategien für Produkte und Abfälle aus biobasierten Kunststoffen – SustRecPLA, https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/recycling-von-verpackungen/sustrecpla.html, Internetzugriff Juli 2019
[93] Fowler,P.; Kratz, W.; Tschida, R.: Chemically recycling post-consumer PLA, bioplastics MAGAZINE, Vol. 8, Ausgabe 03/2013
[94] Thielen, M.: Capacity for PLA Feedstock Recovery to Expand Significantly, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 06/2010
[95] N. N.: Biopolymers facts and statistics, https://www.ifbb-hannover.de/files/IfBB/downloads/faltblaetter_broschueren/f+s/Biopolymers-Facts-Statistics-2019.pdf, Internetzugriff Januar 2020
[96] N. N.: Bioplastics market data, https://www.european-bioplastics.org/market/, Internetzugriff Januar 2020
[97] N. N.: Holz; https://www.chemie.de/lexikon/Holz.html, Internetzugriff September 2019
[98] Lipponen, K.: IKEA and Neste take a significant step towards a fossil-free future, https://www.neste.com/ikea-and-neste-take-significant-step-towards-fossil-free-future, Internetzugriff März 2020
[99] Lipponen, K.: Pionierarbeit auch bei biobasierten Kunststoffen, https://www.neste.de/releases-and-news/neste-setzt-auf-kunststoffabfaelle-als-rohstoff-fuer-kraftstoffe-und-kunststoffe, Internetzugriff März 2020
[100] N. N.: Polyolefins from bio-naphtha/Commercial-scale pilot plant to start-up in autumn, https://www.plasteurope.com/news/IKEA_NESTE_t240099/, Internetzugriff März 2020
[101] Stark, A.: Neste und Lyondell Basell starten kommerzielle Produktion von biobasierten Kunststoffen, https://www.process.vogel.de/neste-und-lyondell-basell-starten-kommerzielle-produktion-von-biobasierten-kunststoffen-a-840327/, Internetzugriff März 2020
[102] N. N: Borealis produziert zertifiziertes, erneuerbares Polypropylen in Belgien, https://www.plastverarbeiter.de/96100/borealis-produziert-zertifiziertes-erneuerbares-polypropylen-in-belgien/, Internetzugriff März 2020
[103] Ravenstijn, J.: Persönliche Information August 2019

[104] N. N.: Polypropylene Market To Reach USD 155.57 Billion By 2026; https://www.globenewswire.com/news-release/2019/08/01/1895698/0/en/Polypropylene-Market-To-Reach-USD-155-57-Billion-By-2026-Reports-And-Data.html, Internetzugriff Februar 2020
[105] Yanbo, L.: Lightweighting PBAT based materials, bioplastics MAGAZINE, Vol 14, No. 5, 2019
[106] N. N.: Cellulose based fibers fully biodegradable in water, soil and compost, bioplastics MAGAZINE, Vol. 14, No. 5, 2019
[107] N. N.: Pebax® Rnew selected for the first time in soccer ball!, https://www.arkema.com/export/shared/.content/media/downloads/news-attachments/global/en/press-release/2010/pr-sony-pebax-rnew-soccer-ball-va.pdf, Internetzugriff Oktober 2019
[108] Hiebel, M. et al.: PLA im Abfallstrom, http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4872829.pdf, Internetzugriff Oktober 2019
[109] N. N.: www.tecnaro.de, Internetzugriff Januar 2020
[110] N. N.: Bio-attributed PVC, https://www.vynova-group.com/bio-attributed-pvc, Internetzugriff März 2020

8.3 Abkürzungsverzeichnis

ASTM	American Society for Testing and Materials
BMC	Bulk-Moulding-Compound
BDO	Butandiol
EN	Europäische Norm
PA	Polyamid
PBAT	Polybutylenadipatterephthalat
PBS	Polybutylensuccinat
PBSA	Polybutylensuccinatadipat
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PDO	Propandiol
PE	Polyethylen
PEF	Polyethylenfuranoat
PET	Polyethylenterephthalat
PHA	Polyhydroxyalkanoat
PHB	Polyhydroxybutyrat
PHBV	Poly-3-hydroxybutyrat-co-valerat
PLA	Polylactid (polylactid acid/ Polymilchsäure)
PP	Polypropylen
PTT	Polytrimethylenterephthalat
PVC	Polyvinylchlorid
RTM	Resin Transfer Moulding
SMC	Sheet-Moulding-Compound
TPE	Thermoplastische Elastomere
TPS	Thermoplastische Stärke
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
USDA	United States Departm. of Agriculture
WPC	Wood Plastic Composites

8.4 Stichwortverzeichnis

A
Additiv 4, 19, 31, 63
ASTM D6400 53, 54, 62
ASTM D6866 6, 7, 62

B
BDO 10, 23, 24, 28, 59, 65
Bernsteinsäure 10, 23, 28
Blend 14, 16, 19, 20, 21, 37, 37, 38, 47, 48, 52
BMC 24, 38, 65

C
Celluloseacetat 16, 38
Cellulosederivat 14, 16, 56
Celluloseester 16
Celluloseregenerat 14, 15

D
Dicarbonsäure 14, 22, 24, 25
Diisocyanat 25, 26, 63
Dimethylterephthalat 21, 23
Drop-In-Biokunststoff 51, 56
Duromere 4, 16, 17, 24, 26, 28, 38

E
Elastomer 4, 17, 18, 26, 43, 47, 63, 65
EN 13432 53, 54, 55, 62
EN 14855 53
EN 14995 54, 62
Epoxidharz 12, 28
Ethylenglykol 21

G
Gummi 9, 17

I
Itaconsäure 28

L
Lyocell 15

M
Monoethylenglykol 21, 22, 28

N
Naturkautschuk 9, 17

P
PA 16, 25, 43, 52
PBAT 14, 24, 37, 38, 65
PBS 23, 65
PBSA 23, 65
PBT 18, 24, 65
PC 23, 65
PDO 10, 23, 28, 65
PE 10, 12, 14, 16, 26, 27, 34, 38, 40, 46, 47, 48, 51, 56, 65
PEF 14, 22, 35, 63, 65
PET 14, 21, 22, 23, 24, 35, 43, 45, 51, 52, 56, 60, 63, 65
PHA 9, 11, 14, 18, 19, 28, 34, 37, 46, 47, 48, 51, 60, 63, 65
PHB 18, 65
PHBV 18, 63, 65
PLA 10, 14, 19, 20, 21, 32, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 51, 52, 61, 63, 64, 65
Polyamid 12, 14, 18, 25, 28, 43, 47, 56, 60, 65
Polyester 9, 14, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 28, 43, 44, 62, 63

Polyol 25, 26, 37, 43
Polyolefinen 12, 14, 26, 27
Polysuccinat 23
PP 12, 14, 26, 27, 35, 45, 51, 61, 65
Propandiol 10, 18, 23, 65
Protein 8, 13, 16
PTT 23, 44, 45, 65
PVC 16, 28, 52, 63, 65

R
RTM 38, 65

S
Sebacinsäure 14, 25, 28
SMC 24, 38, 65
Sorbitol 14, 23, 63

T
Terephthalsäure 21, 22, 23, 24, 28
TPE 17, 18, 63, 65
TPS 14, 42, 56, 65
TPU 17, 26, 18, 65

V
Viskose 15, 45

W
Weichmacher 14, 28, 31, 63
WPC 45, 46, 65

Z
Zellglas 15

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)
OT Gülzow, Hofplatz 1
18276 Gülzow-Prüzen
Tel.: 03843/6930-0
Fax: 03843/6930-102
info@fnr.de
www.fnr.de

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier
mit Farben auf Pflanzenölbasis

Bestell-Nr. 224
mediathek.fnr.de
FNR 2020

FNR
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.