

Biologisch abbaubare und biobasierte Polymere: die Perspektiven umweltfreundlicher Kunststoffe

Tadahisa Iwata*

Biobasierte Kunststoffe · Biologisch abbaubare Kunststoffe · Polymere

1. Einleitung

Kunststoffe sind bedeutende Materialien, die in verschiedenen Bereichen wie Lebensmittelverpackungen, Bekleidung, Schutzhüllen, Kommunikation, Transport- und Bauwesen, Gesundheitsfürsorge und Freizeitindustrie umfassend genutzt werden. Derzeit werden Kunststoffe überwiegend aus petrochemischen Produkten hergestellt, allerdings steigt die Nachfrage nach umweltfreundlichen Kunststoffen. Gemeint sind hier biobasierte Kunststoffe, die aus erneuerbaren Ressourcen hergestellt werden, sowie biologisch abbaubare Kunststoffe, die sich in der Umwelt zersetzen. Das Ziel ist es, eine nachhaltigere Gesellschaft zu schaffen und globale Umwelt- und Abfallwirtschaftsprobleme zu lösen. Solche Materialien sind daher eingehend untersucht worden; ihre momentanen Anwendungen sowie ihre Zukunftsaussichten werden in diesem Essay diskutiert.

2. Umweltfreundliche Kunststoffe

Biologisch abbaubare Kunststoffe wurden als erste unter Umweltschutzaspekten untersucht. Eine Vereinheitlichung der Definition von biologisch abbaubaren Kunststoffen erfolgte durch ISO/TC61/SC5/WG22 (ISO 472/DAM3, Amendment 3, General Terms and Terms Relating to Degradable Plastics).^[1] Ideale biologisch abbaubare Kunststoffe werden als Materialien definiert, die durch die Einwirkung natürlicher Mikroorganismen wie Bakterien, Pilze und Algen vollständig zu Kohlendioxid und Wasser abgebaut werden (Abbildung 1). Es spielt also keine Rolle, ob nichterneuerbare fossile Rohstoffe oder erneuerbare Biomasseresourcen als Ausgangsmaterial eingesetzt werden, weil biologisch abbaubare Kunststoffe aus Sicht der Bioabbaubarkeit umweltfreundlich sind.

Demgegenüber werden biobasierte Kunststoffe als Materialien definiert, die aus erneuerbaren Kohlenstoffressour-

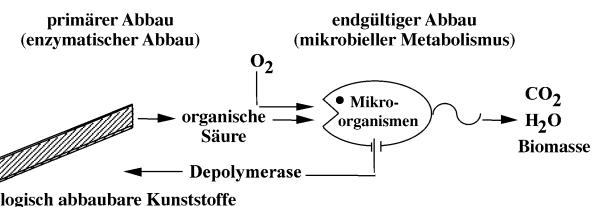


Abbildung 1. Zersetzungsweg biologisch abbaubarer Kunststoffe.

cen hergestellt sind. Extrahierte Bestandteile aus Pflanzen- oder Holzbiomasse wie Stärke, Cellulose, Hemicellulose, Lignin oder Pflanzenöl, die durch Photosynthese aus atmosphärischem Kohlendioxid hervorgehen, finden als erneuerbare Kohlenstoffressourcen Verwendung (Abbildung 2). Werden biobasierte Kunststoffe nach ihrer Verwendung ver-

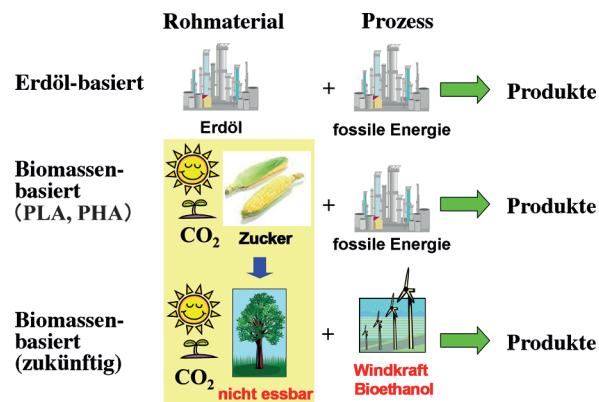


Abbildung 2. Herstellung Erdöl-basierter und biobasierter Kunststoffe.

brannt, betrachtet man sie folglich als umweltfreundliche Materialien auf Grundlage des Konzepts der „Kohlenstoffneutralität“; das erzeugte Kohlendioxid wird durch Photosynthese erneut in Biomasse umgewandelt. Ob biobasierte Kunststoffe biologisch abbaubar sind oder nicht, ist somit unerheblich. In letzter Zeit wurden anspruchsvollere Rechnungen, die mehrere Umweltkategorien berücksichtigen, über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts hinweg durchgeführt, um die Vorteile von Biokunststoffen zu demonstrieren.^[2]

Biologisch abbaubare und biobasierte Kunststoffe werden als umweltfreundliche Kunststoffe oft miteinander verwech-

[*] Prof. Dr. T. Iwata

Laboratory of Science of Polymeric Materials
Department of Biomaterial Sciences
Graduate School of Agricultural and Life Sciences
The University of Tokyo
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657 (Japan)
E-Mail: atiwata@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

Tabelle 1: Einteilung von Kunststoffen.

	biobasierte Kunststoffe (erneuerbare Ressourcen)	Erdöl-basierte Kunststoffe (fossile Ressourcen)
biologisch abbaubare Kunststoffe	Poly(milchsäure) (PLA) Polyhydroxalkanoat (PHA) Polysaccharid-Derivate (niedriger DS) ^[a] Poly(aminosäuren)	Poly(ϵ -caprolacton) (PCL) Poly(butylensuccinat/adipat) (PBS/A) Poly(butyleneadipat-co-terephthalat) (PBA/T)
nicht biologisch abbaubare Kunststoffe	Polysaccharid-Derivate (hoher DS) ^[a] Polyol-Polyurethan Bio-Polyethylen (Bio-PE) Bio-Poly(ethylenterephthalat) (Bio-PET)	Polyethylen (PE) Polypropylen (PP) Polystyrol (PS) Poly(ethylenterephthalat) (PET)

[a] DS = Substitutionsgrad.

seit, obwohl sie ihrer ursprünglichen Konzeption nach verschieden sind. Biologisch abbaubare Kunststoffe wurden ausgehend vom Gesichtspunkt der Bioabbaubarkeit entwickelt, während bei biobasierten Kunststoffen Biomasse statt Erdöl als Ausgangsmaterial verwendet wird.

In diesem Essay will ich erklären, warum diese beiden Kunststoffarten gleichzeitig diskutiert werden, und die historische Entwicklung beider Kunststoffe beschreiben.

3. Klassifizierung umweltfreundlicher Kunststoffe

Hinsichtlich ihrer Bioabbaubarkeit und ihrer Ausgangsstoffe lassen sich Kunststoffe in vier Kategorien einteilen (Tabelle 1).

Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Poly(ethylenterephthalat) (PET), die einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung der heutigen menschlichen Gesellschaft geleistet haben, sind typische Erdöl-basierte, biologisch nicht abbaubare Kunststoffe. Die meisten Erdöl-basierten Kunststoffe sind nicht biologisch abbaubar, im Gegensatz zu Poly(ϵ -caprolacton) (PCL), Poly(butylensuccinat/adipat) (PBS/A) und Poly(butyleneadipat-co-terephthalat) (PBA/T).^[3] Diese Polymere weisen Esterbindungen auf, die durch bestimmte, von Mikroorganismen ausgeschiedene Enzyme abbaubar sind, sodass sie als Erdöl-basierte, biologisch abbaubare Kunststoffe eingestuft werden.

Demgegenüber hält man alle biobasierten Kunststoffe für biologisch abbaubar. Allerdings sind Polysaccharid-Derivate mit hohem Substitutionsgrad (degree of substitution, DS),

wie das in Folien und Filtern verwendete Celluloseacetat, in der Umwelt nicht biologisch abbaubar, auch wenn Cellulose ein natürliches Polysaccharid ist und durch Cellulase vollständig zersetzt wird. Ebenso wenig biologisch abbaubar ist Bio-PE, obwohl es aus Bioethanol synthetisiert ist, das durch Fermentation von Glucose produziert wird. Neuerdings wird auch Bio-PET aus Biomasse mithilfe von biobasiertem Ethylenglycol hergestellt. Der Biomassengehalt von Bio-PET beträgt ungefähr 30 %. Selbstverständlich ist Bio-PET nicht biologisch abbaubar, sodass biobasierte Kunststoffe nicht notwendigerweise auch biologisch abbaubar sind.

Warum biobasierte Kunststoffe fälschlicherweise stets auch als biologisch abbaubar angesehen werden, hat eine historische Ursache. Bei der anfänglichen Entwicklung umweltfreundlicher Kunststoffe wurden hauptsächlich Poly(milchsäure) (PLA)^[4-6] sowie mikrobielle Polyester^[7-10] untersucht. PLA wird chemisch aus Milchsäure synthetisiert; diese wiederum entsteht durch die Fermentation von Glucose, die aus Maisstärke und Rohrzucker gewonnen wird. Mikrobielle Polyester werden aus Glucose und Pflanzenöl mithilfe von Mikroorganismen synthetisiert und reichern sich in diesen an (Abbildung 3). Die aus Biomasse erzeugten PLA

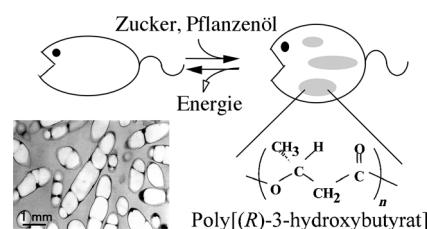


Abbildung 3. Biosynthese mikrobieller Polyester. Unten links: transmissionsselektivemikroskopische Aufnahme von Mikroorganismen, die zu 86 % aus Polyhydroxalkanoat (PHA) bestehen.



Tadahisa Iwata promovierte 1994 in Holzwissenschaften und -technologie an der Kyoto University. Danach arbeitete er zehn Jahre am RIKEN-Institut (Japan) zunächst als Wissenschaftler und anschließend als stellvertretender Leiter des Labors für Polymerchemie. 2006 wurde er Associate Professor an der University of Tokyo, wo er 2012 zum Professor ernannt wurde. Seit 2013 ist er Leiter des Department of Biomaterial Sciences, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, an derselben Universität. Zu seinen Forschungsinteressen gehören Polymermaterialien, biobasierte Polymere, biologisch abbaubare Kunststoffe, Polymerkristallographie und Polymerphysik.

und mikrobiellen Polyester sind abbaubar in Kompost, was die während der 1990er Jahre hauptsächlich untersuchte Option für das Ende ihres Lebenszyklus war. Hieraus entstand das Missverständnis, dass biobasierte Kunststoffe mit biologisch abbaubaren Kunststoffen identisch sind, was eine Reihe von Problemen verursacht hat. Das tatsächliche Potenzial umweltfreundlicher Kunststoffe für die Praxis muss erst noch ausgeschöpft werden.

4. Probleme und Perspektiven biologisch abbaubarer Kunststoffe

Biologisch abbaubare Kunststoffe finden bereits Verwendung für Lebensmittelverpackungen oder diverse Einwegartikel des täglichen Gebrauchs. Man erwartet, dass biologisch abbaubare Kunststoffe zukünftig in der Umwelt als agrartechnische Materialien wie Mulchfolien oder Sandsäcke (Abbildung 4), als Materialien in der Fischerei, z.B. als An-

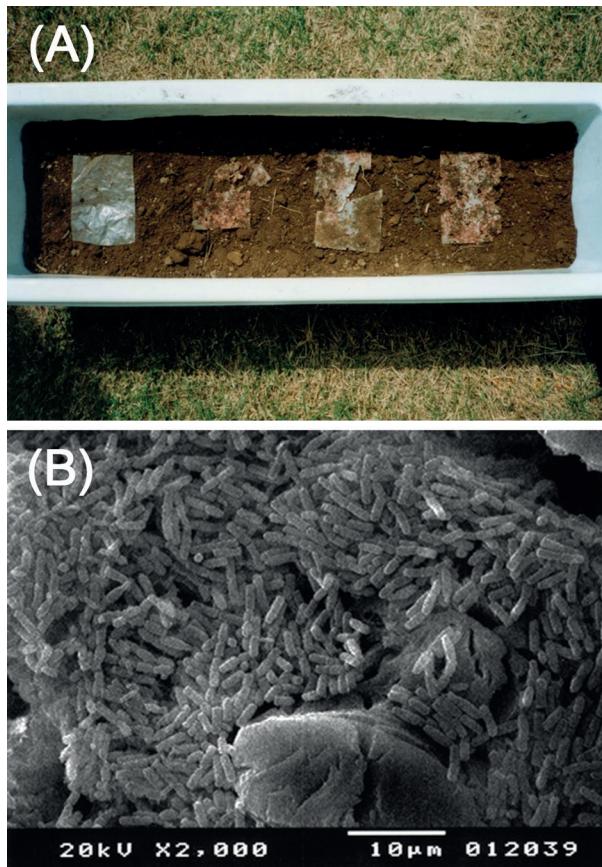


Abbildung 4. A) Biologischer Abbau einer PHA-Folie im Erdboden. Die Folie verschwand vollständig innerhalb von weniger als vier Monaten während des Sommers. B) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von abbauenden Mikroorganismen auf der Oberfläche einer PHA-Folie.

gelschnüre oder Fischnetze, im medizinischen Bereich als bioresorbierbare Materialien wie chirurgische Nähte oder Stützstrukturen (Abbildung 5)^[11] und als Hygieneartikel wie Papierwindeln Verwendung finden werden. Viele Probleme erschweren jedoch ihren tatsächlichen Einsatz in der Praxis.

Ein derartiges Problem betrifft die Mischung mit anderen Polymeren. Hat ein biologisch abbaubarer Kunststoff für sich allein nicht die gewünschten Eigenschaften, muss ein anderes Polymer hinzugemischt werden, um diese Eigenschaften zu erzielen. Wird ein biologisch nicht abbaubarer mit einem biologisch abbaubaren Kunststoff gemischt, zersetzen sich in der Umwelt nur die biologisch abbaubaren Bestandteile. Die Folge ist, dass biologisch nicht abbaubare, in kleinere Partikel

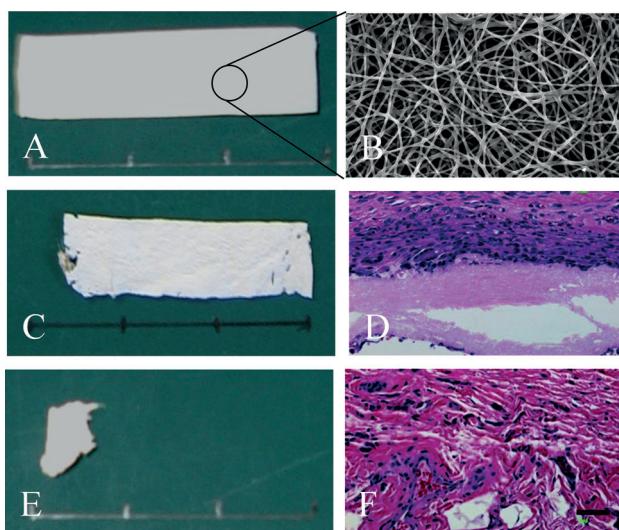


Abbildung 5. Elektrogesponnene PHA-Nanofasergerüste vor (A und B) sowie vier (C) und zwölf Wochen (E) nach subkutaner Implantation in eine Ratte. Phasenkontrastbilder von Hämatoxylin/Eosin-gefärbten, ultradünnen Abschnitten von PHA-Nanofasergerüsten nach in-vivo-Abbau über vier (D) und zwölf Wochen (F). Maßstabsbalken: 50 µm.^[11]

aufgespaltene Kunststoffe in die Umwelt diffundieren und sie belasten. Der Gebrauch von Copolymeren, die aus biologisch abbaubaren und biologisch nicht abbaubaren Monomeren bestehen, könnte noch gravierendere Verschmutzungen hervorrufen, weshalb derartige Copolymeren nie als biologisch abbaubare Kunststoffe eingesetzt werden sollten.

Weitere Probleme bei biologisch abbaubaren Kunststoffen bestehen darin, den biologischen Abbau hinsichtlich seiner Geschwindigkeit zu steuern sowie ihn durch Zugabe eines Auslösers (Triggers) zu initiieren. Die gewünschte Geschwindigkeit des biologischen Abbaus und der Bioabsorption hängt vom Verwendungszweck ab. So ist gut bekannt, dass die Kristallinität, die lamellare Dicke und die Molekülkonformation wichtige Faktoren sind, welche die Geschwindigkeit des biologischen Abbaus steuern, zusätzlich zu den verschiedenen biotischen und abiotischen Faktoren in unterschiedlichen Umgebungen.^[9,12,13] Die gewünschte Geschwindigkeit lässt sich durch die Entwicklung besserer Ausformungsverfahren sowie durch Steuern der molekularen und hochgeordneten Struktur der Materialien erzielen.

Für biologisch abbaubare Kunststoffe ist wünschenswert, dass sie während ihrer gesamten Nutzungsdauer eine überdurchschnittliche Leistung zeigen. Mit anderen Worten ist es notwendig, den Bioabbau unmittelbar nach Gebrauch und Entsorgung auslösen zu können. Dafür ist der Einbau einer Startfunktion zum biologischen Abbau unerlässlich.

Ein langfristiges Problem des Einsatzes biologisch abbaubarer Kunststoffe ist der Einfluss biologisch abgebauter Produkte auf die Umwelt, einschließlich Pflanzen und Tiere. Kunststoffformteile können bestimmte Probleme bereiten, z.B. ist es möglich, dass eine Meeresschildkröte eine Plastikkappe verschluckt. Bislang wurde jedoch wenig untersucht, welchen Einfluss chemische Substanzen aus solchen Kunststoffformteilen haben; sobald die biologisch abbaubaren Kunststoffe aber beginnen, sich zu zersetzen, lösen sich die

entsprechenden Produkte im Wasser. Gemäß der Definition für biologisch abbaubare Kunststoffe müssen diese teilweise bioabgebauten Produkte durch abbauende Mikroorganismen vollständig in Wasser und Kohlendioxid zerlegt werden (Abbildung 4B). Steigt die Menge der teilweise bioabgebauten Produkte jedoch zu stark, wird der Boden durch ihre hohe Konzentration sauer. Daher ist es nötig, den Einfluss wasserlöslicher, biologisch abbaubarer Produkte auf das Pflanzenwachstum und den Boden über einen längeren Zeitraum hinweg zu überwachen.

Dessen ungeachtet sollten biologisch abbaubare Kunststoffe so viel wie möglich gesammelt und zur Energieerzeugung verwendet werden, beispielsweise in Form von Biogas und im Kompost durch mikrobielle Fermentation. Biologisch abbaubare Kunststoffe sollten außerdem dort eingesetzt werden, wo eine Diffusion in die Umwelt unvermeidlich oder eine Mülltrennung schwierig ist. Selbstverständlich darf die Verfügbarkeit biologisch abbaubarer Kunststoffe nicht zu einer Vermüllung mit Kunststoffprodukten ermuntern.

Vor kurzem wurden mehrere dreidimensionale Strukturen von Enzymen, z.B. von Polyhydroxybutyrat-Depolymerase (Abbildung 6)^[14,15] und Cellulasen^[16] aufgeklärt, die den

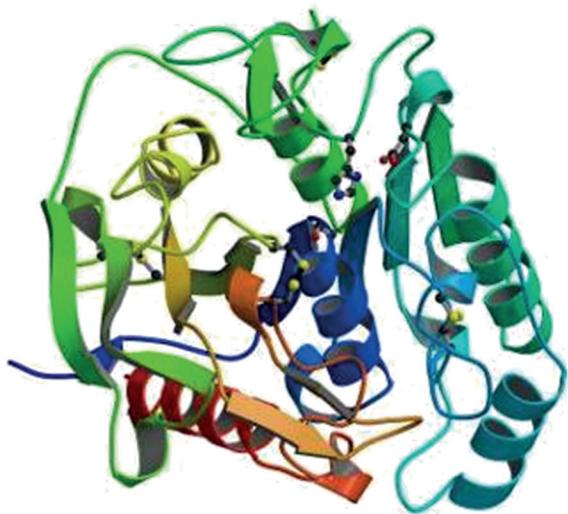


Abbildung 6. Dreidimensionale Struktur der Polyhydroxybutyrat-Depolymerase.^[15]

Abbau biologisch abbaubarer Kunststoffe katalysieren. Meiner Meinung nach wird es in Zukunft erforderlich sein, durch Strukturmodifizierungen dieser natürlichen abbauenden Enzyme neuartige, künstliche Varianten zu entwickeln, die nicht biologisch abbaubare Kunststoffe wie PET oder Polystyrol (PS) zersetzen können.

5. Probleme und Perspektiven biobasierter Kunststoffe

Das Wort „Biomasse“ wurde durch die Verknüpfung der Biologie (Bio) mit einer Menge (Masse) gebildet und steht für organische Ressourcen wie Holz oder allgemein pflanzliche

Biomasse. Außerhalb einer Wachstumsperiode kann Biomasse semipermanent und künstlich durch Photosynthese reproduziert werden.

Der Begriff „biobasierte Kunststoffe“ ist erst einige Jahre in Gebrauch, obwohl es derartige Kunststoffe schon lange gibt und sie als Faser- und Folienmaterialien ausgiebig Verwendung finden. Zum Beispiel ist Cellulose das am häufigsten vorkommende Biomassematerial der Erde, genutzt in Naturfasern wie Baumwolle und Jute und in regenerierten Fasern wie Viskose. Cellulose ist jedoch kein Thermoplast, weshalb üblicherweise auch Cellulosederivate, z.B. Celluloseacetat oder Carboxymethylcellulose, eingesetzt werden. Celluloseacetat ist bei Filter-, Faser- und Folienmaterialien weit verbreitet.

In der Natur, wie auch in Cellulose, gibt es viele Arten natürlicher Polysaccharide mit verschiedenen charakteristischen Strukturen. Beispiele dafür sind Hemicellulose, die Xylan, Chitin und Chitosan enthält, die aus Krebsen und Krabben gewonnen werden, oder Curdlan und Pullulan, die durch Mikroorganismen synthetisiert werden (Abbildung 7).

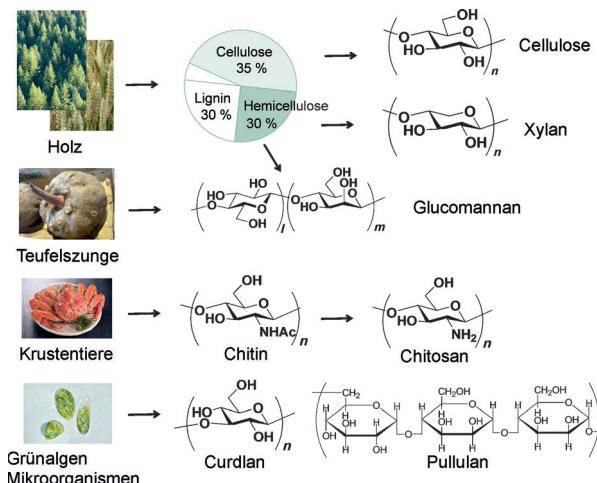


Abbildung 7. Natürliche Polysaccharide.

Die Verwendung dieser Polysaccharide als Kunststoffmaterial fand bisher keinerlei Beachtung, weil sie ein geringes Molekulargewicht, eine verzweigte Struktur und keine einheitliche Zusammensetzung haben und weil ihre Herstellungskosten sehr hoch sind. Die Hauptroute zu thermoplastischen Biopolymeren ist heute folgerichtig die Depolymerisation von entweder Stärke oder Cellulose-haltigen Substanzen zu ihren monomeren Zuckern sowie die nachfolgende Monomer- und Polymersynthese durch Fermentation und/oder chemische Katalyse. Es werden noch weitere Forschungen notwendig sein, um neue, wettbewerbsfähige, hochfunktionelle biobasierte Polymere zu entwickeln, indem die charakteristischen Strukturen natürlicher Polysaccharide genutzt werden. Diese natürlichen Polysaccharide sind im Übrigen als nicht essbare Biomasse einzustufen, weshalb ihre Verwendung als biobasierte Kunststoffe gefördert werden sollte.

Gegenwärtig ist Poly(milchsäure) (PLA), die aus Milchsäure (LA) hergestellt wird, das meistverwendete biobasierte Polymer. LA wird von Mikroorganismen produziert, die Glucose nutzen, die aus Maisstärke und Rohrzucker als Kohlenstoffquelle gewonnen wird. Die mikrobielle Synthese neuer Monomere stellt ein so genanntes Bioraffinerieverfahren dar.

Die Verwendung von Monomeren mit aromatischen Gruppen ist unentbehrlich, um Polymere mit hoher thermischer Stabilität zu entwickeln. Es ist daher zu erwarten, dass sich die mikrobielle Synthese aromatischer Verbindungen durch Fermentation zu einem äußerst wichtigen, aber anspruchsvollen Forschungsgebiet entwickeln wird, da sich aromatische Moleküle nur sehr schwer über Fermentation produzieren lassen. Kürzlich gelang es Suzuki et al., eine neue aromatische Verbindung, 3-Amino-4-hydroxybenzoësäure, mikrobiell aus C₃- und C₄-Primärmetaboliten mithilfe zweier Enzyme zu synthetisieren,^[17] und Suvannasara et al. entwickelten ein neues Polyimid, das sich erst bei >390°C zersetzt.^[18]

Dagegen haben Untersuchungen, wie diese aromatischen Verbindungen aus Holz lignin extrahierbar sind (Abbildung 8), bereits begonnen.^[19] Da jedoch viele Arten von aromatischen Verbindungen gleichzeitig aus Lignin isoliert

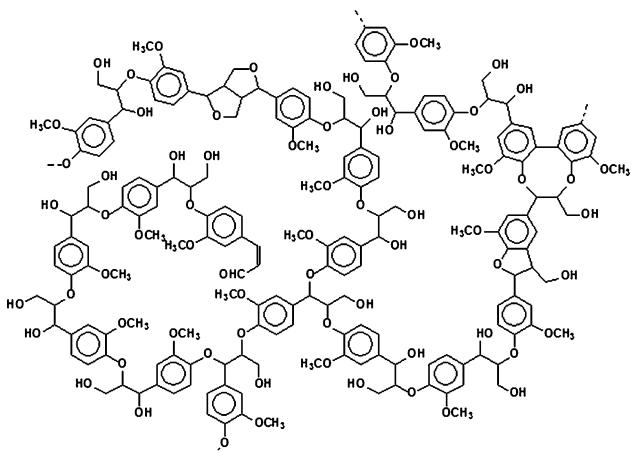


Abbildung 8. Vorgeschlagene Struktur von Holz lignin.

werden, ist es schwierig, sie als Ausgangsmaterialien für Kunststoffe zu verwenden. Es gibt noch keine kostengünstigen und energieeffizienten Isolierungsmethoden für einzelne aromatische Verbindungen; hier sollte zukünftige Forschung ansetzen. Demzufolge glaube ich, dass ein neuer Ansatz für die Verwendung von Lignin erforderlich ist, d.h., die aus Lignin isolierten aromatischen Rohverbindungen sollten unmittelbar eingesetzt werden, um Hochleistungsmaterialien herzustellen. Biobasierte Kunststoffe auf Basis natürlicher Polysaccharide und aromatischer Rohverbindungen zeichnen sich durch einzigartige Strukturen aus und haben andere Eigenschaften und Verarbeitungsverfahren als Erdöl-basierte Kunststoffe. Dementsprechend sind neue, grundlegende Forschungen zu biobasierten Kunststoffen notwendig, darunter die Entwicklung von Formungs- und Materialverarbeitungsverfahren, die für alle Kunststoffe geeignet sind.

Ein weiterer Trend bei biobasierten Polymeren ist die Entwicklung von Verfahren, die gewöhnliche Kunststoffe wie PE, PP oder PET aus Biomasse erzeugen. So wird Bio-PE in Brasilien bereits aus Bioethanol gewonnen. Außerdem stammt auch der Poly(ethylenglycol)-Anteil von PET aus Biomasse. Bei diesen Kunststoffen wurde Biomasse anstelle von Erdöl als Rohstoff eingesetzt, allerdings haben die Endprodukte die gleiche Struktur wie die Erdöl-basierten Kunststoffe. Mit anderen Worten: Es sind dieselben Verarbeitungsanlagen und -methoden einsetzbar, und die Eigenschaften des Endprodukts sind ebenfalls dieselben. Die Probleme durch die hohen Kosten der meisten Biokunststoffe werden mit einem zukünftigen Anstieg der Erdölpreise an Bedeutung verlieren, aber insbesondere die rasche Entwicklung nichtkonventioneller Prozesse zur Erdölförderung aus Schiefergas dürfte die Zeit der Verfügbarkeit billiger fossiler Ressourcen deutlich verlängern. Dementsprechend sollten hochleistungsfähige, biobasierte Kunststoffe entwickelt werden, die allein aus Biomasse herstellbar sind.

6. Vereinheitlichung der Zertifizierungssysteme und soziale Akzeptanz

Die Etablierung eines Zertifizierungssystems und experimenteller Standardmethoden ist notwendig, um die Verwendung biologisch abbaubarer und biobasierter Kunststoffe zu unterstützen. Für biologisch abbaubare Kunststoffe wurde der ISO-Standard eingeführt, sodass jedes Land Prüfungen zur biologischen Abbaubarkeit gemäß diesem Standard durchführt; die Zertifizierungsorganisationen eines jeden Landes beurkunden dann „biologisch abbaubare Kunststoffe“ (Abbildung 9). Die Japan Bioplastic Association (JBPA) kennzeichnet solche Kunststoffe als „Grüne Kunststoffe“. Zudem wurde eine internationale Vereinbarung zwischen Japan, Deutschland und den USA getroffen, der zufolge z.B. ein Kunststoff, der in Japan als „Grüner Kunststoff“ zertifiziert ist, nach dem Export nach Deutschland oder in die USA dort auf Antrag der jeweiligen Firma ohne einen weiteren Test der Bioabbaubarkeit eine Zertifizierung (und das Logo) als „kompostierbar“ bzw. „compostable“ erhalten kann. Ge-

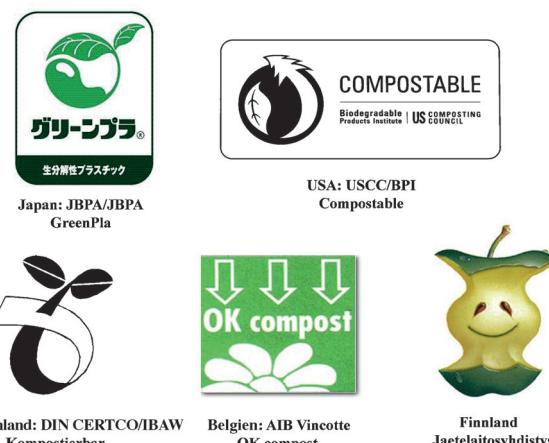


Abbildung 9. Zurzeit verwendete Logos für biologisch abbaubare Kunststoffe (Copyright erteilt von der JBPA).

genwärtig werden die meisten Bioabbaubarkeitstests nur unter aeroben Bedingungen durchgeführt; allerdings werden entsprechende Tests in Zukunft auch unter anaeroben Bedingungen erforderlich sein.

Die Verwendung biologisch abbaubarer Kunststoffe wird in Europa gefördert, besonders in Italien, wo 2010 entschieden wurde, dass sämtliche Einwegtüten entweder wiederverwendbar sein oder aus biologisch abbaubaren Kunststoffen produziert werden sollen. Außerdem wird die Nutzung von biologisch abbaubaren, aus erneuerbaren Ressourcen hergestellten Kunststoffen in mehreren europäischen Ländern nachhaltig gefördert, was die Nachfrage nach biobasierten Kunststoffen beträchtlich erhöht.

Während mittlerweile also einheitliche internationale Standards für biologisch abbaubare Kunststoffe festgelegt wurden, sind bei der Zertifizierung biobasierter Kunststoffe noch einige Probleme zu lösen. Kürzlich wurde eine Synthese von Bio-PE und Bio-PET aus Biomasse entwickelt. Kommen biobasierte Varianten herkömmlicher Kunststoffe allein oder in Verbundmaterialien zur Anwendung, ist zu klären, ob diese Kunststoffe tatsächlich aus Biomasse hergestellt sind oder wie hoch der prozentuale Anteil des biobasierten Kunststoffs im Verbundmaterial ist (Biomasseanteil). Da Erdöl-basiertes und biobasiertes PE dieselbe chemische Struktur haben, lässt sich anhand ihres Aussehens unmöglich bestimmen, ob ein bestimmtes PE-Produkt aus Biomasse oder Erdöl hergestellt wurde. Vor kurzem wurde eine Methode entwickelt, die diese Materialien unterscheiden kann; hierbei wird der Biomasseanteil durch Messung des Gehalts an radioaktivem ^{14}C in der Probe durch Beschleuniger-Massenspektrometrie berechnet.^[20] Zurzeit ist dieses Verfahren sehr teuer (ca. 70000 Yen oder 500 € pro Probe). Die exakte Bestimmung des Biomassegehalts im Endprodukt ist gleichwohl wegen behördlicher Bestimmungen (Evaluierung und Authentifizierung) und zu Inventurzwecken notwendig. Darüber hinaus ist die Kenntnis des Biomasseanteils in einem Produkt auch von Vorteil, wenn man für grüne Produkte werben und das Vertrauen und die Zufriedenheit des Verbrauchers festigen möchte.

Für die Zertifizierung biobasierter Kunststoffe gibt es in Japan zwei verschiedene Logos, und zwar das Logo „Biomasse-Kunststoff“ der JBPA sowie das „Biomasse-Produkt“-Logo der Japan Organic Resources Association (JORA; Abbildung 10). Das „Biomasse-Kunststoff“-Logo wird an



Abbildung 10. In Japan verwendete Logos für Produkte auf Basis von Biomasse. A) Logo für Biomasse-Kunststoffe der JBPA. B) Logo für Biomasse-Produkte der JORA (Copyright erteilt von der JBPA und JORA).

Materialien mit einem Gehalt an biobasiertem Kunststoff von >25 % vergeben. Zum Beispiel ist es einem Verbundmaterial aus Erdöl-basiertem PE und Holzmehl im Verhältnis von 75:25 nicht gestattet, das „Biomasse-Kunststoff“-Logo zu tragen. Dagegen wird das Logo „Biomasse-Produkt“ bereits einem Verbundmaterial mit einem Holzmehl- oder Fasergehalt von >5 % verliehen. Zwischen diesen beiden Labels besteht also ein großer Unterschied. Um biobasierte Kunststoffe bekannter zu machen und um ein besseres Verständnis des Gesamtkonzepts zu erzielen, wäre es notwendig, diese beiden Logos zu vereinen.

7. Schlussfolgerungen

Biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe der nächsten Generation, die zu einer nachhaltigeren Gesellschaft beitragen werden, sollten aus nicht essbarer Biomasse hergestellt werden und darüber hinaus auch eine überlegene Leistungsfähigkeit aufweisen, indem sie dauerhaft und über lange Zeit beständig sind. Andererseits sollten der biologische Abbau und das Recycling dieser Kunststoffe ausgewogen sein, und wiederverwertbare Kunststoffe müssen so umfassend wie möglich recycelt werden. Bisher sind Kunststoffe durch katalytische Verfahren aus Erdöl synthetisiert worden. Von nun an müssen wir ein gründliches Verständnis der Struktur von Biomasse entwickeln; durch die Modifizierung der Struktur und Eigenschaften von Biomasse können sich neuartige funktionale Kunststoffe herstellen lassen. Zu diesem Zweck sollten Biomasseforscher, Mikrobiologen, Synthesechemiker und Prozessingenieure ihre jeweiligen Kenntnisse nutzen und gemeinsam daran arbeiten, Materialien für den Wohlstand der Menschen und für eine nachhaltigere Gesellschaft zu entwickeln.

Ich danke Dr. Rogers Yukiko und Dr. Daisuke Ishii für das Lesen und die Korrektur dieses Manuskripts.

Eingegangen am 5. November 2014
Online veröffentlicht am 12. Januar 2015

- [1] H. Sawada, *Polym. Degrad. Stab.* **1998**, *59*, 365.
- [2] a) M. Akiyama, T. Tsuge, Y. Do, *Polym. Degrad. Stab.* **2003**, *80*, 183; b) J. Hong, Y. Zhang, X. Xu, X. Li, *Biomass Bioenergy* **2014**, *67*, 304; c) T. A. Hottle, M. M. Bilec, A. E. Landis, *Polym. Degrad. Stab.* **2013**, *98*, 1898; siehe auch Lit. [4].
- [3] Y. Tokiwa, H. Pranamuda in *Microbial degradation of aliphatic polyesters, Biopolymers, Vol. 3b* (Hrsg.: A. Steinbüchel, Y. Doi), Wiley-VCH, Weinheim, **2002**, S. 85–104.
- [4] E. T. H. Vink, K. R. Rabago, D. A. Glassner, P. R. Gruber, *Polym. Degrad. Stab.* **2003**, *80*, 403.
- [5] R. Auras, B. Harte, S. Selke, *Macromol. Biosci.* **2004**, *4*, 835.
- [6] *Poly(Lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications* (Hrsg.: R. Auras, L.-T. Lim, S. E. M. Selke, H. Tsuji), Wiley, Hoboken, **2010**.
- [7] Y. Doi, *Microbial Polyesters*, VCH Publishers, New York, **1990**.
- [8] R. W. Lenz, R. H. Marchessault, *Biomacromolecules* **2005**, *6*, 1.
- [9] T. Iwata, *Macromol. Biosci.* **2005**, *5*, 689.
- [10] B. Laycock, P. Halley, S. Pratt, A. Werker, P. Lant, *Prog. Polym. Sci.* **2014**, *39*, 397.

- [11] H. Y. Tang, D. Ishii, A. Mahara, S. Murakami, T. Yamaoka, K. Sudesh, R. Samian, M. Fujita, M. Maeda, T. Iwata, *Biomaterials* **2008**, *29*, 1307.
- [12] K. Sudesh, H. Abe, Y. Doi, *Prog. Polym. Sci.* **2000**, *25*, 1503.
- [13] T. Iwata, Y. Aoyagi, M. Fujita, A. Takeuchi, Y. Suzuki, K. Uesugi, *Macromolecules* **2006**, *39*, 5789.
- [14] D. Jendrossek, R. Handrick, *Annu. Rev. Microbiol.* **2003**, *57*, 403.
- [15] T. Hisano, K. Kasuya, Y. Tezuka, N. Ishii, T. Kobayashi, M. Shiraki, E. Orudjev, H. Hansma, T. Iwata, Y. Doi, T. Saito, K. Miki, *J. Mol. Biol.* **2006**, *356*, 993.
- [16] B. Henrissat, *Cellulose* **1994**, *1*, 169.
- [17] H. Suzuki, Y. Ohnishi, Y. Furusho, S. Sakuda, S. Horinouchi, *J. Biol. Chem.* **2006**, *281*, 36944.
- [18] P. Suvannasara, S. Tateyama, A. Miyasato, K. Matsumura, T. Shimoda, T. Ito, Y. Yamagata, T. Fujita, N. Takaya, T. Kaneko, *Macromolecules* **2014**, *47*, 1586.
- [19] K. Ehara, D. Takada, S. Saka, *J. Wood Sci.* **2005**, *51*, 256.
- [20] M. Kunioka, F. Ninomiya, M. Funabashi, *J. Polym. Environ.* **2007**, *15*, 281.