

BIOKUNSTSTOFFE



PFLANZEN
ROHSTOFFE
PRODUKTE

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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, Novamont GmbH, Patrick Bogner, Dr. Michael Thielen

Sofern nicht am Bild vermerkt: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)

Gestaltung/Realisierung

www.tangram.de, Rostock

Druck

www.druckerei-weidner.de, Rostock

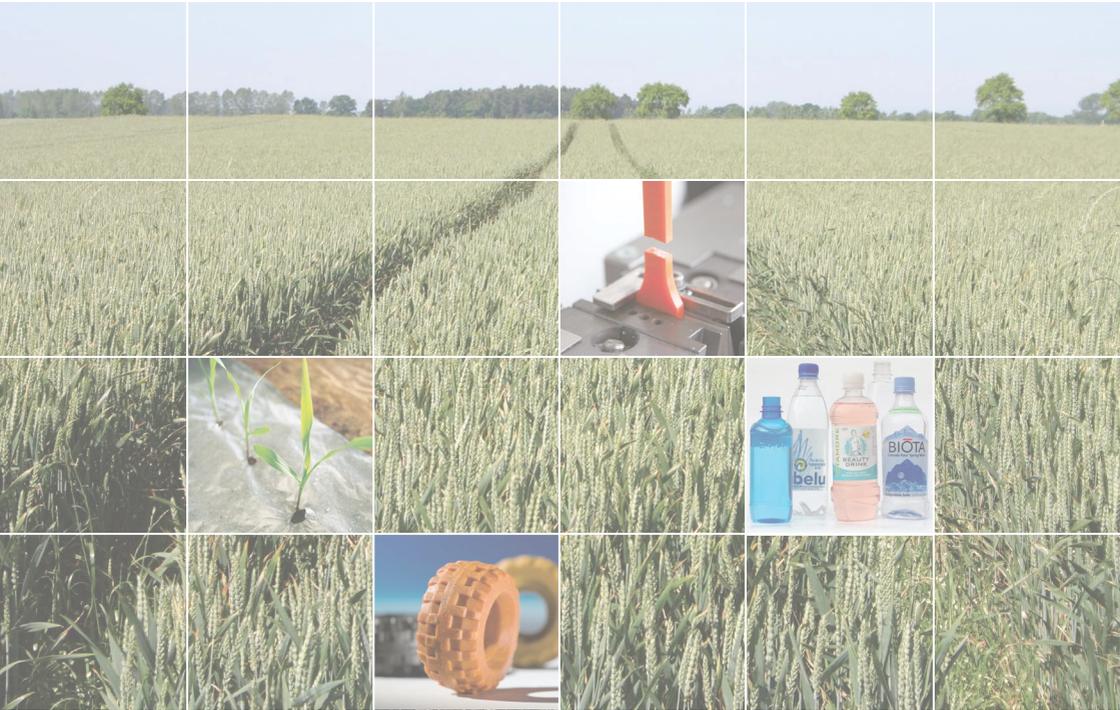
Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier mit Farben auf Pflanzenölbasis

Bestell-Nr. 224

3., unveränderte Auflage

FNR 2016

BIOKUNSTSTOFFE





INHALT

1	Biokunststoffe, was ist das eigentlich?	4
1.1	Grundlegendes	4
1.2	Biokunststoffe = biobasierte Kunststoffe	5
2	Gesetzliche Rahmenbedingungen	6
2.1	Normen und Zertifizierung: „biobasiert“	6
2.2	Normen und Zertifizierung: „kompostierbar“	7
2.3	Relevante deutsche Gesetze und Verordnungen	9
3	Nachwachsende Rohstoffe	10
3.1	Einführung	10
3.2	Natürliche Polymere	10
3.3	Weitere biogene Rohstoffe	11
4	Biokunststoffe	13
4.1	Einführung	13
4.2	Modifizierte natürliche Polymere	14
4.3	Aus biobasierten Monomeren synthetisierte biobasierte Polymere	19
4.4	Biokunststoffe aus Reststoffen	27
5	Kunststoff-Verarbeitungsverfahren	29
5.1	Einführung	29
5.2	Compoundieren	30
5.3	Weiterverarbeitung	30



© Novamont GmbH



© 3 x FNR / Michael Hauri

6	Anwendungen	38
6.1	Verpackungen	38
6.2	Gartenbau und Landwirtschaft	40
6.3	Medizin und Körperpflege	41
6.4	Unterhaltungselektronik	41
6.5	Automobilbau	42
6.6	Textil	43
6.7	Bauen und Wohnen	44
6.8	Sonstiges	45
7	Verwertung – Entsorgung – Kreisläufe	46
7.1	Recycling	47
7.2	Energetische Verwertung	48
7.3	Biologische Behandlung	48
8	Markt	50
8.1	Einleitung	50
8.2	Marktübersicht	50
8.3	Haben wir überhaupt genug Agrarflächen?	53
9	Anhang	54
9.1	Internet-Informationsquellen	54
9.2	Quellenangaben	54
9.3	Abkürzungsverzeichnis	59
9.4	Stichwortverzeichnis	59

1 BOKUNSTSTOFFE, WAS IST DAS EIGENTLICH?

1.1 Grundlegendes

Kunststoffe sind organische Polymere¹, 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.

Im Grunde muss man Kunststoff- bzw. Polymerprodukte unterscheiden in Strukturpolymere und Funktionspolymere.

Strukturpolymere sind solche, die in werkstofflichen Anwendungen zum Einsatz kommen, also das, was wir gemeinhin als Kunststoff, Plastik oder auch Plaste bezeichnen.

Funktionspolymere hingegen werden für nicht-werkstoffliche Anwendungen eingesetzt. Dies ist beispielsweise der Einsatz

als Papieradditiv, Klebstoff, Lackharz, Verdickungsmittel, Flockungsmittel, Betonadditive 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 Kunststoffwerkstoffen, die im Weiteren gemeint sind, wenn von Kunststoffen geschrieben wird.

Die Statistik ist beeindruckend: Die Kunststoffindustrie beschäftigt mehr als 1,45 Mio. Menschen in der Europäischen Union und setzt jährlich rund 320 Milliarden Euro um. Von den weltweit erzeugten 299 Mio. Tonnen Kunststoffen stammt etwa ein Fünftel aus Europa und davon wiederum ein Viertel aus Deutschland. Nicht nur für Verpackungen (40%) und Baumaterialien (20%), sondern auch zur Automobil- (8%) und Möbelerstellung sowie von der Elektroindustrie und der Haushaltswarenherstellung werden sie benötigt (Statistik Stand 2013) [3].

Und der Verbrauch steigt kontinuierlich an; weltweit von 50 Mio. Tonnen im Jahr 1976 auf voraussichtlich 330 Mio. Tonnen im Jahr 2015 [3].

Kunststoff ist allerdings nicht gleich Kunststoff: während duroplastische (oder bes-

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.

ser 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].

1.2 Biokunststoffe = biobasierte Kunststoffe

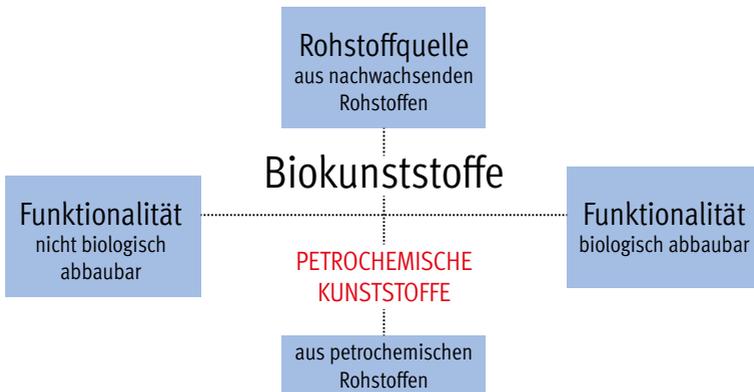
Biokunststoffe bestehen zu einem wesentlichen Anteil oder ausschließlich aus nachwachsenden Rohstoffen.

Biokunststoffe sind also biobasierte Kunststoffe. Nicht zu den Biokunststoffen zählen

demnach biologisch abbaubare, petrochemische Kunststoffe (Abb. 1.1).

Die ersten modernen Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, die Ende der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts auf den Markt kamen, waren in der Regel biologisch abbaubar und mit dieser Eigenschaft wurden die neuen Produkte auch beworben. Daraus ergab sich, dass der Begriff „Biokunststoff“ oft weniger mit der nachwachsenden Rohstoffbasis, sondern mehr mit der Eigenschaft „biologischer Abbau“ 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 FNR

© FNR 2013

Abb. 1.1: Biobasierte und bioabbaubare Kunststoffe

2 GESETZLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Die meisten Aussagen und Angaben in diesem Kapitel beziehen sich auf Deutschland. Sie werden ergänzt durch solche, die für die Europäische Union sowie die USA gelten.

Das deutsche Kreislaufwirtschaftsgesetz verlangt von den Herstellern von Produkten, dass diese ihre Erzeugnisse so gestalten, dass bei ihrer Herstellung und Verwendung Abfall vermindert und die umweltverträgliche Verwertung und Beseitigung nach Gebrauch sichergestellt ist (gemäß § 25 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes). Gewisse Rahmenbedingungen sind dabei Grundvoraussetzung: es dürfen bei der Entsorgung keine störenden Begleitstoffe in den Naturkreislauf gelangen. Nationale und internationale Normen zur Abbaubarkeit von polymeren Werkstoffen und Produkten beugen diesem Problem inzwischen vor.

2.1 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 [90].

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 $^{14}\text{CO}_2$ oxidiert und gelangt über die Photosynthese 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.

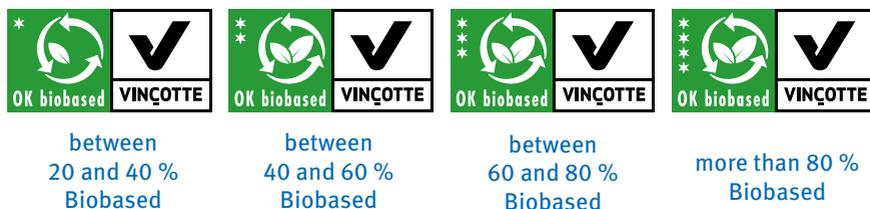


Bild 2.1: OK-biobased Logo mit Angabe des biobasierten Kohlenstoff-Anteils

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 [19] — je nach Blickwinkel des Betrachters. Deshalb gelten beide als wichtig und notwendig.

Die hier angeführten Zertifizierungsprogramme beziehen sich auf den Kohlenstoffanteil. Vinçotte in Belgien hat mit dem OK-biobased Logo als erster begonnen, eine Zertifizierung anzubieten. Hier werden je nach „biobasiertem“ Kohlenstoffanteil ein bis vier Sterne vergeben (Bild 2.1).

Auch der deutsche Zertifizierer DIN CERTCO vergibt ein Zertifikat, bei dem der Kohlenstoffanteil in Prozentwert-Gruppen angegeben wird (Bild 2.2).

In den USA gibt es seit einigen Jahren ein Programm, das unter der Bezeichnung „Bio-



Bild 2.2: DIN-Geprüft Biobasiert (DIN CERTCO)

Preferred®“ 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.



Bild 2.3: USDA certified biobased product

2.2 Normen und Zertifizierung: „kompostierbar“

Ein Stoff, ein Material oder eine Substanz ist biologisch abbaubar oder bioabbaubar, wenn sie durch Mikroorganismen wie Bakterien, Protozoen² oder Pilze bzw. Enzyme abgebaut wird. Die Mikroorganismen nutzen

² Protozoen sind Einzeller mit Zellkern, wie Pantoffeltierchen, Amöben etc.

die Substanz als Nahrung bzw. als Energiequelle. Dabei bleiben als Abbauprodukte Kohlendioxid (CO₂), Wasser und mineralische Salze sonstiger vorliegender Elemente (Mineralisierung) zurück [6].

Es wird zwischen aerobem Abbau unter Anwesenheit von Sauerstoff, wie dies bei der Kompostierung der Fall ist, und anaerobem Abbau, wie z.B. in einer Biogasanlage, unterschieden.

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 oder bei der natürlichen Abbaubarkeit in der Umwelt. Neben rechtlichen Gegebenheiten müssen bei der industriellen Kompostierung auch technische Anforderungen berücksichtigt werden.

Kunststoffprodukte, die einer industriellen Kompostierung zugeführt werden sollen, müssen zunächst entsprechend der Normen, wie z.B. EN 13432 zur Kompostierbarkeit von Verpackungen [83] oder etwas allgemeiner von Kunststoffen (EN 14995 [84] und ASTM D6400 [85]), zertifiziert werden. Auf europäischer Ebene gehören DIN CERTCO (Deutschland) und Vinçotte (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 CO₂, zum Verlust physikalischer Eigenschaften wie Gewicht und Größe sowie zu den toxikologischen



Bild 2.4: Logos für industrielle Kompostierung (DIN CERTCO)

Eigenschaften hergestellter Komposte darf ein entsprechendes, registriertes Logo vergeben werden. So muss sich ein Werkstoff, der ein Kompostierbarlogo trägt, innerhalb von sechs bis zwölf Wochen in der industriellen Kompostieranlage vollständig abbauen. Bild 2.4 bis Bild 2.6 zeigen die bekanntesten Logos [87, 88, 89].



Bild 2.5: Das OK-Compost-Logo (Vinçotte)



Bild 2.6: Das Compostable-Logo aus den USA (BPI, US Composting Council)

Eine Kompostierbarkeit in einer industriellen Anlage bedeutet nicht automatisch, dass sich das Produkt auch im Gartenkompost 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 Vinçotte eine Zertifizierung (nach australischem Standard AS 5810) und ein entsprechendes Logo an.



Bild 2.7: Logo für die Gartenkompostierbarkeit (DIN CERTCO)

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.

2.3 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 – Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen) und dem Elektro- und Elektronikgeräte-Gesetz (ElektroG – Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten) ist dies zurzeit vor allem die Verpackungsverordnung (VerpackV – Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen). Die im Juli 2014 zuletzt geänderte VerpackV regelt, wie mit gebrauchten Verpackungen umzugehen ist. Für zertifizierte kompostierbare Kunststoffverpackungen wurde eine zeitlich befristete Sonderregelung eingeführt: Diese Verpackungen

waren von den Pflichten laut § 6 der Verordnung und den DSD (Duales System Deutschland)-Gebühren freigestellt. Die Hersteller und Vertrieber mussten aber sicherstellen, dass ein möglichst hoher Anteil der Verpackungen einer Verwertung zugeführt wird [1]. Seit 01.01.2013 gilt diese Sonderregelung nicht mehr, d.h. auch für kompostierbare Verpackungen, wenn sie über das DSD entsorgt werden sollen, müssen entsprechende Gebühren entrichtet werden.

Mit der Novellierung der Bioabfallverordnung (BioAbfV – Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden) Mitte 2012 wurde allerdings die Kompostierung als Entsorgungsoption für biobasierte Produkte, die biologisch abbaubar sind, stark eingegrenzt.

Zur Zeit sind eine Reihe weiterer bzw. ergänzender Regelungen in der Vorbereitung. Im Rahmen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist davon auszugehen, dass die stoffliche Verwertung von Abfällen oder Reststoffen wesentlich an Bedeutung gewinnen wird. In diesem Zusammenhang ist damit zu rechnen, dass die Verpackungsverordnung von einem komplexeren Wertstoffgesetz abgelöst wird. Dies wird zur Folge haben, dass nicht nur Verpackungen, sondern auch andere Kunststoffprodukte wie Haushaltswaren, Schreibwaren, CDs etc. als Wertstoffe gesammelt werden. Das wird das Volumen dieses „Wertstoffstroms“ deutlich vergrößern, möglicherweise sogar verdoppeln.

3 NACHWACHSENDE ROHSTOFFE

3.1 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.

3.2 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 für die Herstellung von biobasierten Kunststoffen verwendet werden.

3.2.1 Polysaccharide

Zu den wichtigsten Biopolymeren gehören die Polysaccharide (Mehrfachzucker oder Vielfachzucker). α -Polysaccharide kommen

z.B. als Energiespeicher in Stärke vor. β -Polysaccharide dienen als Gerüstsubstanz, beispielsweise in der Cellulose, dem Hauptbestandteil der Zellwände von Pflanzen.

3.2.2 Proteine

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

3.2.3 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 [13]. Der Großteil davon wird heute zur Energieerzeugung verbrannt.

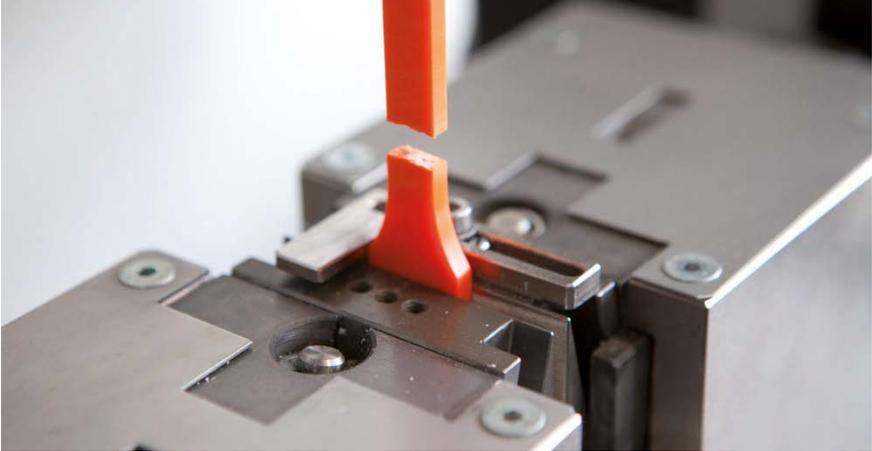


Bild 3.1: Biokunststoff-Prüfstab im Materialtest

3.2.4 Naturkautschuk

Ein elastisches Biopolymer ist Naturkautschuk aus Pflanzenprodukten, in erster Linie Milchsafte (Latex) bestimmter Bäume. Neben dem Kautschukbaum wird solches Latex auch von anderen Bäumen wie Balata oder Guttapercha gewonnen. Naturkautschuk ist der wichtigste Rohstoff zur Herstellung von Gummi durch Vulkanisierung.

3.2.5 Sonstige

Eine interessante Gruppe von Biopolymeren sind die Polyhydroxyalkanoate (PHA), Polyester, die in bestimmten Mikroorganismen als Energiespeicher gebildet werden (siehe Kap. 4.2.5).

3.3 Weitere biogene Rohstoffe

3.3.1 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.

Welche Pflanzenöle zur Herstellung welcher Biokunststoffe verwendet werden, wird in Kapitel 4 beschrieben.

3.3.2 Kohlenhydrate

Über die oben genannten Substanzen hinaus können noch eine Reihe weiterer Kohlenhydrate als Ausgangsstoffe für Monomere und Dimere für die Produktion von biobasierten Kunststoffen dienen.

Dies sind Monosaccharide (Zucker), wie Glukose und Fruktose (beide $C_6H_{12}O_6$) oder Disaccharide, wie Saccharose ($C_{12}H_{22}O_{11}$).

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 [14, 15].

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 (siehe Kap. 4.3.1).

Das derzeit wirtschaftlich wichtigste Monomer ist Milchsäure, aus der Polylactic (PLA), sprich Polymilchsäure, hergestellt wird (siehe Kap. 4.3.1).

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. 4.3.5).

3.3.3 Sonstige

Ein aktueller 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. vorheriger Absatz sowie Kap 4.3.5). Derzeit wird jedoch eher der biotechnologische Weg intensiv verfolgt, der Synthesegas als Kohlenstoffquelle für Mikroorganismen nutzt, wobei durch Fermentation Polymermonomere gebildet werden können [2, 16, 17].

4 BIOKUNSTSTOFFE

4.1 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 [18]. Ein Preisauschreiben 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, Käämme, Tischtennisbälle und andere Produkte verwendet [1].

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

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 Polyesterstoffen.

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



Bild 4.1: Haarnadel 1920/1950 aus Celluloid



Bild 4.2: Knöpfe 1920/1940 aus Casein

Jahrtausendwende 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 (Glucose, früher auch Dextrose), auch als Rohstoff für Fermentationsprozesse eingesetzt. Auf diese Weise werden neuere Biokunststoffe wie Polylactid (PLA) oder Polyhydroxyalkanoat (PHA) erzeugt (siehe Kap. 4.3.1 und 4.2.5). Zucker ist auch der Rohstoff für die aktuell letzte Generation von Biokunststoffen, den biobasierten Polyolefinen Polyethylen (PE), bald auch Polypropylen (PP und Polyvinylchlorid (PVC)) sowie dem teilweise biobasierten Polyester Polyethylenterephthalat (PET) (siehe Kap. 4.3.5 und 4.3.1), die alle nicht biologisch abbaubar sind.

Weitere Beispiele für teil-biobasierte Kunststoffe sind einige Biopolyamide (siehe Kap. 4.3.2). So wird von einer ganzen Reihe von Herstellern Polyamid 6.10 angeboten, wobei die zur Herstellung benötigte Dicarbonsäure (über Sebacinsäure) aus Rizinus- oder Sojaöl hergestellt wird, das Diamin jedoch petrochemisch.

Blends aus biobasierten und petrochemischen Kunststoffen sind beispielsweise Mischungen aus PLA (100 % biobasiert) und PBAT (Polybutylen-Adipat-Terephthalat, ein erdölbasierter, aber kompostierbarer Copolyester).

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 (siehe Kap. 4.3).

4.2 Modifizierte natürliche Polymere

4.2.1 Polysaccharid-basierte Kunststoffe

4.2.1.1 Thermoplastische Stärke

Zur Herstellung von Thermoplastischer Stärke (TPS) werden Stärkekörner durch Extrusionsprozesse destrukturiert [2, 4]. Stärke besteht aus zwei Komponenten, dem verzweigt polymerisierten Amylopektin, dem Hauptbestandteil der Stärke, der die unverzweigte Amylose umhüllt [1]. Um die Stärke zu destrukturieren, d. h. ihre granuläre Struktur und ihre Kristallinität zu zerstören, werden sogenannte Weichmacher sowie mechanische Energie und Wärme eingesetzt [20]. Geeignete Weichmacher sind z. B. Wasser (in Anteilen unter 45 %), Glycerin und Sorbitol.

4.2.1.2 Cellulose-basierte Kunststoffe

Cellulose ist der Hauptbestandteil der Zellwände aller höheren Pflanzen in unterschiedlichen Massenanteilen. Cellulose ist

unverzweigt und besteht aus mehreren hundert bis zehntausend Glucose-Molekülen (in glykosidischer Bindung) bzw. Cellobiose-Einheiten. Die Cellulosemoleküle lagern sich zu höheren Strukturen zusammen, die als reißfeste Fasern in Pflanzen häufig statische Funktionen haben [2, 5, 21].

Bei Baumwollfasern beträgt der Celluloseanteil ca. 95 %, bei Hartholz 40–75 % und bei Weichholz 30–50 %. Cellulose ist der mengenmäßig bedeutendste nachwachsende Rohstoff – weltweit werden jährlich etwa 1,3 Mrd. Tonnen für technische Anwendungen gewonnen. Cellulose kann beispielsweise in Form von Celluloseregeneraten und Cellulosederivaten industriell genutzt werden (Abb. 4.1).



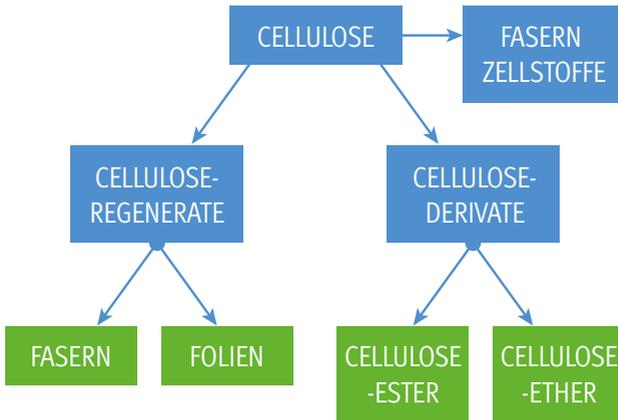
© natura Verpackungs GmbH

Bild 4.3: 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,

BIOBASIERTE UND BIOABBAUBARE KUNSTSTOFFE



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

© FNR 2013

Abb 4.1: Cellulose-basierte Polymerwerkstoffe (Abb. nach [5])

Zellwolle, Rayon, Lyocell oder Kunstseide und einige mehr auf dem Gebiet der Fasern und Textilien. Cellulosische Chemiefasern (hauptsächlich Rayon und Lyocell) machen mit 31 % (Deutschland, 2013) bzw. 10 % (Welt, 2013) einen bedeutenden Anteil aller Chemiefasern aus [22].

Im Bereich der Folien sind dies Cellulosehydrat oder auch Zellglas (siehe Bild 4.3), bekannt unter dem früheren Markennamen Cellophan [5].

Cellulosederivate

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

Celluloseester haben hierbei die größere Bedeutung für die Kunststoffindustrie. So war der erste thermoplastische Kunststoff das 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).

4.2.2 Protein-basierte Kunststoffe

Eine weitere Gruppe von Biokunststoffen kann aus tierischen oder pflanzlichen Proteinen (siehe Kap. 3.2.2) hergestellt werden. Zu den Biokunststoffen aus tierischen Proteinen gehört das Casein, das schon zu Beginn des Kunststoffzeitalters eine gewisse Bedeutung hatte (siehe Kap. 4.1). 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.



Bild 4.4: Schweizer Offiziersmesser, Griffschale aus Celluloseacetobutyrat



Bild 4.5: Transparente Würfel aus Celluloseacetat

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

Ein protein-basierter Biokunststoff im weiteren Sinn ist die Gelatine. Sie wird neben den bekannten Anwendungszwecken als Nahrungsmittelzusatz unter anderem auch als Bindemittel oder Kapsel für Tabletten verwendet [5]. Gelatine wird im Wesentlichen aus Collagen hergestellt (siehe Kap. 3.2.2).

4.2.3 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.

Der bekannteste Biokunststoff auf der Basis von Lignin (siehe Kap. 3.2.3) wird unter der Bezeichnung „flüssiges Holz“ vermarktet [13, 25] und ist sehr gut im Spritzgießprozess (siehe Kap. 5.3.3) verarbeitbar. Er wird unter anderem mit Naturfasern verstärkt (Flachs, Hanf etc.) angeboten [92]. Im Bereich der Duromere werden Rezepturen mit Lignin für Phenol-, Epoxy- und Polyurethan-Harze entwickelt [2, 26, 27].

4.2.4 Naturkautschuk und thermoplastische Elastomere

Ein sehr populärer „Verwandter“ der Kunststoffe ist Gummi. Andere Begriffe in diesem Zusammenhang sind Naturkautschuk, Kautschuk und Elastomere. Auch wenn ein Großteil 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 Gummi-bedarfs aus Naturkautschuk gedeckt [28].

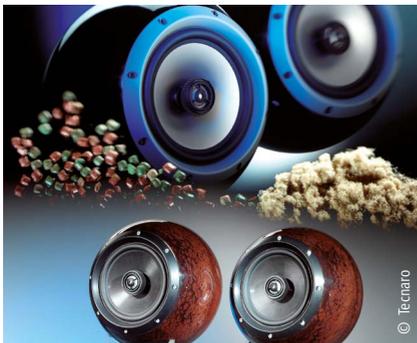


Bild 4.6: Lautsprechergehäuse aus einem Lignin-basierten Biokunststoff

Unter Naturkautschuk³ versteht man Polymere, die auf Pflanzenprodukten wie vor allem Milchsäure (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].

³ indianisch „Baum der weint“, aus *cao* = Baum und *ochu* = Träne

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.

Eine wichtige Gruppe sind die thermoplastischen Polyurethane (TPU). Anwendungsgebiete gehen von Schuhsohlen und anderen Schuhkomponenten über Folien bis hin zu Weichkomponenten in Hart-Weichverbunden wie bei Zahnbürstengriffen (siehe Kap. 4.3.3).



Bild 4.7: Wanderschuhe mit teil-biobasiertem Polyurethan (TPU)

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. 3.3.2) hergestellt wird, eignet sich für technische Anwendungen wie z.B. Airbagabdeckungen in PKW. Eine 2010 vorgestellte Type besteht zu 35 Gew.-% aus nachwachsenden Rohstoffen [23].

Zu 100 % biobasiert ist ein Block-Copolymer (Polyether-Block-Amid), das 2010 unter anderem für Ski-Schuhe vorgestellt wurde. Das TPE-Material besteht aus 100 % biobasiertem Polyamid 11 (siehe Kap. 4.3.2) und biobasiertem Polyether [24].

4.2.5 Polyhydroxyalkanoate

Stärke und andere Kohlenstofflieferanten können auch fermentativ unter Mitwirkung von Mikroorganismen in Biokunststoffe umgewandelt werden. Ein Beispiel sind die Polyhydroxyalkanoate (PHA) oder Polyhydroxyfettsäuren, eine Familie von Polyestern. Diese werden von Bakterien intrazellulär als Speicher- oder Reservestoff eingelagert [5]. Dabei lagern die Mikroorganismen besonders viele Energiereserven (bis zu 80 % ihres eigenen Körpergewichtes) ein, wenn das Nahrungsangebot verknappt wird. Durch die gezielte Anzucht derartiger Bakterien können PHA industriell gewonnen werden. Zur Familie der Polyhydroxyalkanoate gehören Polyhydroxybuttersäure (PHB) oder Polyhydroxybutyrat, Polyhydroxyvalerat (PHV), Poly-3-hydroxybutyrat-co-valerat (PHBV) und einige mehr [5].

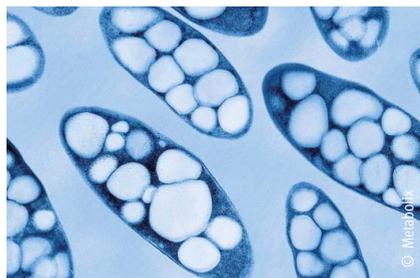


Bild 4.8: Elektronenmikroskop-Aufnahme von Bakterien mit eingelagerten PHA-Partikeln

PHA sind als Folien- und Spritzgießtypen und zunehmend auch als Extrusions- und Blasformtypen verfügbar. Ein japanischer Anbieter stellte 2010 einen Partikelschaum (ähnlich Styropor®) aus PHA vor [30].

4.3 Aus biobasierten Monomeren synthetisierte biobasierte Polymere

4.3.1 Biobasierte Polyester

Polylactid (PLA)

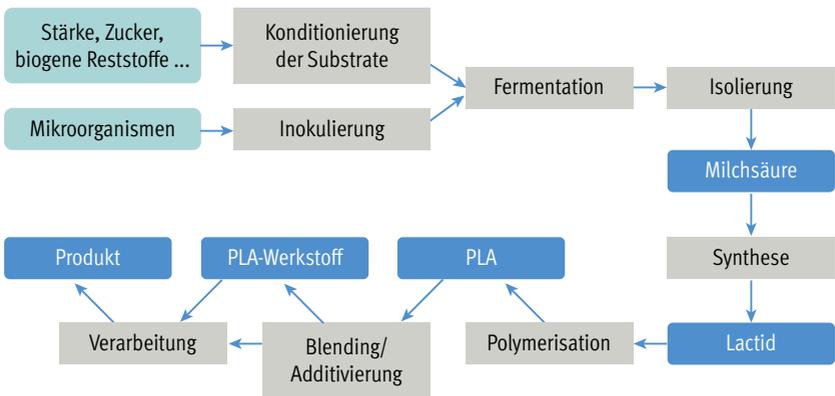
Unter den biobasierten Polyestern ist heute Polylactid (PLA) bzw. Polylacticacid oder Polymilchsäure der am Markt bedeutendste Biokunststoff [5]. PLA basiert auf Milchsäure, einer natürlichen Säure, die größtenteils

fermentativ aus Zucker oder Stärke mithilfe von Mikroorganismen hergestellt wird.

Die weltweit erste größere PLA-Produktionsanlage mit 140.000 Tonnen Jahreskapazität wurde 2002 in den USA in Betrieb genommen. Industrielle PLA-Produktionsanlagen existieren inzwischen auch in den Niederlanden, Japan und China. Anlagen in Südostasien sind in Planung. In Guben, an der deutsch-polnischen Grenze, entstand 2011 eine Pilotanlage mit 500 Tonnen Jahreskapazität.

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

PROZESSCHRITTE ZUR ERZEUGUNG V. POLYLACTIDWERKSTOFFEN U. -BAUTEILEN



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

© FNR 2013

Abb. 4.2: Erzeugung von PLA-Produkten

Compoundieren mit entsprechenden Additiven, durch Copolymerisieren oder Blenden mit anderen Kunststoffen (Biokunststoffen oder traditionellen Kunststoffen) für die jeweilige Anwendung maßgeschneidert.

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 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 [34]. 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.

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]. Neben der Möglichkeit des Einsatzes für kurzlebige Verpackungsfolien oder Tiefziehprodukte (z. B. Getränke- oder Joghurtbecher, Obst-, Gemüse- und Fleischschalen) birgt der Rohstoff ein großes Potenzial auch für dauerhafte, langlebige Produkte.

Beispiele dafür sind Handyschalen z. T. mit Naturfaserverstärkung, 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 [35], Einstiegsleisten etc. gefertigt werden.



Bild 4.9: Transparente PLA-Folie zur Verpackung von Gemüse



Bild 4.10: 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 4.11: Baby-Schuhe aus einem PLA/PET Mischgewebe und Sohlen aus einem weichen PLA-Compound [36]

Polyethylenterephthalat (PET)

PET gehört seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu den Massenkunststoffen. Ein regelrechter Boom begann 1975 durch den umfassenden Einsatz als „gutgriffige“ 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 [37]. Dabei wird das Monoethylenglykol

(etwa 30 Gewichts-%) aus Zuckerrohr-Melasse hergestellt. Die Terephthalsäure wird in diesem Fall noch petrochemisch produziert. Im gleichen Zeitraum kündigte ein japanischer Automobilkonzern an, teil-bio-basiertes PET zu produzieren [38].



Bild 4.12: Teil-biobasiertes 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 wirtschaftlich biobasiert herzustellen [39].

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 Ethylenglykol zu PEF polymerisiert. In den Niederlanden wurde eine Technologie entwickelt, um FDCA aus Biomasse herzustellen [94].

Polytrimethylterephthalat (PTT)

Das ebenfalls teil-biobasierte Polytrimethylterephthalat (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. 3.3.2).

PTT wurde zunächst hauptsächlich in Form von gesponnenen Fasern und Textilien auf den Markt gebracht. Da die Fasern besonders weich und dabei extrem belastbar sind, werden sie einerseits zu Teppichen für den Wohnbereich verarbeitet und andererseits in der Automobilindustrie eingesetzt.

PTT ist aber auch für Spritzgussanwendungen geeignet und am ehesten mit Polybutylterephthalat (PBT) vergleichbar. Mit hoher Oberflächenqualität, geringen Schrumpf-

und Verzugswerten ist das Material unter anderem ideal für elektrische und elektronische Anwendungen wie Stecker und Gehäuse oder auch für Luftauslasskanäle in der Instrumententafel von Autos [41, 42].

Biobasierte Alkydharze

Vorwiegend als Funktionspolymere im Bereich der Lacke, aber auch als Spachtelmassen oder Füllstoff kommen Alkydharze zum Einsatz. Das sind Polyester, die durch Polykondensation mehrwertiger Alkohole (z. B. Glycerin oder Glycol) mit Dicarbonsäuren (z. B. Phthalsäure, Adipinsäure, Bernsteinsäure, Maleinsäure oder deren Anhydride) hergestellt werden [2]. Da es sowohl unter den mehrwertigen Alkoholen als auch den Dicarbonsäuren solche gibt, die aus nachwachsenden Rohstoffen gebildet werden können, sind biobasierte oder teil-biobasierte Alkydharze möglich und zum Teil bereits am Markt verfügbar.

Alkydharze werden hauptsächlich als Lackrohstoffe, die mit anderen Anstrichstoffen gut verträglich sind, verwendet.

Ebenfalls als Bindemittel und Lackrohstoffe kommen sogenannte geblasene Pflanzenöle (meist Leinöl oder Rapsöl) in der Farbenindustrie zum Einsatz. Durch Einblasen heißer Luft bilden diese Pflanzenöle Peroxidverbindungen, die dann mit den Fettsäuren zu Polymeren weiterreagieren.

Werden Pflanzenöle (auch hier wieder vorwiegend Leinöl) mit Vernetzungsadditiven (Sikkativen) versehen, können Firnisse (farblose Schutzanstriche aus schnell trockenden

Ölen) erzeugt werden, die als Anstrichstoffe und Bindemittel für Druckfarben dienen.

Weiterhin werden durch Dimerisierung von pflanzenölbasierten Fettsäuren Dimerfettsäuren hergestellt, die dann mit Polyolen zu Alkydharzen umgesetzt als Bindemittel in Farben und Lacken verwendet werden.

Biobasierte Polysuccinate

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. 3.3.2), hergestellt wird.



Bild 4.13: 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.

Sonstige biobasierte Polyester

Weitere (ganz oder teilweise) biobasierte Polyester sind Polybutylenterephthalat (PBT)

aus Terephthalsäure oder Terephthalsäuremethyl-ester 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 [9].

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 Duomere (vernetzte, nicht wieder aufschmelzbare Kunststoffe) kennt man



Bild 4.14: Rennboot aus teil-biobasiertem UP-Harz

beispielsweise als glasfaserverstärkter Verbundwerkstoffe aus dem Boots- oder Fahrzeugbau (SMC, BMC) oder der Reparatur von Karosserieschäden am Auto.

Polyesterharze sind Kondensationsprodukte aus zwei- oder mehrwertigen Alkoholen (z. B. Glykolen oder Glyzerin) und Dicarbonsäuren [2], die wie oben dargestellt (siehe Kap. 3.3.2 und 4.3) aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden können. So sind heute bereits eine Reihe von teil-biobasierten, ungesättigten Polyesterharzen auf dem Markt [55, 56].

4.3.2 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



Bild 4.15: Dübel aus teil-biobasiertem PA 6.10

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.

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 4.16: Kraftstoff-Nippel aus 100% biobasiertem PA 11

Das ebenfalls komplett biobasierte PA 11 ist bereits seit über 60 Jahren auf dem Markt und wird aus Rizinusöl hergestellt. PA 11 eignet sich aufgrund seiner besonderen Resistenz unter anderem für die Herstellung von Biokraftstoff-führenden Leitungen und Bauteilen.

Über die hier genannten hinaus gibt es noch eine Reihe weiterer biobasierter Polyamide [47].

4.3.3 Biobasierte Polyurethane

Polyurethane entstehen durch eine Reaktion von Polyolen und Diisocyanaten und können hart und spröde oder elastisch, geschäumt oder kompakt sein. Sie können in thermoplastischer oder duromerer Form vorliegen.



© Ford Motor Company

Bild 4.17: Autositz aus 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 Rizinus bereits OH-Gruppen enthält, 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. 4.2.4 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 Soja hergestellt wird.

4.3.4 Biobasierte Polyacrylate

Zu den Acryl-Kunststoffen gehört beispielsweise auch das als Plexiglas® oder Acrylglas bekannte PMMA (Polymethylmethacrylat). Wissenschaftler an der Universität Duisburg-Essen haben ein Enzym gefunden, das es erlaubt, aus natürlichen Rohstoffen wie Zucker, Alkohol oder Fettsäure mithilfe eines biotechnischen Verfahrens zu einer Vorstufe für Methylmethacrylat bzw. MMA zu kommen, welches als Monomer für die Herstellung von PMMA dient [49].

Des Weiteren gibt es Bestrebungen, die bio-basiert herstellbare Plattformchemikalie 3-Hydroxy-Propionsäure zur Produktion von weiteren Ausgangsstoffen für Acryl-Kunststoffe zu verwenden [50]. Plattformchemikalien sind chemische Grundstoffe, die für vielfältige Zwecke verwendet werden können.

4.3.5 Biobasierte Polyolefine

Zu den wichtigsten und mengenmäßig am häufigsten vorkommenden Kunststoffen gehören die Polyolefine (wichtigster Vertreter: Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP)). Sie lassen sich am einfachsten dadurch erkennen, dass ihre Dichte kleiner als 1 g/cm^3 ist – sie schwimmen in Wasser. Sowohl PE als auch PP lassen sich aus nachwachsenden Rohstoffen herstellen [51].

Biopolyethylen (Bio-PE)

Polyethylen (PE) ist der einfachste und zugleich häufigste Kunststoff mit einer globalen Produktionskapazität von 80 Mio. Tonnen ([51]). 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 Verfüg-

barkeit 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. Seit 2010 gibt es in Brasilien eine entsprechende Produktionsanlage mit einer Jahreskapazität von 200.000 t.

Biopolypropylen (Bio-PP)

Polypropylen (PP) wird ebenfalls für viele technische Anwendungen eingesetzt. Die jährliche Produktionskapazität liegt weltweit bei 44 Mio. Tonnen [51]. Biobasiertes Polypropylen kann wie Bio-PE aus Bio-Ethanol erzeugt werden, allerdings ist das Verfahren deutlich komplexer.

Zur Herstellung des Monomers Propylen C_3H_6 aus nachwachsenden Rohstoffen gibt es mehrere Möglichkeiten [52]. 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 [54].

4.3.6 Biobasiertes Polyvinylchlorid

Ethylen aus Bio-Ethanol kann darüber hinaus auch für die Produktion von teil-biobasiertem Polyvinylchlorid (PVC) verwendet werden. Ähnlich wie bei Bio-PE und Bio-PP gibt es hierzu entsprechende Anstrengungen vorwiegend in Brasilien [53].

4.3.7 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 Epoxidischäumen 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 [57]. Es wird bereits im industriellen Maßstab produziert.

Eine Alternative, ein 100% biobasiertes Epoxidharz zu erzeugen, wurde Anfang 2011 vorgestellt [58]. Die Forscher stellten aus Traubenkernöl ein Polyamin her, das dann als Härter für eine Reaktion mit epoxidiertem Leinöl verwendet wurde.

4.3.8 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, Plattformchemika-

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

4.4 Biokunststoffe aus Reststoffen

Eine vielfach geführte Diskussion ist der potenzielle Konflikt der Nutzung von Lebens- 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 (mehr dazu in Kap. 8.3).

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 Agrarwirtschaft genutzt werden. Die daraus herstellbaren Biokunststoffe sind in den Kapiteln 4.2 und 4.3 bereits beschrieben, stellen also keine „weitere“ Klasse von Biokunststoffen dar.

Die Herausforderung besteht außerdem 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 sicher gestellt wird. Von besonderer Bedeutung ist hier auch die Nutzung aller Möglichkeiten zur Reduzierung der benötigten landwirtschaftlichen Flächen für die Erzeugung von Biokunststoffen durch die Steigerung der Ressourcen- und Materialeffizienz.

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 in den Niederlanden Unternehmen, die aus so gewonnener Stärke Kunststoff produzieren. Ähnliche Ansätze zur Verwertung von stärkehaltigem Prozesswasser und Prozessabfällen gibt es auch an anderen Stellen weltweit.

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. [33].

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 [22, 59].

Schwarzlauge, ein Abfallprodukt der Zellstoffindustrie enthält neben Lignin (vgl. Kap. 3.2.3 und 4.2.3) auch sogenannte Tallöle. Die Produkte aus der Tallöldestillation 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.

5 KUNSTSTOFF-VERARBEITUNGSVERFAHREN

5.1 Einführung

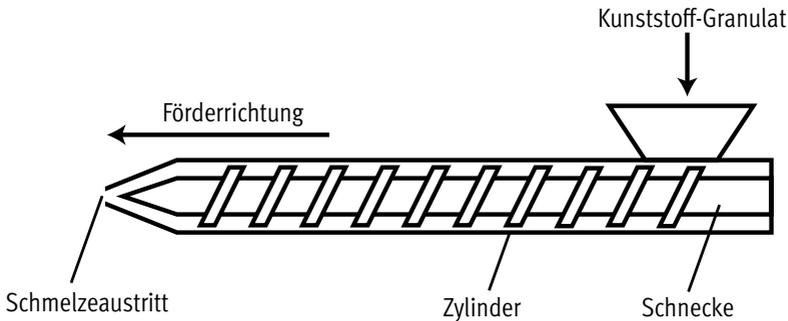
In dieser Broschüre geht es im Wesentlichen um thermoplastische Kunststoffe. Das sind Kunststoffe, die unter Wärmeeinwirkung wieder weich (plastisch) und somit schmelzbar und plastisch formbar werden. In den meisten Fällen geschieht das Aufschmelzen, oder besser die Plastifizierung in Schneckenaggregaten (siehe Abb. 5.1). Bei diesen, am ehesten mit einem Fleischwolf vergleichbaren Maschinen wird neben äußerer Wärme über eine meist elektrische Heizung weitere Energie durch Dissipation (Kneten) eingebracht. Der Kunststoff-Rohstoff wird in Granulatform in den Maschinentrichter gegeben und von der rotierenden Plastifizierschnecke



Bild 5.1: Kunststoff-Plastifizierschnecken

transportiert, aufgeschmolzen, homogenisiert und schmelzeförmig an der sogenannten Düse ausgestoßen.

SKIZZE EINES PLASTIFIZIER-AGGREGATES



Quelle: Michael Thielen

© FNR 2013

Abb. 5.1: Skizze eines Plastifizier-Aggregates

5.2 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 Verarbei-

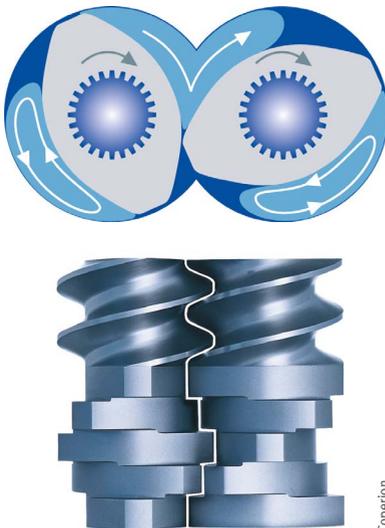


Bild 5.2: Prinzip eines gleichlaufenden Zweischnellenextruders

tungshilfsmittel 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.

Das Compoundieren geschieht häufig auf speziell für diesen Zweck verwendeten Doppelschneckenextrudern (siehe Kap. 5.3.1), wo die Komponenten besonders intensiv gemischt und homogenisiert werden können (Bild 5.2).

5.3 Weiterverarbeitung

Die verarbeitungsfertigen 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, das sind solche, die zur Aufnahme von Wasser aus der Umgebungsluft neigen, müssen in entsprechenden Aggregaten vorgetrocknet werden.

5.3.1 Extrusion

Extrusion oder Extrudieren (von lateinisch extrudere = hinausstoßen, -treiben) 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 dicke Folien, die dann im Thermoformverfahren (siehe Kap. 5.3.5) weiter verarbeitet 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 bi-axial orientierte PLA-Folie (BoPLA) [60].

Durch die Zugabe von Treibmittel kann auch ein geschäumtes Extrudat erzeugt werden (siehe Kap. 5.3.6).

Und schließlich sind Extruder auch Maschinenelemente für komplexere Prozesse wie das Folienblasen (siehe Kap. 5.3.2) oder das Extrusionsblasformen (siehe Kap. 5.3.4).

5.3.2 Blasfolien-Extrusion

Um dünne Folien zu blasen, wird ein Extruder mit einer Ringdüse kombiniert. Die plastifizierte Kunststoffmasse wird im Schlauchkopf zwischen Extruder und Düse zu einem Schlauch ausgeformt und durch die Düse nach oben ausgestoßen. Dort wird der Schmelzeschlauch mit Luft auf ein Mehrfaches des ursprünglichen Durchmessers 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 5.3: 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].

5.3.3 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].

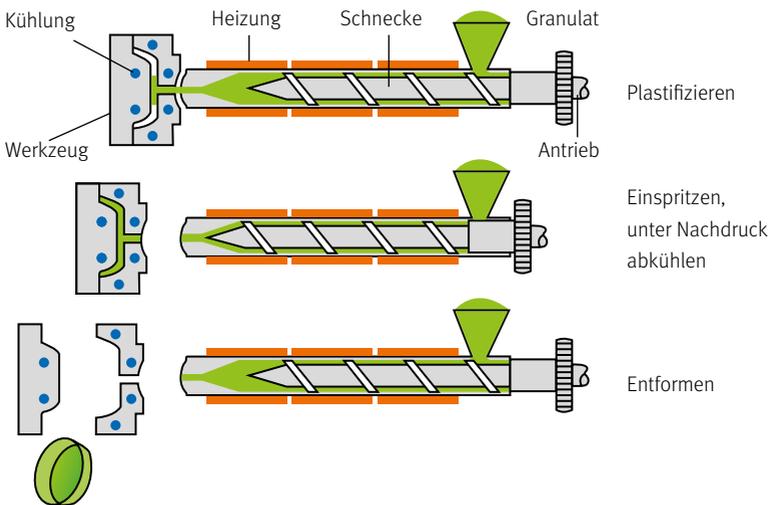
Die Anwendungsmöglichkeiten für das Spritzgießen sind schier unendlich. Beispiele sind Kugelschreiber, Lineale und andere Bürotensilien, Einwegbestecke, Gartenmöbel, Stoßstangen, Getränkekästen, Knöpfe, mechanische Kleinteile und vieles mehr.



© Ferromatik Milacron

Bild 5.4: Spritzgießmaschine

SPRITZGIESSEN



Quelle: lerntagebuch.ch – Spritzgießen

© FNR 2013

Abb. 5.2: Der Spritzgießprozess

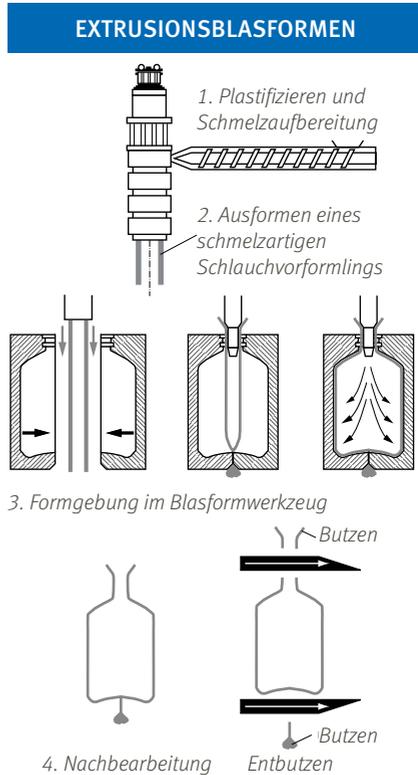
5.3.4 Blasformen

Durch Blasformen werden Hohlkörper hergestellt. Dazu gibt es unterschiedliche Verfahren, die am weitesten verbreiteten sind das Extrusionsblasformen und das Streckblasformen [61].

Beim Extrusionsblasformen wird die thermoplastische Schmelze in einem Extruder erzeugt, anschließend in eine senkrechte Fließbewegung nach unten umgelenkt und 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 herum geschlossen und quetscht diesen an beiden Enden (oben und unten) ab. Nun wird der plastische Vorformling durch eine Blasnadel oder einen Blasdorn mit Luft „aufgeblasen“ und gegen die gekühlten Wände des Blasformwerkzeugs gedrückt, wo der Kunststoff abkühlt, erhärtet und die endgültige Gestalt des Formteils annimmt.

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

Eine frühe extrusionsblasgeformte Verpackung aus Biokunststoff war eine Shampooflasche aus einem Polyhydroxyalkanoat (PHA) in den 1990er Jahren. Zu den jüngsten Beispielen gehört eine kleine Flasche aus Bio-PE für ein probiotisches Getränk eines großen Anbieters von Molkereiprodukten [62].



Quelle: Blasformen von Kunststoffhohlkörpern (Thielen, Hartwig, Gust), 2006 © FNR 2013

Abb. 5.3: Extrusionsblasformen (Grafik aus [61])

Anders als das vielseitige Extrusionsblasformen 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 bi-axiale Verstrecken der Moleküle erhält der Kunststoff eine enorme Festigkeit, sodass sehr dünnwandige Behälter hergestellt werden können.

Ein Biokunststoff, der sich ideal für das Streckblasen eignet, ist PLA.



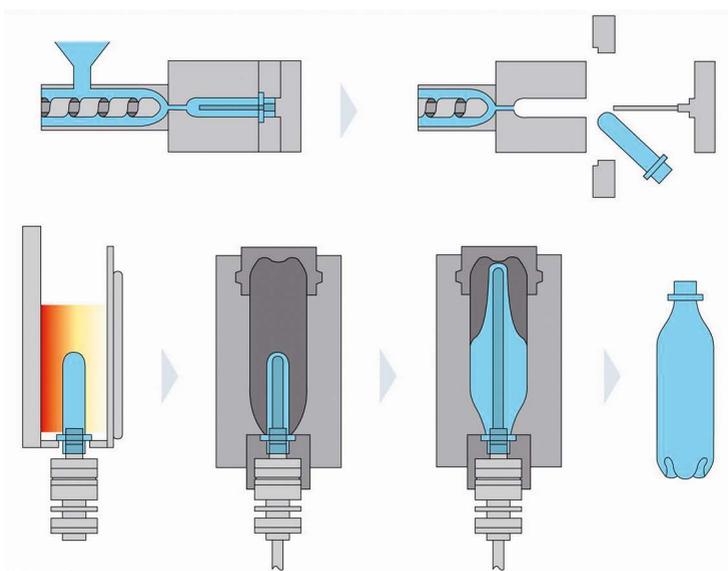
Bild 5.5: Preforms und Flaschen
(v. l. n. r.: PLA, PP, PET)

5.3.5 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.

STRECKBLASFORMEN



Quelle: KHS Corpoplast

© FNR 2013

Abb. 5.4: Streckblasformen

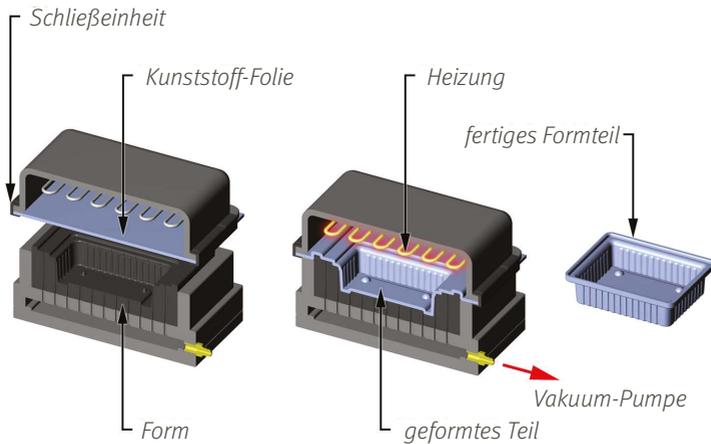
Von großen Rollen (oder in-line direkt vom Extruder) wird die Folie abgezogen und dem Formautomaten zuerst zugeführt und dann taktweise hindurchgeleitet. In einer Aufwärmstation wird mittels Heizstrahler die Folie ein- oder beidseitig erwärmt. In der Werkzeugstation wird sie dann mittels Spannrahmen fest gehalten. 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 und stark 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.

Typische Anwendungsbeispiele sind Pralinschachteleinlagen, 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.



Bild 5.6: Thermoformte Verpackung aus PLA

THERMOFORMEN



Quelle: CUSTOMPARTNET

© FNR 2013

Abb. 5.5: Thermoformen

5.3.6 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 [64]. Und beim



Bild 5.7: PLA-Partikelschaum

mechanischen Schäumen wird schließlich in die Kunststoffschmelze unter Rühren ein Gas eingeblasen (vgl. Sahneschlagen).

Nun gibt es je nach Verarbeitung unterschiedliche Kunststoffschäum-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. 4.3.3).

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 [65]. Dazu werden kleine Kügelchen mit einem Treibmittel (z. B. Pentan oder auch CO_2) beladen. Eine Form wird z. B. volumetrisch mit diesen Kügelchen gefüllt und dann erhitzt. Dabei vergrößern sich die Kügelchen und verschmelzen aufgrund des hohen Druckes miteinander.

5.3.7 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.

5.3.8 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.

5.3.9 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.

5.3.10 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 Folien-schweißgerät zum Verpacken von Lebensmitteln in PE-Folienbeuteln bereits Einzug in viele Haushalte gehalten [1].

6 ANWENDUNGEN

Biokunststoffe werden heute bereits in einer Fülle von Anwendungen eingesetzt. Über die Marktentwicklung in Zahlen wird in Kap. 8 detaillierter eingegangen.

6.1 Verpackungen

Neben einfach aufgeschäumten Verpackungschips auf Stärkebasis (Bild 6.1), 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 sind thermoformbar, können bedruckt, geschweißt, verklebt und auf vielfältige Weise zu Verpackungen konfektioniert werden. Kurzum: Verpackungsmittelhersteller und Verpacker können 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 besaßen, 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



Bild 6.1: Verpackungsflocken auf Stärkebasis

Kosmetikbedarf gibt es Dosen oder Tuben. Packstoffe aus Biokunststoffen mit Sperrwirkung, Aromadichte und guter Maschinengängigkeit sind verfügbar und werden permanent weiterentwickelt [1].

Beschichtungen von Papier- und Kartonverbunden mit Biokunststoffen führen zu neuen Verpackungen mit guter Feuchtigkeits- und Fettbeständigkeit [66].

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.



Bild 6.2: Kompostierbare Tüten eignen sich auch als Bioabfallbeutel

Bild 6.3: Obstnetz aus Biokunststoff

Bild 6.4: PLA-Flaschen

Trotzdem wird dem Verpackungsbereich für die nächsten Jahre das größte Wachstumspotenzial für Biokunststoffe zugesprochen. Anwender, Verpacker und Markenartikel profitieren von den verbraucherfreundlichen Verpackungen. Die Entsorgung von gebrauchten Verpackungen aus diesen Kunststoffen kann auf verschiedene Weise erfolgen (siehe Kap. 7).

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.



Bild 6.5: Catering-Geschirr

6.2 Gartenbau und Landwirtschaft

Neben den allgemeinen, bereits umfassend diskutierten Vorteilen biobasierter Kunststoffe spielt 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 Bauern eine Menge Arbeit sparen. Mulchfolien (Bild 6.6) aus biologisch abbaubaren Kunststoffen lassen sich nach Gebrauch unterpflügen und müssen nicht mühsam wieder eingesammelt und als verschmutzter Kunststoffabfall teuer entsorgt werden. Pflanz- und Anzuchtöpfe zersetzen sich im Boden und fallen erst gar nicht mehr als Abfall an. Schalen aus entsprechenden Biokunststoffen für Blumen- und Gemüsepflanzen können gemeinsam mit Gartenabfällen kompostiert werden [1].

Kostensparend sind auch Biokunststoff-Bindegarne, -Bänder und -Clips (Bild 6.7) zum Befestigen von hochwachsenden Pflanzen wie beispielsweise Tomaten. Während die bisher in Gemüsebaubetrieben eingesetzten Produkte nach der Ernte von Hilfskräften mühsam wieder abgesammelt werden oder gegen hohe Aufpreise mit dem Grünabfall entsorgt werden müssen, können die Biokunststoffvarianten mitsamt den Pflanzen auf den Kompost wandern [1].

Auch kompostierbare Samenbänder und Wirkstoffverkapselungen aus Biokunststoffen sind gebräuchlich. Abbaubare Folien und Netze werden in der Pilzzucht verwendet,



Bild 6.6: Mulchfolie



Bild 6.7: Bindegarne oder Clips können mit dem Grünabfall kompostiert werden

ebenso für die Ummantelung von Baum- und Strauchwurzeln als Verkaufsware. Folien, Gewebe und Netze aus Biokunststoffen sollen frisch angelegte Böschungen befestigen und die Bodenerosion verhindern, bis sie durch Pflanzen stabilisiert werden.

6.3 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.

6.4 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 recht frühes Mobiltelefon mit einem Gehäuse aus PLA, verstärkt mit Kenaf-Fasern, wurde im Jahr 2005 vorgestellt. Heute sind bereits eine Fülle von elektronischen Geräten von der Computermaus über Tastaturen bis hin zu Kopfhörerkomponenten mit Gehäuse- oder Bauteilen aus biobasierten Kunststoffen am Markt erhältlich.



Bild 6.8: Sony Walkman mit PLA

Bild 6.9: Computertastatur mit einer Basis aus Cellulose-basiertem Kunststoff und einer Handauflage aus einem Lignin-basierten Material

Bild 6.10: Computermouse aus Celluloseacetat

6.5 Automobilbau

Wie bereits in Kap. 4.1 dargestellt, hat Henry Ford in den USA bereits zu Beginn des letzten Jahrhunderts mit Weizen und Soja für Biokunststoffe in Automobilanwendungen experimentiert. Heute untersucht Ford den Einsatz von bis zu 40 % Soja-basiertem Polyol als Polyurethan-Komponente, in erster Linie für Sitze, Kopfstützen oder Armlehnen. Bei einem der ersten Projekte, einem 2008er Ford Mustang, machte der Soja-basierte Anteil der PU-Teile jedoch nur 5 Gew.-% aus [67].



Bild 6.11: Heckklappe aus naturfaserverstärktem Kunststoff

Ein weiterer Pionier ist Toyota. Im „Prius“, der derzeit als eines der umwelt-bewusstesten Autos der Welt gilt, ist die Reserverad-Abdeckplatte aus PLA mit Kenaf-Faserverstärkung hergestellt. Ende 2011 wurde berichtet, dass Toyota ein Fahrzeug auf den Markt bringt, dessen Innenraumoberfläche zu rund 80 % aus Bio-Kunststoff besteht. Bei der in Japan erhältlichen Hybridlimousine Sai sind unter anderem die Sitzbezüge und die Fußraumauslage aus teil-biobasiertem PET gefertigt [68].

Auch im Motorraum kommen Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zum Einsatz. Polyamid 11 aus Rizinusöl ist seit über 30 Jahren für Automobilanwendungen bekannt und eignet sich hervorragend für Kraftstoffleitungen und Anschlussstücke, gerade auch für Bio-Ethanol (E10 etc.) und Biodiesel-Kraftstoffe.

Im November 2012 wurde ein vollfunktionfähiges Lenkrad mit eingebautem Airbag, das zu mehr als 50 % aus nachwachsenden Rohstoffen besteht, mit dem 7. „Bioplastics Award“ ausgezeichnet. Ein biobasiertes Polyester-Elastomer bildet die Grundlage für die Entwicklung dieses biobasierten Bauteils aus dem automobilen Sicherheitsbereich [69].

Und dass sich nicht nur der Innenraum von Fahrzeugen, sondern auch die Karosserie bereits heute für den Einsatz von biobasierten Bauteilen eignet, zeigen die Forschungsarbeiten am sogenannten „Bioconcept-Car“,

einem zum Rennwagen umgebauten VW Scirocco, der als Modell für die Erprobung verschiedener biobasierter, teilweise faserverstärkter Karosserie-Bauteile dient [91].

6.6 Textil

Viele Leser verbinden mit dem Begriff Polyester ohnehin 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.



Bild 6.13: Herren-Oberhemd aus Mischgewebe mit PLA-Fasern



Bild 6.12: Bademoden aus PTT-Fasern

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.

6.7 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. Bio-PE (und sobald verfügbar Bio-PVC) sind ideale Werkstoffe für Wasser und Abwasser-Rohrleitungen.

Biobasierte Funktionspolymere finden sich in Lacken und Farben, Leinöl-Anstrichen, Tapetenkleister etc.



Bild 6.14: Teppich aus PLA-Fasern



Bild 6.15: Partikelschaum-Dämmstoff

6.8 Sonstiges

Die Möglichkeiten, Biokunststoffe einzusetzen, sind nahezu unbegrenzt. Dies verdeutlichen auch die im Folgenden exemplarisch ausgewählten Beispiele. Die Schreibtisch-Utensilien aus einem PLA chinesischer Herkunft (siehe Bild 6.17) werden in Ungarn produziert und erreichten 2010 einen Platz unter den 5 Finalisten des „Bioplastics Awards“. Klebebänder aus Cellulose-Materialien oder biaxial orientiertem PLA (BoPLA) werden inzwischen auch mit biobasierten Klebstoffen kombiniert. Auch im Sport- und Freizeitbereich nimmt die Anzahl der Anwendungen stetig zu. Der Griff eines Nordic-Walking Stockes aus teil-biobasiertem Polyamid 6.10 wurde ebenso bereits 2009 vorgestellt wie der Skischuh mit Teilen aus biobasierten Elastomeren. Ergänzt wird das Sport-Sortiment unter anderem durch Brillen und Sonnenbrillen mit hochwertigen optischen „Gläsern“ aus klarem Bio-Polyamid. Sandkastenspielzeug aus PHA oder Baumwoll-Cellulose ist auf dem Markt und Modelleisenbahner freuen sich über hochpräzise und detailverliebte Häuser aus PLA.



© Michael Thielen

Bild 6.17: Schreibtischutensilien aus PLA



© DuPont

Bild 6.18: Griff eines Nordic-Walking-Stockes aus Bio-PA 6.10



© BioFactor

Bild 6.16: Sandspielzeug aus Baumwoll-Cellulose und anderen stärkebasierten Biokunststoffen



© DuPont

Bild 6.19: Skistiefel mit einem Schaft aus teil-biobasiertem Elastomer

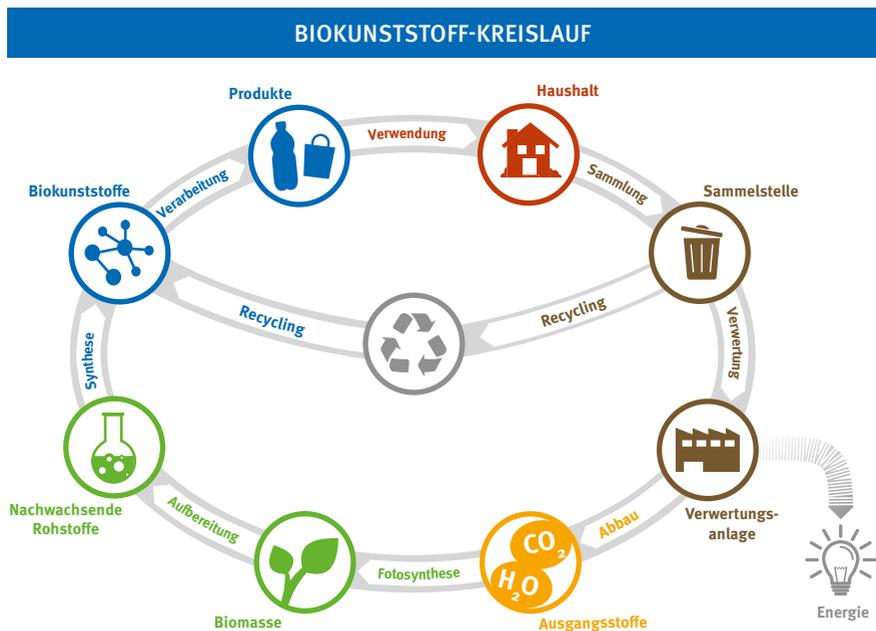
7 VERWERTUNG – ENTSORGUNG – KREISLÄUFE

Und was ist, wenn die schönen Kunststoffprodukte irgendwann kaputt, verbraucht oder sonst wie „hinüber“ 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 novellierten Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), das zum 1. Juni 2012 in Kraft getreten ist, 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. Biokunststoffe ermöglichen eine intelligente Ressourcennutzung und sorgen für eine hohe Wertschöpfung in einer kohlenstoffarmen Wirtschaft.



Quelle: FNR

Abb. 7.1: Biokunststoff-Kreislauf

© FNR 2015

Wie Biokunststoffabfälle in der Praxis nach ihrer primären Nutzung verwertet werden, hängt wie bei konventionellen Kunststoffen von der Art des Produktes und des verwendeten Biokunststoffmaterials, den anfallenden Mengen und der verfügbaren Verwertungssysteme ab [73].

Die unterschiedlichen „End-of-Life“-Szenarien sind im Folgenden aufgeführt.

7.1 Recycling

Unter Recycling (aus dem Englischen für „Wiederverwertung“ oder „Wiederaufbereitung“) versteht man ganz allgemein Vorgänge, bei denen aus nicht mehr benötigten Produkten (meist Abfall) 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.“ – Das schließt die Kompostierung begrifflich mit ein, sie wird aber hier separat unter dem Aspekt der „biologischen Behandlung“ betrachtet.

Im Fall des werkstofflichen Recyclings ist eine möglichst sortenreine Sortierung eine wesentliche Voraussetzung für die hier vorgestellten Recyclingverfahren.

7.1.1 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 wieder verwendet werden. Solches Rezyklatmaterial, 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 groben Sekundärprodukten wie Parkbänken oder Böschungsbstützungen 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 gerne 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 wieder aufbereitet werden. In einigen Fällen sind unter Umständen

den zusätzliche Schritte erforderlich. So kann es z. B. bei PLA nötig sein, einen Aufkondensationsschritt oder einen speziellen Kristallisationsschritt durchzuführen.

7.1.2 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 besonders interessantes Beispiel aus dem Bereich der Biokunststoffe ist das chemische Recycling von PLA. In Anlagen, wie sie beispielsweise in Belgien oder Kalifornien bereits in Betrieb sind, wird das PLA wieder in Milchsäure umgewandelt und kann so anschließend entweder zu neuem PLA verarbeitet oder auch anderweitig verwendet werden.

7.2 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 das sinnvollste. Der hohe Brennwert von Kunststoffen macht sie zu einem idealen Ersatz für Kohle oder Heizöl. Ob bio-

basiert 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 gewaltiger Vorteil im Vergleich zur Verbrennung fossiler Ressourcen [73].

7.3 Biologische Behandlung

7.3.1 Kompostierung

Für Kunststoffe, die unter bestimmten Bedingungen biologisch abbaubar sind, das heißt von Mikroorganismen in CO₂, Wasser und Mineralstoffe umgesetzt werden, besteht die Möglichkeit einer Kompostierung. Hierzu sind die einschlägigen Normen wie EN 13432, EN 14855, ASTM D6400 und ähnliche (siehe Kap. 2) zu beachten.

Es gibt einige Anwendungen, bei denen die biologische Abbaubarkeit oder die Verwertung durch Kompostierung Zusatznutzen bringt. Bei Events können Catering-Geschirr und Speisereste zusammen einer Kompostierung zugeführt werden. Im Jahr 2005 kamen beim katholischen Weltjugendtag rund 7 Mio. kompostierbare Catering-Einheiten zum Einsatz.

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. 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. 6.2).

7.3.2 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 [74].

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.

8 MARKT

8.1 Einleitung

Bereits heute werden für die Produktion von Kunststoffen, vor allem im Bereich der Funktionspolymere (siehe Kap. 1), in großen Mengen nachwachsende Rohstoffe eingesetzt [75].

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

Die Entwicklung der letzten Jahre hat diesem Markt jedoch einen enormen Aufschwung verliehen, die aktuellen Zuwachsraten liegen im zweistelligen Bereich.

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 fünf Jahren hat sich diese Situation grundlegend geändert. Mittlerweile wird der Markt von den sogenannten Drop-in-Biokunststoffen dominiert. Das sind biobasierte (und teil-biobasierte) Stan-

dardkunststoffe 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 andern 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 [76].

8.2 Marktübersicht

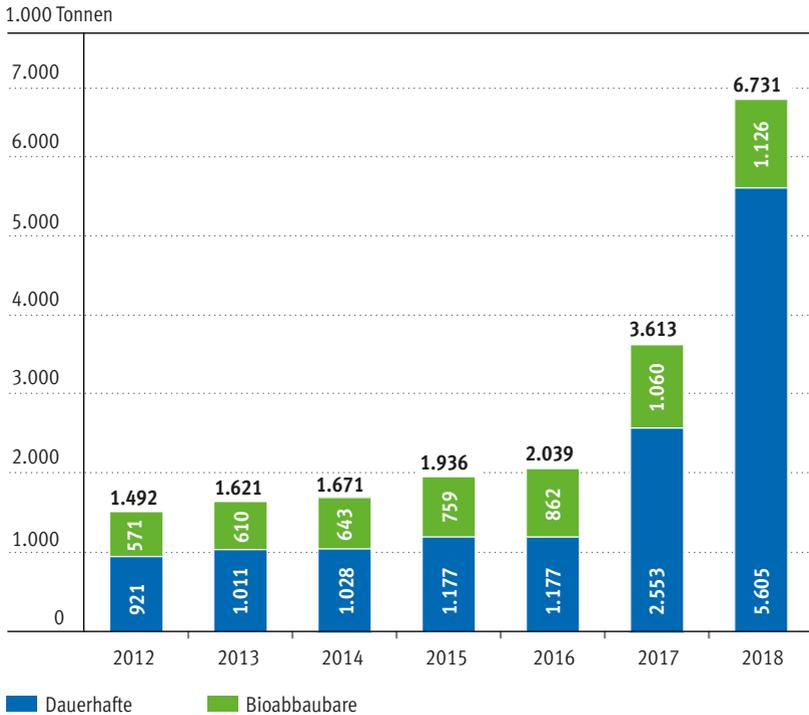
Im Juni 2015 wurde eine aktuelle Marktstudie für Biokunststoffe veröffentlicht [93]. Die zugrunde liegenden Analysen wurden vom Verband European Bioplastics, dem Institut für Biokunststoffe und Biowerkstoffe der Hochschule Hannover (IfBB) und dem nova-Institut zusammengestellt.

Wie in Abbildung 8.1 zu sehen ist, wird erwartet, dass die Produktionskapazitäten für Biokunststoffe bis 2018 auf mehr als 6,7 Mio. Tonnen steigen werden [93].

Die Grafik zeigt aber noch einen weiteren Trend, und zwar bei der Zusammensetzung des globalen Produktionsvolumens: Der Anteil dauerhafter Biokunststoffe wächst über-

proportional, die Produktionskapazitäten für bioabbaubare Polymere zeigen dagegen nur geringe Wachstumsraten.

WELTWEITE PRODUKTIONSKAPAZITÄTEN FÜR BIOKUNSTSTOFFE



Quelle: european bioplastics, IFBB Hochschule Hannover, nova-Institut [93]

© FNR 2015

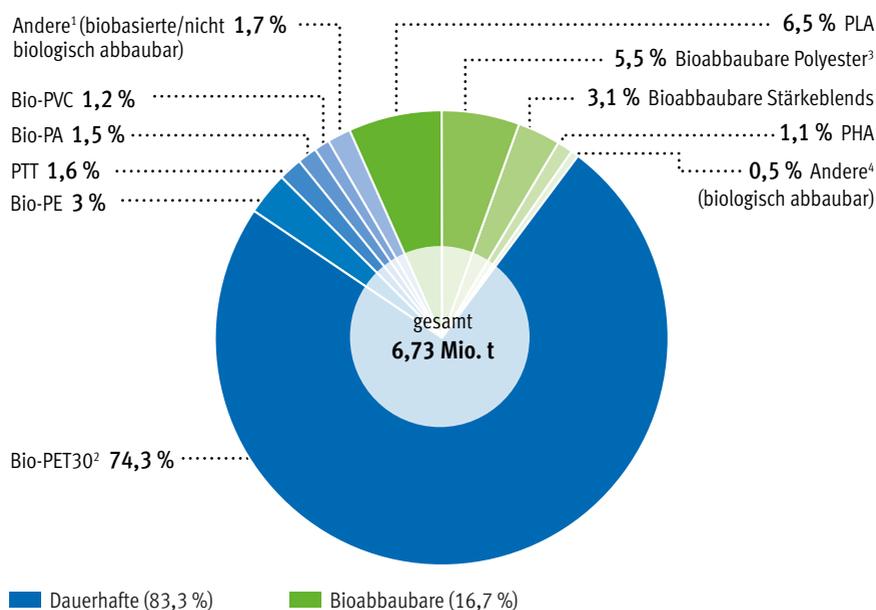
Abb. 8.1: Weltweite Produktionskapazitäten für Biokunststoffe (Werte ab 2014 geschätzt)

Welche Biokunststoff-Typen sich hinter diesen Marktzahlen verbergen, zeigt die Abbildung 8.2, in der die Produktionskapazitäten für Biokunststoffe aufgeteilt nach Kunststofftypen prognostiziert für 2018 zu sehen sind. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die großen zu erwartenden Kapazitäten für

Drop-In-Kunststoffe wie Bio-PE und Bio-PET einen erheblichen Einfluss haben werden.

Trotz dieser oben beschriebenen hohen Marktzuwächse stehen Biokunststoffe immer noch am Anfang ihrer Entwicklung. Bei einem Gesamtmarkt für Kunststoffe von

MARKTANTEILE DER VERSCHIEDENEN BIOKUNSTSTOFF-TYPEN



¹ Beinhaltet nicht abbaubare Stärkeblends, Bio-PC, Bio-TPE, Bio-PUR (außer Duroplaste), Bio-PP, PEF

² Biobasierter Inhalt beträgt 30 %, Volumensteigerung vorbehaltlich Realisierung aller geplanten und im Bau befindlichen Anlagen

³ Beinhaltet PBAT, PBS, PCL

⁴ Beinhaltet kompostierbare Celluloseerenerate und bioabbaubare Celluloseester

Quelle: european bioplastics, IfBB Hochschule Hannover, nova-Institut [93]

© FNR 2015

Abb. 8.2: Marktanteile Biokunststoffe (Schätzungen für 2018)

geschätzten 330 Mio. Tonnen in 2015 [79] machen Biokunststoffe als werkstoffliche Anwendung auch in den nächsten zwei bis drei Jahren mengenmäßig nicht mehr als 2% aus. Rein technisch gesehen könnten jedoch bis zu 90% aller Kunststoffe von fossilen auf nachwachsende Quellen umgestellt werden. Kurz- und mittelfristig wird diese Umstellung jedoch unter anderem aufgrund wirtschaftlicher Hürden und auch kurzfristig in diesem Umfang nicht verfügbarer Biomasse nicht möglich sein [80].

8.3 Haben wir überhaupt genug Agrarflächen?

Immer wieder wird 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 [78].

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 [81, 82]. Gemäß den Schätzungen in Kap. 8.2 ist demnach davon auszugehen, dass für die 2018 prognostizierte weltweite Produktionskapazität an Biokunststoffen rund 1,3 Mio. Hektar landwirtschaftlicher Fläche benötigt werden. Dies entspricht etwa 0,02% der weltweit landwirtschaftlich genutzten Fläche von ca. 5 Mrd. Hektar [93].

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 [72, 78].

9 ANHANG

9.1 Internet-Informationsquellen

www.fnr.de	FNR – Allgemeine Informationen
www.biowerkstoffe.fnr.de	FNR – Informationen rund um Biokunststoffe
www.biopolymernetzwerk.fnr.de	FNR – Informationen zu spezifischen Biokunststoffthemen
www.kommunal.fnr.de	FNR – Informationen zu Biokunststoffen in Kommunen
www.aus-natur-gemacht.de	BMELV – Informationen zur biobasierten Wirtschaft
www.european-bioplastics.org	Informationen des europäischen Industrieverbands
www.bio-based.eu	Nachrichtenportal
www.bio-plastics.org	Nachrichtenportal
www.bioplasticsmagazine.com	Fachmagazin

9.2 Quellenangaben

- [1] Lörcks, J.: Biokunststoffe, Broschüre der FNR, 2005
- [2] N. N.: Wikipedia, Internetzugriff im Zeitraum Januar-März 2013
- [3] N. N.: Plastics – the Facts 2014/15, An analysis of European plastics production, demand and waste data, Plastics Europe, Brüssel, 2015
- [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] Thielen, M.: Industrial Composting, bioplastics MAGAZINE, Vol 4., Ausgabe 02/2009
- [8] Thielen, M.: Home Composting, bioplastics MAGAZINE, Vol 3., Ausgabe 06/2008
- [9] N. N.: Leistungsfähig und bioabbaubar, Presseinformation P-09-445, BASF 2009
- [10] N. N.: bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 03/2011, S. 6
- [11] N. N.: Position Paper „Oxo-biologisch abbaubare Kunststoffe“, European Bioplastics, Berlin, 2009
- [12] N. N.: Sustainable Plastics, FKUR statement to Oxo degradable plastics, FKUR Kunststoff GmbH, Willich, 2009
- [13] N. N.: www.tecnaro.de, Internetzugriff März 2013
- [14] N. N.: www.duponttateandlyle.com, Internetzugriff März 2013
- [15] N. N.: www.genomatica.com, Internetzugriff März 2013
- [16] N. N.: www.clib2021.de, Internetzugriff Feb. 2012
- [17] N. N.: www.nova-institut.de, Internetzugriff Feb. 2012

- [18] Worden, E. C.: Nitrocellulose industry. New York, Van Nostrand, 1911, S. 568. (Parkes, Englisches Patent 2359 aus dem Jahr 1855)
- [19] Carus, M.; Scholz, L.: How to Measure the Bio-based Content, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 03/2010
- [20] Bastioli, C.: Basics of Starch-Based Materials, bioplastics MAGAZINE, Vol. 4, Ausgabe 05/2009
- [21] Zepnik, S.; Kesselring, A.; Kopitzky, R.; Michels, C.: Basics of Cellulosics, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 01/2010
- [22] N. N.: www.ivc-ev.de, Internetzugriff Juli 2015
- [23] Gaumann, U.; Werner T.: A Bio-Cover for the Airbag, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 01/2011
- [24] N. N.: www.pebax.com, Internetzugriff, März 2013
- [25] Fink, H.-P.: Basics of Lignin, MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 01/2011
- [26] Fink, H.-P.; Engelmann, G.; Ebert, A.: Lignin als Polymerwerkstoff, FNR-Fachgespräch Stoffliche Nutzung von Lignin, Berlin, März 2009
- [27] N. N.: Stoffliche Nutzung von Lignin, Gülzower Fachgespräche, Band 31, FNR, 2009
- [28] N. N.: www.wdk.de, Internetzugriff Feb. 2012
- [29] Seydibeyoğlu, M. Ö. et al.: New Biobased Polyurethane from Lignin and Soy Polyols, MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 05/2010
- [30] N. N.: Bio-Based Biodegradable PHA Foam, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 01/2010
- [31] N. N.: PHA from Switchgrass – a Non-Food-Source Alternative, bioplastics MAGAZINE, Vol. 3, Ausgabe 05/2008
- [32] N. N.: Improved PHA Production in Tobacco, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 02/2011
- [33] Fernyhough, A.: From Waste 2 Gold: Making bioplastic products from biomass waste streams, bioplastics MAGAZINE, Vol. 2, Ausgabe 04/2007
- [34] de Vos, S.: Improving heat-resistance of PLA using poly(D-lactide), bioplastics MAGAZINE, Vol. 3, Ausgabe 02/2008
- [35] N. N.: Mazda introduced 'Biotechmaterial' for interior applications, bioplastics MAGAZINE, Vol. 3, Ausgabe 02/2008
- [36] Inomata, I.: The Current Status of Bioplastics Development in Japan, bioplastics MAGAZINE, Vol. 4, Ausgabe 01/2009
- [37] N. N.: The Coca-Cola PlantBottle, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 06/2010
- [38] N. N.: Bio-PET, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 06/2010
- [39] Morgan, K.: Completing the Puzzle: 100 % plant-derived PET, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 04/2011
- [40] N. N.: Carbohydrate Route to Paraxylene and Terephthalic Acid, US Patent 2010/0331568, 30. 12. 2010

- [41] N. N.: Sorona® EP for new Toyota compact van, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 04/2011
- [42] N. N.: www2.dupont.com/Renewably_Sourced_Materials, Internetzugriff Juli 2011
- [43] Dominghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, VDI Verlag, Düsseldorf
- [44] Baur, E.; Brinkmann, T.; Osswald, T.; Schmachtenberg, E.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch, Carl Hanser Verlag, München Wien
- [45] Stoeckert: Kunststoff Lexikon, Carl Hanser Verlag, München Wien
- [46] Becker, Bottenbruch, Binsack: Technische Thermoplaste. 4. Polyamide, Carl Hanser Verlag, München Wien
- [47] Thielen, M.: Basics of bio-polyamides, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 03/2010
- [48] N. N.: K-show-review, bioplastics MAGAZINE, Vol. 2, Ausgabe 04/2007, Seite 8
- [49] N. N.: Acrylgas aus Zucker, Pressemitteilung des UFZ (2008), www.ufz.de/index.php?de=17387, Internetzugriff Juli 2011
- [50] Grimm, V. et al.: Biomasse – Rohstoff der Zukunft für die chemische Industrie, Herausgeber: Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf, 2011
- [51] Morschbacker, A. et al.: Basics of Bio-Polyolefins, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 05/2010
- [52] N. N.: Green Propylene, Report abstract, Nexant, www.chemsystems.com, Internetzugriff 2011
- [53] N. N.: Solvay Indupa will produce bioethanol-based vinyl in Brasil, Solvay Presse-Information, Dezember 2007
- [54] Smith, C.: Braskem commits to producing bio-based polypropylene, Plastics News online, 28.10.2010
- [55] Mannermaa, T.: The First Step to Sustainable Composites, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 03/2011
- [56] N. N.: Full System Ahead: The Rise of Bio-Based Thermoset, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 03/2011
- [57] N. N.: Solvay launches project to build an epichlorohydrin production plant in China, www.solvaychemicals.com, Internetzugriff Juli 2011
- [58] 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
- [59] 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, Dez. 2011
- [60] N. N.: How to Produce BOPLA Films, bioplastics MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 06/2010

- [61] Thielen, M.; Hartwig, K.; Gust, P.: Blasformen von Kunststoffhohlkörpern, Carl Hanser Verlag, 2006
- [62] N. N.: www.actimel.de/umweltfreundliche-verpackung.html, Internetzugriff, August 2011
- [63] Yoder, L.; Plastic Technologies, Inc.: Basics of Stretch Blow Moulding, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 04/2011
- [64] Oberbach, K.; Baur, E.; Brinkmann, S.; Schmachtenberg, E.: Saechtling Kunststoffhandbuch, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004
- [65] N. N.: mehrere Artikel in MAGAZINE, Vol. 5, Ausgabe 01/2010
- [66] Manjure, S.: PLA for Paper Coating, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 05/2011
- [67] N. N.: Bioplastics in Automotive Applications, bioplastics MAGAZINE, Vol. 4, Ausgabe 01/2009
- [68] N. N.: Toyota setzt auf Biokunststoff, <http://nachrichten.rp-online.de/auto/toyota-setzt-auf-biokunststoff-1.2509333> (Internetzugriff Nov. 2011)
- [69] Gaumann, U.: Biobased polymers for automotive safety components, bioplastics MAGAZINE, Vol. 8, Ausgabe 01/2013
- [70] N. N.: persönliche Information, EREMA, 2011
- [71] Willocq, J.: A new Cradle-to-Cradle Approach for PLA, bioplastics MAGAZINE, Vol. 4, Ausgabe 05/2009
- [72] Carus, M.; Raschka, A.: Agricultural Resources for Bioplastics, bioplastics MAGAZINE, Vol. 6, Ausgabe 06/2011
- [73] N. N.: Fact Sheet: Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz mit Biokunststoffen, European Bioplastics e. V., 2011
- [74] de Wilde, B.: Basics of Anaerobic Digestion, bioplastics MAGAZINE, Vol. 4, Ausgabe 06/2009
- [75] Schütte, A.: Biobasierte synthetische Polymere – ein Überblick, Dechema, Workshop: Polymermonomere aus nachwachsenden Rohstoffen, 2011
- [76] Carus, M. (Hrsg.): Market study on Bio-based Polymers in the world, 2013
- [77] N. N.: Pressemitteilung: Biokunststoffe knacken 2011 die 1-Millionen-Tonnen-Marke, European Bioplastics präsentiert neue Kapazitätsdaten auf der interpack, 12.05.2011
- [78] Endres, H.-J. et al.: Marktchancen, Flächenbedarf und zukünftige Entwicklungen, KUNSTSTOFFE 09/2011. S. 105ff
- [79] N. N.: Prognose von Plastics Europe, zitiert in Plastverarbeiter 2009 und Presse-Info der interpack 2011
- [80] Shen, L.; Haufe, J.; Patel, M.: Product overview and market projection of emerging bio-based plastics, PRO-BIB Studie, Universiteit Utrecht, 2009
- [81] N. N.: Häufig gestellte Fragen zur Nutzung von landwirtschaftlichen Ressourcen für die Produktion von Biokunststoffen (FAQ Mai 2011), European Bioplastics

- [82] Endres, H.-J.; Siebert-Raths, A.: Raw materials and arable land required for biopolymers, *Bioplastics Magazine*, Vol. 4, Ausgabe 05/09
- [83] 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
- [84] N. N.: Kunststoffe – Bewertung der Kompostierbarkeit – Prüfschema und Spezifikationen, Deutsche Fassung EN 14995:2006
- [85] N. N.: ASTM D6400 – 04 Standard Specification for Compostable Plastics
- [86] N. N.: Fact Sheet: Was sind Biokunststoffe, Begriffe, Werkstofftypen und Technologien – Eine Einführung, European Bioplastics e.V., 2011
- [87] N. N.: Logos Part 1: The “Compostable” logo of European Bioplastics (Basics), *bioplastics MAGAZINE*, Vol. 1, Ausgabe 01/06
- [88] N. N.: Logos Part 2: The “Compostable” logo of BPI: Biodegradable Products Institute, USA (Basics), *bioplastics MAGAZINE*, Vol. 1, Ausgabe 02/06
- [89] N. N.: Logos Part 3: The “OK Compost” logo of Vinçotte, Belgium (Basics), *bioplastics MAGAZINE*, Vol. 2, Ausgabe 01/07
- [90] N. N.: ASTM D6866: Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis
- [91] Habermann, C.: Mobility of the future, *bioplastics MAGAZINE*, Vol. 8, Ausgabe 01/2013
- [92] Ziegler, L. et al.: Biopolymer Composites based on Lignin and Cellulose, *bioplastics MAGAZINE*, Vol. 6, Ausgabe 01/2011
- [93] Aeschelmann, F. et al.: Bio-based building blocks and polymers in the world, nova-Institut GmbH, 2015
- [94] Mangnus, P.: The world’s next-generation polyester, *bioplastics MAGAZINE*, Vol. 7, Ausgabe 04/2012

9.3 Abkürzungsverzeichnis

ASTM	American Society for Testing and Materials	PHB	Polyhydroxybuttersäure
BMC	Bulk-Moulding-Compound	PHB	Polyhydroxybutyrat
BDO	Butandiol	PHV	Polyhydroxyvalerat
DSD	Duales System Deutschland	PHBV	Poly-3-hydroxybutyrat-co-valerat
EN	Europäische Norm	PP	Polypropylen
PBAT	Polybutylenadipaterephthalat	PTT	Polytrimethylenterephthalat
PBS	Polybutylensuccinat	PVC	Polyvinylchlorid
PBSA	Polybutylensuccinatadipat	PDO	Propandiol
PBT	Polybutylenterephthalat	RTM	Resin Transfer Moulding
PE	Polyethylen	SMC	Sheet-Moulding-Compound
PEF	Polyethylenfuranoat	TPS	Thermoplastische Stärke
PET	Polyethylenerephthalat	TPU	Thermoplastisches Polyurethan
PHA	Polyhydroxyalkanoat	USDA	United States Departm. of Agriculture
		WPC	Wood Plastic Composites

9.4 Stichwortverzeichnis

A		Becher	20, 35, 38, 39
Additive	4, 20, 30	Bernsteinsäure	12, 22, 23, 27
Agrarfläche	53	Beutel	26, 31, 37, 38
Alkydharz	22, 23	Bindegarne	40
Altfahrzeug-Verordnung	9	Bioabfall-Direktive	9
Aminosäuren	10	Bioabfallverordnung	9
Amylopektin	14	Bioenergie	27
Amylose	14	Bio-Ethanol	12, 26, 42
Armaturentafel	20	Biogasanlage	8, 49
ASTM D6400	8, 48	Biokraftstoffe	27
ASTM D6866	6, 7	Biomassevergasung	12
		BioPreferred	7
B		Blends	14, 20
Baby-Schuhe	21	Blisterverpackungen	35, 38
Bademoden	43	BMC	24, 37
Baumwolle	43	Brautkleider	43
BDO	11, 23, 27	Büroutensilien	32

C

Casein	10, 13, 16, 17
Catering	39, 48
Cellophan	16
Celluloid	13, 16
Cellulose	10, 14, 15, 16, 45
Celluloseacetat	16, 36, 41
Cellulosebutyrat	16
Cellulosederivate	15, 16, 50
Celluloseester	16
Cellulosehydrat	16
Cellulosenitrat	13, 16
Cellulosepropionat	16
Celluloseregenerate	15
Chemiefasern	16
Clamshell	35
Clips	40, 48, 49
Collagen	10, 17
Compostable-Logo	8
Computermaus	41

D

Dämmstoffe	44
Dicarbonsäure	14, 24
Diisocyanat	25
Dimethylterephthalat	21, 22
Disaccharide	10, 11
Drop-in-Biokunststoffe	50
Druckfarben	23
Duomere	5, 17, 23, 25, 27, 37

E

Einstiegsleisten	20
Elastomere	5, 17, 18, 25, 45
EN 13432	8, 9, 48
EN 14855	48
EN 14995	8
End-of-Life	46, 47
Epichlorhydrin	27

Epoxidharze	27, 28
Ethanol	12, 26
Ethylen	12, 26
Ethylenglykol	21, 22
Extrusionsblasformen	31, 33

F

Fettsäuren	10, 11, 22, 23, 25, 28
Firniss	22
Flaschen	20, 33, 34, 38, 39
Fleischschalen	20, 35
Folien	15, 16, 18, 31, 36, 38, 40, 41
Folienblasen	31
Fruktose	11
Funktionspolymere	4, 22, 27, 44, 50
Furandicarbonsäure	22
Futtermittel	27

G

Galalith	13
Gartenmöbel	32
Gelatine	10, 17, 41
Getränkekästen	32
Gewebe	40
Glukose	11
Gluten	10
Glycerin	11, 27
Glyzerin	14, 22, 24
Gummi	11, 17, 18

H

Handyschalen	20
Heimtextilien	44
Hohlkörper	24, 26, 33, 37
Hygienefolien	31

I

Itaconsäure	27
-------------	----

J

Joghurtbecher 20

K

Kalandrieren 37

Kautschuk 17, 28

Kenaf 41, 42

Kinderschuhe 21, 43

Kinderspielzeug 38

Klebebänder 45

Knöpfe 13, 32

Kohlenhydrate 11

Kohlenstoff-Anteil 6, 7

Kompostierbarkeit 8, 9, 14, 40

Kosmetikbedarf 38

Kreislaufwirtschaftsgesetz 6, 9, 46, 47

L

Latex 11, 17

Lautsprechergehäuse 17

Lebensmittel 37

Leinöl 22, 23, 27, 44

Lignin 10, 17, 28

Lippenstiftgehäuse 20, 41

Lyocell 16

M

Margarinebecher 35

Milchsäure 12, 19, 48

Mobiltelefon 41

Monoethylenglykol 21, 27

Monosaccharide 11

Motorraum 42

Mulchfolie 40, 49

N

Naturfasern 17, 27

Netze 38, 40

Nordic-Walking-Stock 45

Normen 6, 7, 8, 48

O

OK-Biobased 6, 7

OK-Compost 8

Oligosaccharide 12

P

Parkesine 13

Partikelschaum 19, 36, 44

PBAT 14, 23

PBS 23

PBSA 23

PBT 18, 22, 23

PDO 11, 22, 27

PE 12, 14, 17, 26, 33, 37, 44, 50, 52

PEF 22

PET 14, 21, 22, 23, 34, 42, 50, 52

Pflanzenöl 11, 22, 25, 27

PHA 11, 14, 18, 19, 28, 33, 36, 45

PHB 18

PHBV 18

PHV 18

PLA 12, 14, 19, 20, 21, 31, 34, 35,

36, 38, 41, 42, 43, 44, 45, 48

Planschbecken 35

PLA-Produktionsanlage 19

Plaste 4

Plastifizierschnecke 29

Plastifizierung 29, 32

Plastik 4

Platten 31, 34, 41

Polstermöbel 44

Polyacrylate 25

Polyamid 14, 18, 24, 25, 27, 28, 42, 45

Polyester 11, 14, 18, 19, 21,

22, 23, 27, 43

Polyesterharz 23, 24

Polyol 23, 25, 36, 42

Polyolefine 14, 26

Polysaccharide 10

Polysuccinat	23	Strukturpolymere	4, 27, 50
Polyurethan	17, 18, 25, 36, 42, 44	Synthesegas	12
PP	14, 26, 34, 44		
Profile	26, 31, 36	T	
Propandiol	11, 18, 22	Tallöl	28
Protein	10, 13, 16	Tastatur	41
PTT	22, 43, 44	Teppich	22, 44
PVC	14, 17, 26, 44	Terephthalsäure	21, 22, 23, 27
		Thermoplaste	17, 37
R		Tiefziehen	34
Radiocarbonmethode	6	TPS	14, 41, 50
Rayon	16	Tragetaschen	31, 37, 38
Rizinusöl	24, 25, 42	Treibmittel	31, 36
Rohre	26, 31, 37		
Rotationsformen	37	U	
RTM	37	USDA	7
		V	
S		Vakuumtiefziehen	34
Saccharose	11	Verbrennung	48, 49
Samenbänder	40	Verpackungen	4, 8, 9, 20, 23, 31, 33, 35, 37, 38, 39
Sandkästen	35	Verpackungschips	38
Sandkastenspielzeug	45	Verpackungsrichtlinie	9
Schaum	36	Verpackungsverordnung	9
Schreibtischutensilien	20, 45	Viskose	15
Schuhsohlen	18		
Schwarzlauge	28	W	
Schweißen	37	Warmformen	34
Sebacinsäure	14, 24, 27	Weichmacher	14, 30
Shampooflasche	33, 41	Wertstoffgesetz	9
Skischuh	45	WPC	44
SMC	24, 37		
Sorbitol	14	Z	
Soy-Foam	25	Zellglas	15, 16
Spachtelmassen	22	Zertifizierungsgesellschaften	8
Stärke	10, 12, 14, 18, 19, 28, 41, 50	Zucker	10, 11, 14, 19, 25
Stereokomplex	20	Zuckerrohr	26
Stoßstangen	32		
Streckblasformen	33, 34		

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
FNR 2016