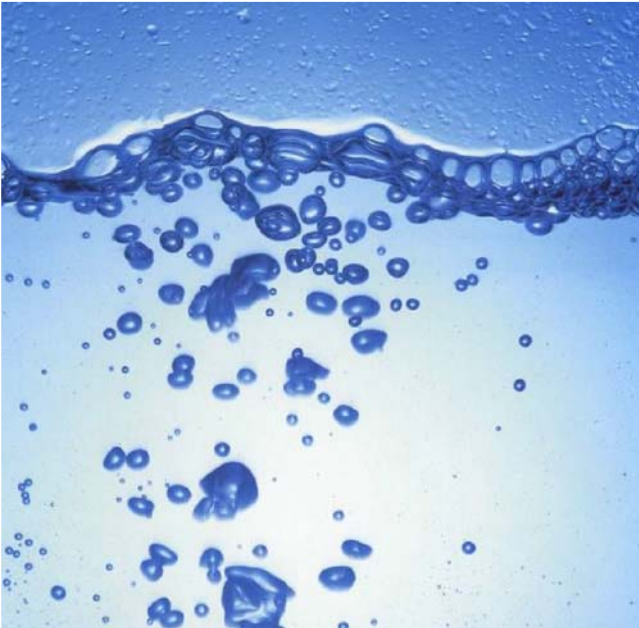




Zukunftsmarkt Biokunststoffe



Zukunftsmarkt Biokunststoffe

Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes

im Rahmen des Forschungsprojektes
Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern
(Förderkennzeichen 206 14 132/05)

durchgeführt

von

Borderstep Institut

im Auftrag des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (Fh-ISI),
Karlsruhe

Autoren:

Severin Beucker

Frank Marscheider-Weidemann

unter Mitarbeit von Michael Carus

Impressum

Herausgeber: Umweltbundesamt (UBA)
Postfach 1406, 06844 Dessau-Roßlau
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
www.umweltbundesamt.de

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Referat Öffentlichkeitsarbeit
11055 Berlin
E-Mail: service@bmu.bund.de
www.bmu.de

ISSN: 1865-0538

Projektbetreuung: Michael Golde
Umweltbundesamt (UBA)

Peter Franz
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Autoren: Dr. Severin Beucker, Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit
www.borderstep.de
Tel. 030-306 45 1002
Dr. Frank Marscheider-Weidemann, Fraunhofer ISI
unter Mitarbeit von: Michael Carus, nova-Institut

Titelfotos: Q-Cells AG, BMU / Rupert Oberhäuser, ccvision GmbH

Stand: Dezember 2007

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Summary	3
1 Einführung	5
2 Potenziale der Technologieline Biokunststoffe	7
2.1 Einführung.....	7
2.2 Technologie der Biokunststoffe	7
2.2.1 Definition und Abgrenzung von Biokunststoffen.....	7
2.2.2 Komponenten der Techniklinie Biokunststoffe	12
2.3 Nutzen für Umwelt und Gesellschaft	16
2.3.1 Beitrag zum Umweltschutz.....	16
2.3.2 Gesellschaftlicher Nutzen.....	19
2.4 Wirtschaftliche Potenziale	20
2.4.1 Marktpotenzial – aktuell und Perspektive 2020	20
2.4.2 Verfügbarkeit von Rohstoffen.....	25
2.4.3 Identifikation und Charakterisierung wichtiger aktueller und zukünftiger Zielländer	27
3 Leistungsfähigkeit der wichtigsten Länder in der betrachteten Techniklinie	30
4 Innovationssystem und marktführende Unternehmen in den führenden Ländern	31
4.1 Akteursanalyse.....	31
4.1.1 Zentrale Akteure (Unternehmen/Zulieferer/Hersteller)	31
4.1.2 Akteure Thermoplastische Stärke, Stärkewerkstoffe.....	33
4.1.3 Akteure Polylactide	34
4.2 Orientierungsgebende Länder.....	35

4.3	Vernetzung innerhalb der Branche, Vernetzung mit Forschung	36
4.4	Rahmenbedingungen und Regulierung.....	38
5	Fazit: SWOT-Analyse	41
	Literatur.....	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Vereinfachter Produktions- und Verwertungszyklus von Biokunststoffen.....	12
Abbildung 2-2:	Patentanmeldung zu Stärkepolymeren 2000 -2004 [n=188].....	15
Abbildung 2-3:	Entwicklung der Patentanmeldungen zu Stärkepolymeren.....	15
Abbildung 2-4:	Entwicklung und Prognose des weltweiten Kunststoffverbrauchs bis 2010.....	21
Abbildung 2-5:	Einsatzgebiete von Kunststoffen in Deutschland	22
Abbildung 2-6:	Prognostizierte Produktionskapazitäten für Biokunststoffe	23
Abbildung 2-7:	Projektion des weltweiten Marktvolumens bis 2020 [in Mio. EUR].....	24
Abbildung 2-8:	Exporte von Biorohstoffen	28
Abbildung 2-9:	Importe von Biorohstoffen	28
Abbildung 2-10:	Verbrauch von Kunststoffen nach Verbrauchsregionen und Wachstum in % p.a.	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Unterscheidung von Biokunststoffen.....	9
Tabelle 2-2:	Anwendungen von Biokunststoffen.....	11
Tabelle 2-3:	Wertschöpfungsstufen von Biokunststoffen	13
Tabelle 4-1:	Überblick über Biokunststoffe und ihre Hersteller	32
Tabelle 5-1:	SWOT-Analyse für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der EU und Deutschlands in der Techniklinie Biokunststoffe.....	43

Zusammenfassung

Biokunststoffe basieren auf nachwachsenden Rohstoffen, wie z. B. Stärke, Cellulose oder Milchsäure. Ihr Einsatz wird als ein Beitrag zur Vermeidung von negativen Umwelteffekten konventioneller Kunststoffe, zur Verringerung des Ölverbrauchs sowie zur Steigerung des Einsatzes landwirtschaftlich erzeugter Rohstoffe gesehen. Einige der neu entwickelten Materialien, insbesondere die biotechnologisch erzeugten Polylactide besitzen Eigenschaften, wie z. B. Wasserdampfdurchlässigkeit, gute Bedruckbarkeit sowie antistatisches Verhalten, die konventionellen Kunststoffen gegenüber im Vorteil sind.

Biokunststoffe können für verschiedenste Anwendungen genutzt werden, die von der Folienherstellung über Spritzgießen bis hin zu funktionellen Polymeren reichen. Sie können je nach Zusammensetzung eine kurze oder lange Lebensdauer besitzen. Viele Biokunststoffe können nach der Gebrauchsphase durch Mikroorganismen, z. B. Pilze oder Bakterien in Kohlendioxid und Wasser zerlegt werden.

Durch den Einsatz von Biokunststoffen können somit im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen Kohlendioxidemissionen reduziert werden, wenngleich auch bei ihrer Herstellung Energie in der Landwirtschaft sowie der Verarbeitung benötigt wird. Der Beitrag von Biokunststoffen zum Klima- und Ressourcenschutz ist jedoch noch nicht vollständig erforscht und Bedarf weiterer Analysen. Erste Arbeiten weisen auf einen positiven Zusammenhang hin.

Der Anteil von Biokunststoffen am Weltkunststoffmarkt ist zurzeit relativ klein. Rund 350.000 Tonnen Biokunststoffe wurden im Jahr 2006 produziert. Dies entspricht einem Marktanteil von ca. 0,2 %. Biokunststoffe verzeichnen jedoch mit einem durchschnittlichen jährlichen Marktwachstum von bis zu 25 – 30 % einen starken und raschen Anstieg. Bis zum Jahr 2020 wird eine Steigerung der Produktionskapazitäten auf ca. 3 Mio. Tonnen prognostiziert.

Kurz- bzw. mittelfristig wird die Entwicklung des Marktes für Biokunststoffe insbesondere von den folgenden Faktoren abhängen:

- Entwicklung des Rohölpreises: Das Marktpotenzial für Biokunststoffe hängt stark vom Verhältnis des Rohölpreises zu dem nachwachsender Rohstoffe ab. Bei der aktuellen Entwicklung eines steigenden Rohölpreises werden die ersten Biokunststoffe konkurrenzfähig.
- Konkurrierende Anwendungen nachwachsender Rohstoffe: Die intensive Nutzung nachwachsender Rohstoffe für die Herstellung von Biokunststoffen und anderer Produkte, wie z. B. Biotreibstoffe setzt eine Intensivierung der heimischen Landwirt-

schaft bzw. Exporte voraus. Solche konkurrierenden Anwendungen werden in der Zukunft verstärkt in Konkurrenz zueinander treten und erfordern eine nationale Diskussion und Planung über den Einsatz nachwachsender Rohstoffe.

- Skaleneffekte: Eine weitere Voraussetzung für die Verringerung der Preise von Biokunststoffen liegt in der Schaffung größerer und konkurrenzfähiger Produktionskapazitäten für spezifische Biokunststoffe.

Europa und Deutschland gehören zu den stärksten Akteuren in der Forschung und Produktion von Biokunststoffen und können von dem sich entwickelnden Markt profitieren. Weitere Forschung ist im Bereich konkreter Anwendungen von Biokunststoffen notwendig. Die deutsche (Umwelt-)Politik kann die Anwendung von Biokunststoffen durch die Änderung der geltenden Förderpolitik sowie abfallspezifischer Regelungen fördern.

Summary

Bioplastics based on renewable resources like e.g. starch, celluloses or lactic acid are considered one way to reduce environmental impacts, oil consumption and increase the use of agricultural feedstocks. Some of the newly developed materials based on biotechnology even have properties that make them superior to regular plastics; they can, e.g. be breathable, printable and antistatic.

Bioplastics can be used for different applications ranging from foils, injection moulding, extrusion or functional polymers. They can have a short or a long lifespan depending on the material or the compound used to produce them. Many bioplastics are partially or completely biodegradable. After their use they can be degraded mostly into water and carbon dioxide by fungi, bacteria or enzymes. This makes bioplastics also a candidate for reducing carbon dioxide emissions although energy is needed to produce and harvest the raw materials as well as for the manufacturing processes involved.

The possible environmental effects and impacts of bioplastics have not yet been completely assessed and understood. Bioplastics could combine the potential to increase resource efficiency and reduce environmental effects, but further research is necessary before conclusions and recommendations can be made for this new class of materials.

The share of bioplastics in the world's plastics market is relatively small at the moment. Approx. 350,000 tonnes of bioplastics were produced in 2006. This is equivalent to approx. 0.2 % of the plastics produced worldwide. Experts believe the market for bioplastics will grow at a rate of 25 – 30 % in the near future and reach the one million tonne mark by the year 2010 and could even raise to 3 million tonnes per year by 2020.

In the short and medium term, the development of the market for bioplastics strongly depends on following factors:

- Development of crude oil price: The market potential for bioplastics is heavily dependent on the crude oil price. Under the current situation of a rising oil price, the first bioplastics made from thermoplastic starch have become competitive.
- Competing applications of renewable resources: The intense use of renewable and agricultural resources for manufacturing bioplastics and other products such as bio-fuels require an increase in agricultural production or raw materials. Such concurrent applications of renewable resources will compete in the future and require a national discussion and plan that takes the different concurrent applications of renewable resources and imports into account.

- Economies of scale: A further important prerequisite for lower bioplastics prices is the generation of bigger and more competitive production capacities for specific biopolymers.

Europe and Germany are two of the strongest players in the research and production of bioplastics and could profit from the developing market. Further research is necessary on applications of bioplastics. German policy can support the application of bioplastics by modifying subsidy policy and waste related regulations.

1 Einführung

Der Umwelt- und Ressourcenschutz gewinnt national und international eine zunehmende Bedeutung. Damit verbunden wird sich die Nachfrage nach Umwelttechniken weltweit dynamisch entwickeln. Inzwischen hat sich aus dem Umwelt- und Ressourcenschutz auch ein maßgeblicher Treiber für Innovationen entwickelt. Umwelt- und Innovationspolitik wachsen dadurch immer stärker zusammen, moderne Umweltpolitik muss auch Innovationspolitik sein.

Um Wachstums- und Beschäftigungspotenziale zu mobilisieren ist es wichtig, Synergieeffekte zwischen der Verbesserung der Umweltsituation, der Schaffung zukunftsfähiger Arbeitsplätze und der Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit zu identifizieren und zu nutzen. Das Forschungsprojekt „Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern“ analysiert die Innovationsdynamik in wichtigen Handlungsfeldern systematisch und auf zusammenfassender Ebene. Diese Handlungsfelder bildeten die Basis, um elf Produktgruppen/Technologien auszuwählen, die in Fallstudien vertieft untersucht werden.

Jede Fallstudie enthält eine kurze Vorstellung der Grundlagen der entsprechenden Technologie. Anschließend folgt eine nähere Analyse des Zukunftsmarktes und seiner Innovationsdynamik. Besonderes im Blickpunkt stehen dabei die Entwicklung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher und europäischer Unternehmen im internationalen Vergleich, ihr Umfeld sowie Ansatzpunkte für eine Stärkung des deutschen und europäischen Innovationssystems.

Innerhalb der Reihe: „Umwelt, Innovation, Beschäftigung“ sind Fallstudien zu den folgenden Themen erschienen: Solarthermische Stromerzeugung, CO₂-Abscheidung und Speicherung, Elektrische Energiespeicherung, Solares Kühlen, Energieeffiziente Rechenzentren, Biokunststoffe, Synthetische Biokraftstoffe, Hybride Antriebstechnik, Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement, Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie, Stofferkennung und –trennung.

In dieser Veröffentlichung werden die Ergebnisse der Fallstudie Biokunststoffe beschrieben. Dabei wird auf Biokunststoffe fokussiert, die auf Basis nachwachsender Rohstoffe wie z. B. Zucker, Stärke und Cellulose hergestellt werden.

Zunächst werden die Technologielinie der Biokunststoffe mit ihren wichtigsten Komponenten, der aus der Technologie resultierende Nutzen für Umwelt und Gesellschaft sowie die wirtschaftlichen Potenziale mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2020 vorgestellt. Darauf folgen eine kurze Analyse der Leistungsfähigkeit der wichtigsten Ziellän-

der sowie eine Beschreibung des Innovationssystems und der marktführenden Länder der Techniklinie Biokunststoffe. Abschließend werden die zentralen Ergebnisse in einer SWOT-Analyse zusammengefasst.

2 Potenziale der Technologielinie Biokunststoffe

2.1 Einführung

Weltweit werden jährlich mehr als 220 Mio. Tonnen Kunststoffe auf Erdölbasis erzeugt. Ihre Anwendung reicht von Folien und Einwegverpackungen über Gebrauchsgegenstände, bis hin zu Bauteilen in der Elektronik- und Computerindustrie sowie im Automobilbau.

Aufgrund ihrer vielfältigen Eigenschaften, ihrer universellen Einsetzbarkeit und den geringen Herstellungskosten sind Kunststoffe ein wichtiger Werkstoff und Ausgangsmaterial für viele Industriezweige und Produkte. In der EU werden ca. 20 % der weltweit produzierten Kunststoffe hergestellt. Deutschland produzierte im Jahr 2005 mit 18 Millionen Tonnen ca. 9 % des weltweiten Kunststoffaufkommens¹.

Neben ihrer ökonomischen Bedeutung kommt den Kunststoffen auch eine wichtige ökologische Rolle zu. Da durch Ihre Produktion große Mengen an Öl und Energie verbraucht werden, sind Material- und Energieeinsparungen, die in dieser Branche realisiert werden können, von umwelt- und ressourcenpolitischer Bedeutung. Kunststoffe stellen zudem in vielen Ländern ein großes Abfallproblem dar. Eine aktuelle Studie von Greenpeace weist z. B. auf die zunehmende Verschmutzung der Weltmeere und das damit verbundene Sterben von Meeresorganismen durch Kunststoffabfälle hin (Greenpeace 2006).

Steigende Rohölpreise und die genannten Umweltprobleme haben in den letzten Jahren das Interesse an Biokunststoffen verstärkt. Im Folgenden soll betrachtet werden, welche ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Potenziale, sich aus einer verstärkten Nutzung von Biokunststoffen ergeben können.

2.2 Technologie der Biokunststoffe

2.2.1 Definition und Abgrenzung von Biokunststoffen

Der Sammelbegriff Kunststoff steht für eine verzweigte Gruppe von Werkstoffen aus synthetisch oder halbsynthetisch erzeugten Polymeren mit organischen Gruppen, die in die drei Hauptgruppen Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere unterteilt werden. Kunststoffe können entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu den genannten Gruppen un-

¹ Siehe Information des Verbandes Kunststofferzeugender Industrie (VKE) unter <http://www.vke.de/de/markt/> (letzter Abruf März 2007)

terschiedliche Eigenschaften wie Formbarkeit, Härte, Elastizität, Bruchfestigkeit haben. Sie können zudem gegen Wärme und chemische Einflüsse resistent sein².

Als Biokunststoffe werden in dieser Fallstudie Kunststoffe bezeichnet, die aus nachwachsenden Rohstoffen (z. B. Stärke, Cellulose, etc.) erzeugt werden³. Sie können je nach Zusammensetzung eine kurze oder lange Lebensdauer besitzen. Zum Teil sind sie vollständig biologisch abbaubar und werden nach ihrer Nutzungsphase durch Mikroorganismen, wie Pilze, Bakterien und Enzyme vorrangig in Wasser und Kohlendioxid zerlegt. Als Rohstoffe für ihre Produktion kommen in erster Linie Stärke und Zucker aus landwirtschaftlichen Erzeugnissen oder auch Cellulose aus der Holzindustrie zum Einsatz. Darüber hinaus befinden sich eine Reihe weiterer nachwachsender Rohstoffe, wie z. B. Pflanzenöle, Pflanzenproteine, Lignin oder Chitin in der Forschung und Erprobung, die in dieser Fallstudie nicht näher betrachtet werden.

Aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellte Kunststoffe spielten bereits in den Anfängen der Kunststoffentwicklung eine wichtige Rolle. Die ersten Kunststoffe auf Basis von Cellulose und Kampfer waren Celluloid und Zellglas. Sie wurden jedoch rasch durch petrochemische Varianten, wie z. B. Bakelit, Acrylglas und später durch die großtechnische Herstellung von Polyethylen und Polypropylen in Nischenanwendungen verdrängt.

Entgegen der ursprünglich begrenzten Anzahl an Biokunststoffen sind heute Polymere für eine Vielzahl von Einsatzbereichen verfügbar. Diese auf spezifische Anforderungen abgestimmten Biokunststoffe sind das Ergebnis langjähriger Forschung und Fortschritte im Bereich der Werkstoffkunde, der Verfahrenstechnik und des Maschinenbaus. Für den Einsatz größerer Volumina von Biokunststoffen musste insbesondere die Verwendbarkeit von großtechnischen Fertigungs- und Verarbeitungsanlagen der Kunststoffindustrie sichergestellt werden (Karus 2003: 2). Heute können Biokunststoffe auf handelsüblichen Maschinen und mit Standardverfahren (z. B. Tiefziehen, Extrusion und Spritzguss) verarbeitet werden.

Biokunststoffe werden in der Literatur verschieden unterteilt. So können sie z. B. nach ihrem Verwendungszweck (Struktur-, Konstruktions- und Funktionspolymere) differen-

2 Vgl. hierzu die Erläuterungen des Europäischen Verbandes der Kunststoffhersteller unter: <http://www.plasticseurope.org/content/default.asp?PageID=39> (letzter Abruf März 2007)

3 Die Definition des Begriffes Biokunststoff wird in der Fachliteratur nicht einheitlich wiedergegeben. Teilweise werden auch petrochemische aber biologisch abbaubare Kunststoffe zu den Biokunststoffen gezählt. Bisher ist auch der Mindestanteil an Komponenten aus nachwachsenden Rohstoffen in Biokunststoffen nicht definiert. Nach Armansperg (2006: 294) können Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sowohl biologisch abbaubar als auch nicht abbaubar sein. Biokunststoffe werden sowohl mit Hilfe biotechnologischer als auch konventioneller Verfahren hergestellt.

ziert (siehe z. B. Armansperg 2006: 292) oder auch nach den für ihre Herstellung verwendeten nachwachsenden Rohstoffen unterschieden werden⁴. Die häufigsten in Biokunststoffen eingesetzten nachwachsenden Rohstoffe und ihre Hauptanwendungen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 2-1: Unterscheidung von Biokunststoffen

Name	Eigenschaften	Hauptverwendung
Thermoplastische Stärke (TPS)	<ul style="list-style-type: none"> • besteht neben Stärke aus natürlichen Weichmachern und Plastifizierungsmitteln wie Glycerin oder Sorbitol • thermoplastisch, kurzlebig, biologisch abbau- und kompostierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Folie, Spritzguss, Extrusion
Polylactide (PLA)	<ul style="list-style-type: none"> • werden biotechnologisch über Fermentation von Milchsäure aus Zucker oder Stärke hergestellt • langlebig, je nach Zusammensetzung schnell bis kaum biologisch abbaubar, eingeschränkt kompostierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Folien, Spritzguss
Cellulose (-acetate)	<ul style="list-style-type: none"> • werden aus Cellulose durch Veresterung, beispielsweise mit Essigsäure, hergestellt (z. B. Celluloseacetat, Celluloseacetopropionat und Celluloseacetobutyrat) • witterungsbeständig, transparent, zähelastisch und thermoplastisch, nicht biologisch abbaubar, nicht kompostierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Folien • z. T. Funktionspolymere
Polyhydroxyalkanoate (PHA)	<ul style="list-style-type: none"> • werden durch biotechnologische Verfahren aus Zucker oder Stärke hergestellt • bilden klare Filme, gute mechanische Eigenschaften, biologisch abbaubar, eingeschränkt kompostierbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Spritzguss

eigene Darstellung

Biokunststoffe werden in der Literatur, vergleichbar den Biokraftstoffen, auch in zwei Generationen eingeteilt (FORASSET 2006: 1). Die sogenannte erste Generation der

⁴ Vgl. hierzu auch die die Einteilung des Europäischen Branchenverbands European Bioplastics unter: <http://www.european-bioplastics.org/index.php?id=33> (letzter Abruf März 2007) sowie Karus (2003)

Biokunststoffe wird direkt aus natürlichen oder chemisch modifizierten Polymeren wie z. B. Stärke oder Cellulose hergestellt. Zu ihr zählen z. B. die thermoplastischen Stärken und Cellulose(-acetate). Sie sind begrenzt modifizierbar und können z. B. durch Additive (siehe unten) an spezifische Einsatzbedingungen angepasst werden.

Die zweite Generation der Biokunststoffe basiert dagegen auf Monomeren (z. B. Milchsäure), die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen und über Polymerisation zu Polymeren und Kunststoffen weiterverarbeitet werden. Zu ihnen zählen beispielsweise die Polylactide und die Polyhydroxyalkanoate. Da der Syntheseweg über Monomere zu Polymeren eine Vielzahl von Modifikationen der Ausgangssubstanzen erlaubt, können die Biokunststoffe der zweiten Generation besser an spezifische Einsatzbedingungen angepasst werden und besitzen daher ein größeres Spektrum an Einsatzmöglichkeiten.

Viele Biokunststoffe enthalten Additive und Zusatzstoffe, die sowohl auf petrochemischer Basis als auch auf Grundlage nachwachsender Rohstoffe erzeugt werden. Dabei handelt es sich z. B. um Weichmacher, Stabilisatoren etc., die für die Erzielung spezifischer Eigenschaften, wie z. B. mechanische Stabilität, Licht- und Temperaturbeständigkeit notwendig sind (Kaeb 2006: 2). So wird thermoplastische Stärke z. B. durch die Zugabe von Additiven leichter verarbeitbar und beständiger.

Außerdem werden Biokunststoffe auch mit größeren Mengen an petrochemischen Kunststoffen gemischt, wodurch sogenannte Blends entstehen. Theoretisch ist eine Vielzahl von Materialkombinationen aus Biokunststoffen und konventionellen Kunststoffen möglich.

Biokunststoffe besitzen im Vergleich zu petrochemischen Kunststoffen eine Reihe neuer und spezifischer Materialeigenschaften, wie z. B. antistatische Eigenschaften, gute Bedruckbarkeit, hohe Wasserdampfdurchlässigkeit und biologische Abbaubarkeit, die sie für neue Einsatzgebiete in der Landwirtschaft, der Medizin oder auch der Lebensmittelerzeugung interessant machen (Kaeb 2006: 3). Der Branchenverband der industriellen Hersteller, Verarbeiter und Anwender von Biokunststoffen "European Bioplastics" nennt folgende Anwendungen von Biokunststoffen⁵:

⁵ Für eine Übersicht siehe die Webseite des Verbandes European Bioplastics unter: <http://www.european-bioplastics.org/index.php?id=7> (letzter Abruf März 2007)

Tabelle 2-2: Anwendungen von Biokunststoffen

Anwendungsbereich	Beispiel
Gartenbau	Pflanztöpfe, Steckunterlagen, Torfsäcke, Bindematerial, etc.
Landwirtschaft	Abdeckfolien, Mulchfolien, Bindegarne, etc.
Medizintechnik	Operationsmaterial, Nähfaden, Schrauben, Kapseln, Implantate, etc.
Verpackungen	Füllmaterial, Folien, Blister, Hohlkörper, Trays, Becher, Säcke, Tüten, etc.
Gebrauchsgüter	Hygieneprodukte, Abfallsäcke, Bastelmaterialien, etc.
Gastronomie und Catering	Geschirr, Besteck, Strohhalme, Trinkbecher, etc.

eigene Bearbeitung nach European Bioplastics

Bei den genannten Beispielen handelt es in erster Linie um kurzlebige Anwendungen, die aus thermoplastischer Stärke und Polylactiden gefertigt werden. Daneben existieren eine Reihe langlebiger Anwendungen, wie z. B. Spritzgussteile aus Polylactiden und Polyhydroxyalkanoaten, die in ersten Produkten der Automobil- und Elektronikindustrie enthalten sind.

Neben den genannten Kunststoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe gibt es auch vollsynthetische, biologisch abbaubare Kunststoffe (z. B. der Copolyester Ecoflex®) auf Basis fossiler Rohstoffe, die nicht Gegenstand dieser Fallstudie sind.

Zu der Gruppe der Biopolymere werden z. T. auch sogenannte Funktionspolymere (z. B. Zusatzstoffe für Lacke, Farben und Klebstoffe) gezählt, die auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt werden (siehe auch Armansperg 2006: 281 f). Auch sie werden im Rahmen dieser Fallstudie nicht betrachtet, da sie Bestandteil einer anderen Werkstoffgruppe sind und anderen Einsatz- und Verwertungsbedingungen unterliegen.

Ein weiteres vielversprechendes Einsatzgebiet von Biokunststoffen ergibt sich aus ihrer Mischung mit Naturfasern (Müssig, Carus 2007: 23). Daraus können langlebige Bauteile gefertigt werden, die z. B. in der Automobilindustrie zum Einsatz kommen können. Solche Naturfaserverstärkten Kunststoffe (NFK) werden hier als eine mögliche Anwendung von Biokunststoffen betrachtet.

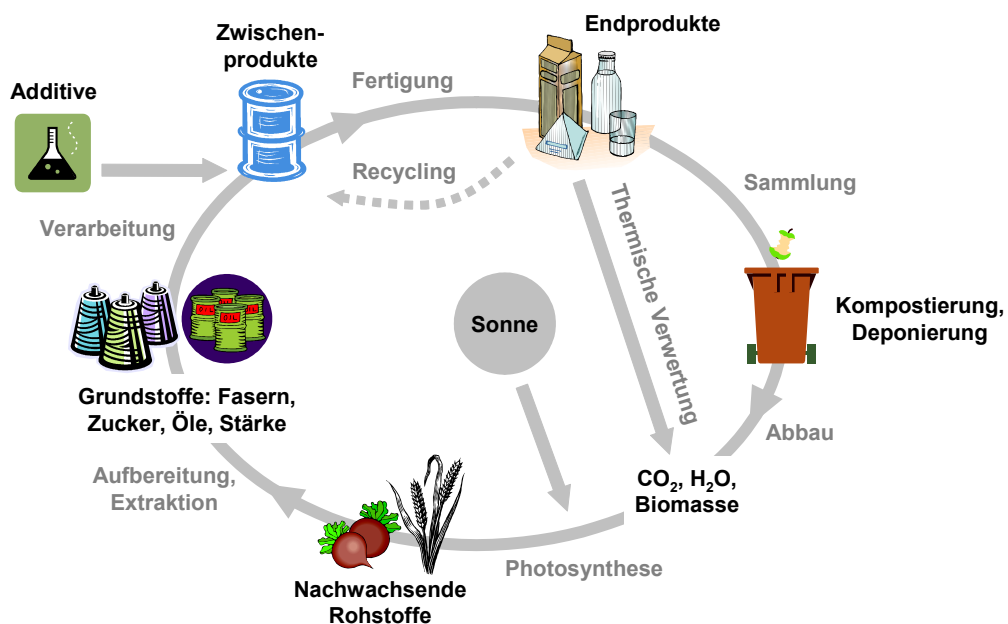
Für die Verwertung von Biokunststoffen nach ihrer Gebrauchsphase gibt es unterschiedliche Optionen, die von der Zusammensetzung und den Eigenschaften des Ma-

terials abhängen. Je nach eingesetztem Werkstoff können Biokunststoffe recycelt, thermisch verwertet oder kompostiert werden. Der biologische Abbau und die Kompostierbarkeit ist daher nur ein möglicher, aber nicht der ausschließliche, Verwertungsweg von Biokunststoffen. Die Anforderungen und das Prüfschema für die Kompostierbarkeit wird durch die Norm DIN EN 13432 geregelt und bezieht sich auf den Abbau in technischen Kompostierungsanlagen unter definierten physikalischen Bedingungen (Temperatur, Feuchte, etc.) (siehe DIN EN 13432 2000).

2.2.2 Komponenten der Techniklinie Biokunststoffe

Die Herstellung von Biokunststoffen unterscheidet sich insbesondere in der Rohstoffherzeugung deutlich von der petrochemischen Wertschöpfungskette konventioneller Kunststoffe. Abhängig von der Art des Biokunststoffs werden unterschiedliche Agrarrohstoffe (z. B. Zuckerrüben, Getreide) für die Herstellung benötigt, die dann über chemische Grundstoffe (z. B. Zucker) und Zwischenprodukte (z. B. Milchsäure, Stärke) zu Granulaten und Fasern weiterverarbeitet werden. Aus diesen werden die Endprodukte gefertigt (z. B. durch Kunststoffspritzgießen), wobei diese letzten Fertigungsschritte für petrochemische Kunststoffe und Biokunststoffe vergleichbar sind. Biokunststoffe können nach der Gebrauchsphase je nach Material biologisch abgebaut, thermisch verwertet und theoretisch auch recycelt werden. Ein idealisierter Ablauf der Herstellung und Verwertung von Biokunststoffen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 2-1: Vereinfachter Produktions- und Verwertungszyklus von Biokunststoffen



Darstellung in Anlehnung an Kaeb 2006: 19

Das dargestellte System ist aufgrund der in vielen Biokunststoffen enthaltenen Additive und der für die Produktion benötigten Energie und Hilfsstoffe (in der Abbildung nicht dargestellt) nicht geschlossen. Die Energie- und Materialeffizienz von Biokunststoffen über ihren gesamten Lebenszyklus kann daher nur durch ökobilanzielle Betrachtungen im Einzelfall bewertet werden (siehe auch Kap. 2.3).

Wertschöpfungskette von Biokunststoffen und beteiligte Wirtschaftssektoren

Wie bereits in Kap. 2.2.1 dargestellt, kommen für die Herstellung von Biokunststoffen unterschiedliche nachwachsende Rohstoffe zum Einsatz. Die wichtigsten Rohstoffe sind Stärke und Zucker, die beispielsweise aus Kartoffeln, Weizen, Mais, Zuckerrüben, Topinambur u. a. Nutzpflanzen gewonnen werden sowie Cellulose, die meist aus Holz und seltener aus Baumwolle, Abaca, Sisal, Flachs und Hanf hergestellt wird. Die nachfolgende Tabelle enthält einen Überblick über die wichtigsten Rohstoffe, Verfahren und Zwischenprodukte für die Herstellung von Biokunststoffen.

Tabelle 2-3: Wertschöpfungsstufen von Biokunststoffen

Nachwachsender Rohstoff	Verfahren	Chemischer Grundstoff	Zwischenprodukte, Polymere:
Stärke und Zucker	<ul style="list-style-type: none"> • biotechnische Verfahren • thermokatalytische Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Milchsäure • Polyhydroxyalkansäuren • Stärke 	<ul style="list-style-type: none"> • Polylactid • Polyhydroxyalkanoate • Thermoplastische Stärke
Cellulose	<ul style="list-style-type: none"> • thermokatalytische Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • Celluloseester • Celluloseether • Lignin 	<ul style="list-style-type: none"> • Celluloseacetat • Celluloseaceto-propionat • Celluloseacetobutyrat

eigene Darstellung nach Armansperg 2006: 274

Aus Tabelle 2-3 gehen die wesentlichen Produktionsschritte von Biokunststoffen hervor. Während in der Wertschöpfungskette klassischer erdölbasierter Kunststoffe die Mineralölindustrie und die petrochemische Industrie die Zulieferer der Rohstoffe bilden, wird bei Biokunststoffen diese Rolle durch landwirtschaftliche Produzenten und Unternehmen der Chemie und Biotechnologie übernommen. Je nach nachwachsendem Rohstoff und anschließendem Produktionsverfahren, können die Rohstoffe für Biokunststoffe dabei 50 – 70 % des Marktwertes von den Endprodukten ausmachen (siehe auch Kap. 2.4).

Die aus den nachwachsenden Rohstoffen gewonnenen Bestandteile Stärke, Zucker und Cellulose werden mit Hilfe thermokatalytischer Verfahren oder biotechnisch z. B. durch Fermentation zu chemischen Grundstoffen oder Intermediaten umgewandelt. Diese Grundstoffe werden dann in chemischen Betrieben durch Polymerisations- oder Polykondensationsverfahren zu Biopolymeren umgesetzt. Abhängig von den gewünschten spezifischen Eigenschaften des Kunststoffes, werden in diesem Schritt den Biopolymeren variierende Mengen an Additiven aus nachwachsenden oder fossilen Rohstoffen zugemischt.

Die fertigen Biopolymere werden meist in Granulatform an die kunststoffverarbeitende Industrie geliefert und dann durch Tiefzieh-, Extrusions- oder Spritzgussverfahren zu Endprodukten z. B. Kunststoffverpackungen, Spritzgussteilen, etc. weiterverarbeitet. Dabei kommen konventionelle Maschinen der kunststoffverarbeitenden Industrie zum Einsatz, die nach geringen, spezifischen Modifikationen mit den Biopolymeren beschickt werden können (Karus 2003:2). Die Verarbeitung von Biopolymeren ist daher mit der konventioneller, erdölbasierter Kunststoffe vergleichbar.

Ein zentraler Unterschied zu erdölbasierten Kunststoffen besteht dagegen in den Verwertungsmöglichkeiten von Biokunststoffen in der End-of-Life-Phase. Während für konventionelle Kunststoffe grundsätzlich die Möglichkeiten des stofflichen Recyclings, der thermischen Verwertung sowie der Deponierung bestehen, so können Biokunststoffe darüber hinaus durch mikrobiellen Abbau in Kompostierungsanlagen verwertet werden.

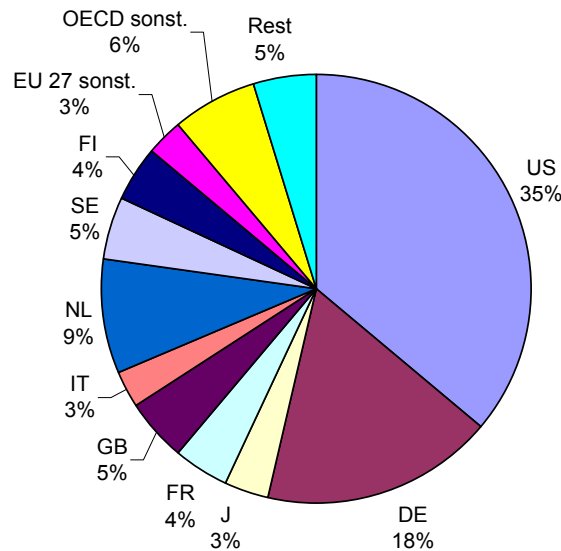
Technologische Entwicklungsdynamik

Die technologische Entwicklungsdynamik der vergangenen Jahre ist im Bereich von Kunststoffmonomeren rückläufig. D. h. es sind wenige Ausgangsmaterialien für Grundstoffe neu entwickelt worden. Anders stellt sich dieses Verhältnis bei den Werkstoffinnovationen dar, die auf Basis bestehender Monomere entstanden sind, beispielsweise durch die Kombination oder Umwandlung von Monomeren. Für sie konnte in den zurückliegenden Jahren eine wachsende Innovationsdynamik verzeichnet werden. Große Fortschritte konnten auch bei der Erhöhung der Ausbeute in klassischen Polymerisationsprozessen der Kunststoffindustrie erzielt werden (siehe Sartorius 2006: 11 oder Geuder 2007: 18).

Eine vergleichbare Entwicklung kann für das Feld der Biokunststoffe verfolgt werden. Die Auswertung der Patentanmeldungen für biotechnisch hergestellte Polymere im Rahmen der Vorstudie zur weißen Biotechnologie hat ergeben, dass diese in den letzten Jahren stagniert und Deutschland mit 10 % den dritten Platz hinter den USA (40 %) und Japan (14 %) einnimmt (Beucker, Fichter, Marscheider-Weidemann 2007: 22). Bei den Stärkepolymeren ist Deutschland mit 18 % zweitgrößter Anmelder nach den USA,

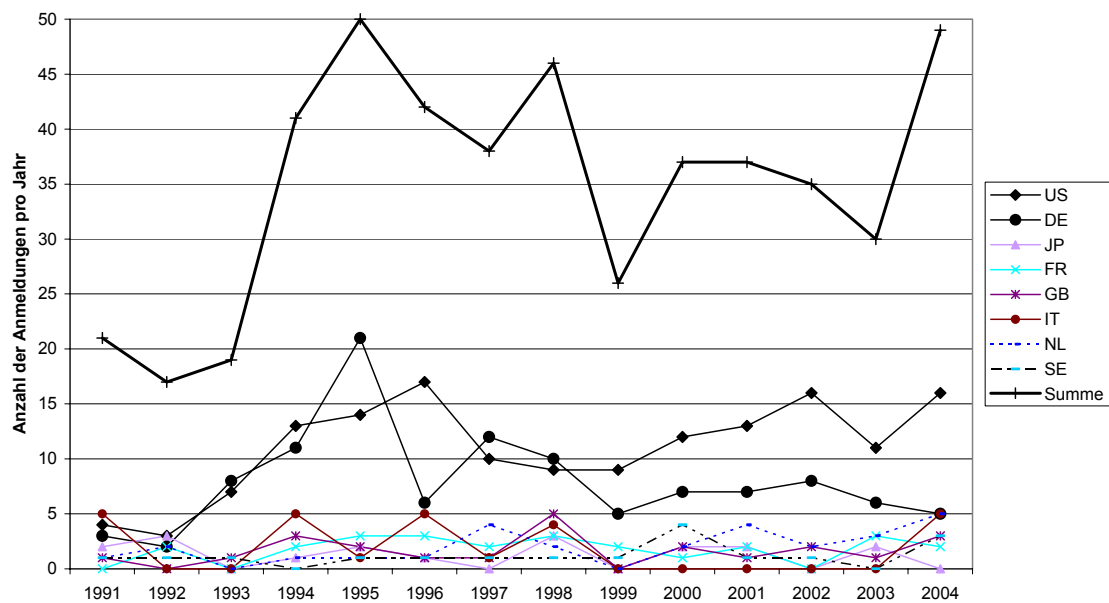
während Japan und die anderen EU-Länder Anteile unter 10 Prozent haben (vergleiche Abbildung 2-2). Die deutschen Anmeldungen gingen in den letzten Jahren zurück; die Summe aller Anmeldungen stieg 2004 noch mal stark an, nachdem sie 1995 einen Höchststand erreicht hatte und danach um die Hälfte abfiel (siehe Abbildung 2-3).

Abbildung 2-2: Patentanmeldung zu Stärkepolymeren 2000 -2004 [n=188]



Darstellung des Fraunhofer ISI

Abbildung 2-3: Entwicklung der Patentanmeldungen zu Stärkepolymeren



Darstellung des Fraunhofer ISI

Da eine Vielzahl von werkstoff- und verfahrenstechnischen Entwicklungen in der Vergangenheit darauf abzielte, die entwickelten Biokunststoffe auf den Einsatz in konventionellen Fertigungsprozessen wie Extrusion und Kunststoffspritzgießen anzupassen (siehe auch Kap. 2.2.1), ist aktuell bzw. zukünftig keine besondere, durch Biokunststoffe ausgelöste Innovationsdynamik im Maschinenbau zu erwarten.

Stark dynamische Entwicklungen könnten sich mit Innovationen im Bereich des Rohstoffaufschlusses ergeben. Die kostengünstige, biotechnologische Verwertung von Lignin und anderen schwer nutzbaren Fraktionen nachwachsender Rohstoffe, könnte nachwachsende Rohstoffe in größerem Umfang für die chemisch-technische Nutzung zur Verfügung stellen (siehe Kap. 2.4). Vergleichbare Impulse könnten von der Entwicklung und Nutzung transgener Pflanzen ausgehen, die wichtige Grundstoffe der chemischen Industrie, wie z. B. Polyhydroxyalkonate (PHA) bereits während der Wachstumsphase bilden (Geuder 2007: 29). Solche Innovationen wären jedoch nicht nur für den Bereich der Biokunststoffe, sondern auch für die gesamte Nutzung nachwachsender Rohstoffe von großer technologischer und marktlicher Relevanz.

Biokunststoffe befinden sich damit, was den Innovationszyklus betrifft, am Übergang zur Diffusion und ihre weitere Entwicklungsdynamik hängt weniger von der technologische Entwicklungsdynamik, als vielmehr von „Economies of Scale“, der Erweiterung des Einsatzspektrums (z. B. in Form von Verbundwerkstoffen), der Entwicklung des relativen Verhältnisses der Kosten fossiler Rohstoffe zu nachwachsender Rohstoffe und rechtlichen Rahmenbedingungen ab (siehe auch Kap. 2.4).

2.3 Nutzen für Umwelt und Gesellschaft

2.3.1 Beitrag zum Umweltschutz

Biokunststoffe können in mehrfacher Hinsicht zur Umweltentlastung beitragen. Die Realisierung dieser Potenziale hängt jedoch vom eingesetzten Rohstoff, dem Fertigungsprozess, der Anwendung sowie den Rahmenbedingungen des Einsatzes ab und ist je nach betrachtetem Indikator nicht widerspruchsfrei. Im Folgenden werden daher mögliche Umweltentlastungspotenziale von Biokunststoffen in einzelnen Wirkungskategorien analysiert:

- **Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz:** Biokunststoffe können einen Beitrag zur Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz leisten, da ihre Hauptbestandteile aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Der Beitrag zur Schonung fossiler Energien hängt jedoch wesentlich vom zukünftigen Anteil der Biokunststoffe am gesamten Kunststoffaufkommen ab (siehe Kap. 2.4). Insbesondere die bio-

technologische Herstellung von Biokunststoffen besitzt das Potenzial, durch den Einsatz neuer Fermentationsverfahren und Katalysatoren, erheblich ressourcen- und energieeffizientere Kunststoffe zu produzieren (Beucker, Fichter, Marscheider-Weidemann 2007: 7). Der aktuelle Rohölverbrauch der europäischen, chemischen Industrie liegt für chemische Grundstoffe bei ca. 7 % und ca. 4 % des europäischen Rohölverbrauchs werden für die Produktion von Kunststoffen verwendet⁶. Das Substitutionspotenzial durch nachwachsende Rohstoffe ist daher begrenzt aber von Bedeutung, da der Kunststoffmarkt ein rasch wachsender ist und das größte Zusatzpotenzial für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe derzeit im Segment der Biokunststoffe realisiert wird (siehe Kap. 2.4).

- Beitrag zum Klimaschutz: Im Gegensatz zu erdölbasierten Rohstoffen sind Biokunststoffe weitgehend CO₂-neutral, da sie nur die Menge CO₂ an die Umwelt abgeben, die durch die nachwachsenden Rohstoffe in ihrer Wachstumsphase aufgenommen wurden. In die Bewertung der Klimarelevanz muss jedoch neben der reinen Rohstoffsubstitution auch der Ressourcen- und Energieaufwand für die Erzeugung und Verarbeitung der Rohstoffe sowie der Additive einbezogen werden. Entscheidend ist zudem auch die Verwertung der Biokunststoffe nach ihrer Nutzungsphase. So kann z. B. eine thermische Verwertung von Biokunststoffen positiv in die Energiebilanz eingehen, da die in ihnen gespeicherte Energie in Form nachwachsender Rohstoffe für die Energieerzeugung genutzt werden kann. Eine erste Abschätzung des Verbandes European Bioplastics im Rahmen des European Climate Change Programs (ECCP) kalkuliert für Biokunststoffe ein primäres CO₂-Einsparungspotenzial von ca. 4 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten. Dieser Angabe liegt die Annahme zugrunde, dass der Markt für Biokunststoffe bis 2010 weltweit eine Größenordnung von ca. einer Million Tonnen erreicht⁷ (siehe auch Kap. 2.4).
- Umweltverschmutzung und Deponieraum: Kunststoffe tragen in vielen Ländern der Welt und insbesondere auch in den Ozeanen zu einer erheblichen Umweltverschmutzung bei. Diese resultiert insbesondere aus der Persistenz, dem schlechten bzw. sehr langsamen Abbau von Kunststoffen, die eine durchschnittliche Lebensdauer von 400 Jahren aufweisen (siehe z. B. Greenpeace 2006). Der Einsatz biologisch leicht abbaubarer Kunststoffe, vor allem für Verpackungen, könnte die genannten Effekte mildern. Biologisch abbaubare Kunststoffe können zudem, wenn

⁶ Alle Angaben siehe Webseite des Verbandes Plastics Europe unter <http://www.plasticseurope.org/content/default.asp?PageID=39> (letzter Abruf März 2007)

⁷ Siehe <http://www.european-bioplastics.org/index.php?id=53> (letzter Abruf März 2007)

sie nicht thermisch verwertet werden, durch ihren Abbau in Kompostierungsanlagen Deponiekapazitäten entlasten (siehe hierzu auch Kap. 2.4).

- Flächenbedarf: Eine verstärkte Nutzung nachwachsender Rohstoffe für Biokunststoffe würde eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion in Deutschland bzw. den Import von Rohstoffen voraussetzen, da bereits heute Nutzungskonkurrenzen für die Verwendung nachwachsender Rohstoffe bestehen (siehe auch Kap. 2.3.2). Dies kann mit ökologischen Problemen einer intensiven landwirtschaftlichen Flächennutzung (z. B. Monokulturen, Überdüngung und Verringerung der Biodiversität) einhergehen. Mittel- bis langfristig könnte dieses Problem durch eine zusätzlich Verwertung von heute nur schwer nutzbaren Bestandteilen nachwachsender Rohstoffe (z. B. Stroh und Grünschnitt) bzw. durch Effizienzsteigerungen in der Nutzung oder durch Importe gelöst werden. Alternativ könnte auch die Produktion von Biokunststoffen aus Abfällen oder Klärschlamm über Biogas (Polyhydroxyalkonate) verstärkt werden (siehe z. B. Meiß, Eisenberg, Gustrau-Wissig 2003).

Die genannten Kategorien verdeutlichen, dass nur eine umfassende Analyse einzelner Biokunststoffe im Sinne eines standardisierten, ökobilanziellen Produktvergleichs nach DIN EN ISO 14040 Auskunft über die zu erwartenden Umwelteffekte geben kann. Erste Analysen von PLA der Unternehmen NatureWorks LLC und Toyota Motor Corporation kommen zu positiven Ergebnissen⁸. Für eine umfassende Bewertung fehlen jedoch Daten und Untersuchungen.

⁸ Siehe hierzu: Detzel, Krüger (2006) und www.toyota.co.jp/en/environmental_rep/03/pdf/E_p23.pdf (letzter Abruf März 2007)

2.3.2 Gesellschaftlicher Nutzen

Die Intensivierung der Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen kann gesellschaftlich gesehen zu einer Stärkung der regionalen, landwirtschaftlichen Produktion und zu einer größeren Versorgungssicherheit und Unabhängigkeit von fossilen Rohstoffen beitragen. Für den Fall einer intensiveren Nutzung nachwachsender Rohstoffe sind jedoch Nutzungskonkurrenzen abzusehen (siehe auch Kap. 2.4). So konkurriert die stoffliche Verwendung der Rohstoffe mit anderen Nutzungen der Rohstoffe, wie z. B. der Erzeugung von Biokraftstoffen und Lebensmitteln⁹ oder auch der Grundstoffproduktion in der chemischen Industrie (z. B. für Oleochemikalien in der Tensidindustrie, siehe Armansperg 2006: 272).

Die Nutzungskonkurrenz und der Flächenbedarf einer umfassenden Nutzung nachwachsender Rohstoffe soll an dem folgenden hypothetischen Beispiel verdeutlicht werden: Bei einem geschätzten Flächenbedarf von einem halben Hektar Ackerland je Tonne Biokunststoffe (Kaeb 2006: 20), müsste die Hälfte der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland (ca. 17 Mio. Hektar¹⁰) mit Rohstoffen für die Herstellung von Biokunststoffen bepflanzt werden, um den Kunststoffbedarf in Deutschland zu decken.

Ein vollständiger Ersatz von petrochemischen Kunststoffen durch Biokunststoffe ist zwar aus ökonomischen und technischen Gründen nicht realistisch, das Beispiel verdeutlicht aber, dass eine umfassende Strategie für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe die gesamte Bandbreite möglicher stofflicher und energetischer Nutzungen und ihren jeweiligen wirtschaftlichen Beitrag sowie ihr ökologisches Entlastungspotenzial berücksichtigen muss.

Entscheidend für eine intensivere Nutzung von Biomasse ist zudem, dass bisher nicht oder nur schwer verwertbare Fraktionen der Biomasse, wie z. B. Stroh und landwirtschaftliche Abfälle durch neue Verfahren für die Nutzung erschlossen werden (FORASSET 2006). Viel versprechend ist auch der Ansatz von Bioraffinerien, der von einem integrativen Gesamtkonzept für die biochemische und thermochemische Konversion von nachwachsenden Rohstoffen zu Chemikalien, Werkstoffen sowie Brenn- und Kraftstoffen ausgeht. In Bioraffinerien soll die Biomasse möglichst umfassend ge-

⁹ Aktuelle Beispiele für die Nutzungskonkurrenz um nachwachsende Rohstoffe gibt es bereits zahlreiche. Siehe hierzu z. B. den Artikel „Fahren statt essen“ aus der Süddeutschen Zeitung vom 23. Januar 2007, der über die steigenden Maispreise in Mexiko aufgrund der US-amerikanischen Produktion von Biosprit berichtet.

¹⁰ Siehe aktuelle Informationen des Statistischen Bundesamtes unter <http://www.destatis.de/basis/d/forst/forsttab2.php> (letzter Abruf März 2007)

nutzt und dadurch die Stoff- und Energieeffizienz erheblich gesteigert werden (Beucker, Fichter, Marscheider-Weidemann 2007: 32).

2.4 Wirtschaftliche Potenziale

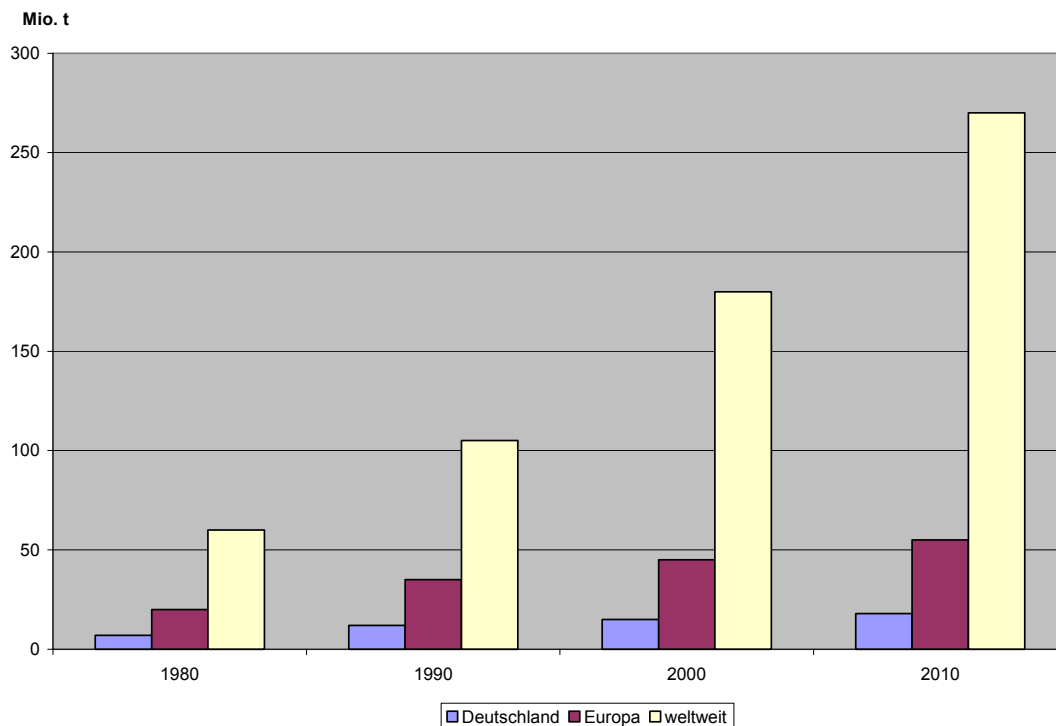
2.4.1 Marktpotenzial – aktuell und Perspektive 2020

Der Verbrauch von Kunststoffen ist in den zurückliegenden Jahren stark angestiegen. Nach Angaben des deutschen Verbandes der Kunststoffherstellenden Industrie lag der weltweite Verbrauch von Kunststoffen im Jahr 2004 bei ca. 220 Millionen Tonnen. Davon wurden 7,8 % bzw. rund 18 Mio. Tonnen in Deutschland produziert, der Umsatz der kunststoffherstellenden Industrie lag bei rund 21 Mrd. Euro. 23,6 % der weltweit produzierten Kunststoffe kamen aus Westeuropa¹¹.

Nach einer aktuellen Prognose wird der weltweite Kunststoffverbrauch bis zum Jahr 2010 auf rund 270 Mio. Tonnen steigen (siehe Abbildung 2-4). Dies entspricht einer jährlichen Wachstumsrate von 4,5 %. Die wichtigsten Wachstumsmärkte werden in Osteuropa und Südostasien gesehen. Da rund 70 % des in Deutschland produzierten Kunststoffes exportiert werden, stellen diese Regionen auch einen wichtigen Wachstumsmarkt für die deutsche Kunststoffindustrie dar (Simon 2004: 2).

¹¹ Siehe Information des Verbandes Kunststoffherstellenden Industrie (VKE) unter <http://www.vke.de/de/markt/> (letzter Abruf März 2007)

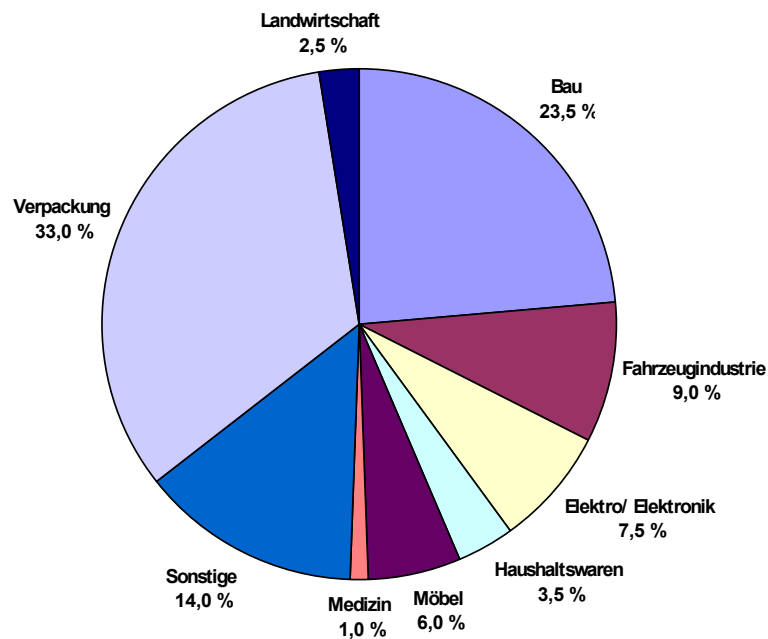
Abbildung 2-4: Entwicklung und Prognose des weltweiten Kunststoffverbrauchs bis 2010



Darstellung nach Daten der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe und des Verbandes der Kunststoffherstellenden Industrie, Stand März 2007

Bis zum Jahr 2020, so eine Schätzung, könnten sich Produktion und Umsatz von Kunststoffen bezogen auf das Jahr 2006 verdreifachen (IHK Bonn 2006: 3). Die größten spezifischen Einsatzfelder von Kunststoffen liegen in Deutschland im Bereich der Verpackungen (33 %), in der Bauwirtschaft (23,5 %), im Fahrzeugbau (9 %) sowie in der Elektronik (7,5 %) (siehe Abbildung 2-5). Vergleichbare Relationen ergeben sich für den Kunststoffverbrauch in Westeuropa (siehe z. B. Armansperg 2006: 296).

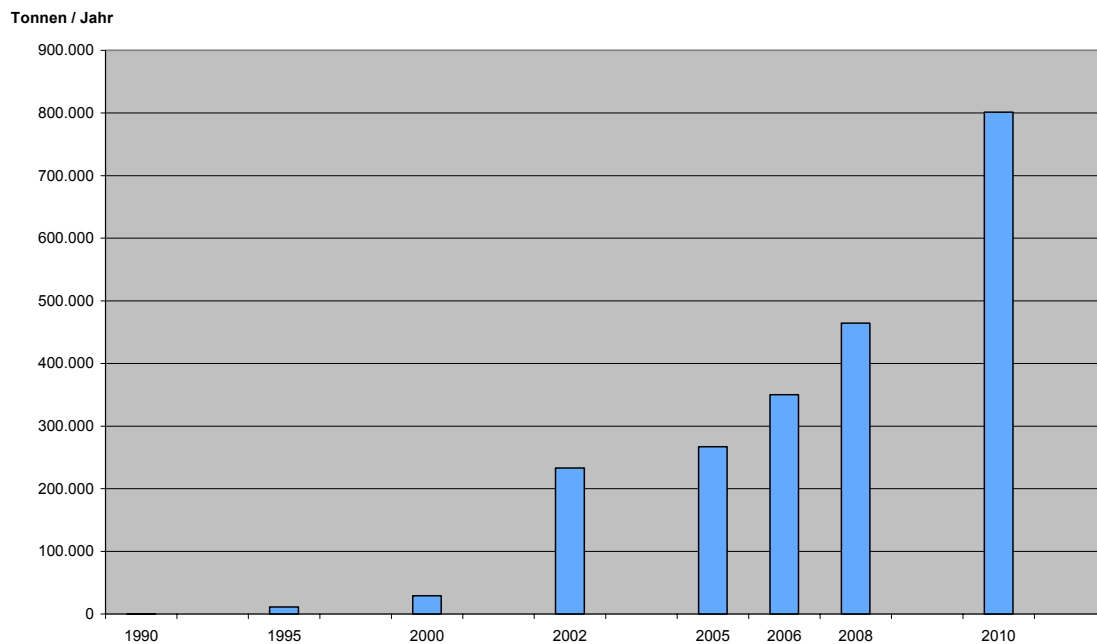
Abbildung 2-5: Einsatzgebiete von Kunststoffen in Deutschland



Darstellung nach Daten des Verbands der Kunststoffherzeugenden Industrie, Stand März 2007

Die weltweite Produktionskapazität für Biokunststoffe ist, gemessen an der petrochemischer Kunststoffe, zurzeit relativ klein. Sie betrug im Jahr 2006 mit ca. 350.000 Tonnen rund 0,2 Prozent der weltweiten Produktionskapazität, verzeichnet jedoch mit einem durchschnittlichen, jährlichen Marktwachstum von bis zu 30 % einen starken und raschen Anstieg. Bis zum Jahr 2008 sind weltweit zusätzliche Produktionskapazitäten von ca. 400.000 Tonnen geplant (siehe Abbildung 2-6 und Kaeb 2006: 21).

Abbildung 2-6: Prognostizierte Produktionskapazitäten für Biokunststoffe



modifiziert nach Kaeb 2006: 22

Der Verband European Bioplastics und Experten¹² der Branche schätzen das jährliche Produktionspotenzial für Biokunststoffe bis zum Jahr 2020 auf ca. 3 Mio. Tonnen. Dies würde rund einem Prozent des Kunststoffweltmarkts entsprechen. Nach einer Schätzung von Kaeb (2006: 5) könnten 20 % davon in Deutschland produziert werden.

Müssig und Carus (2007: 103) differenzieren in einer aktuellen Studie der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe das Wachstumspotenzial von Biokunststoffen nach Segmenten mit hohem Marktpotenzial. Nach ihrer Prognose sind bis zum Jahr 2020 im Bereich der Verpackungen (bis zu 520.000 Tonnen), der dauerhaften Produkte und Konsumgüter (bis zu 290.000 Tonnen) und in der Automobilindustrie (bis zu 230.000 Tonnen) die größten Wachstumsraten für Biokunststoffe erzielbar, wobei die größten Zuwächse im Bereich der Konsumgüter und der Automobilindustrie erwartet werden.

Nach den Ergebnissen einer Unternehmensbefragung durch Roland Berger Strategy Consultants¹³ schätzen die Unternehmen der Branche das Weltmarktvolumen für Bio-

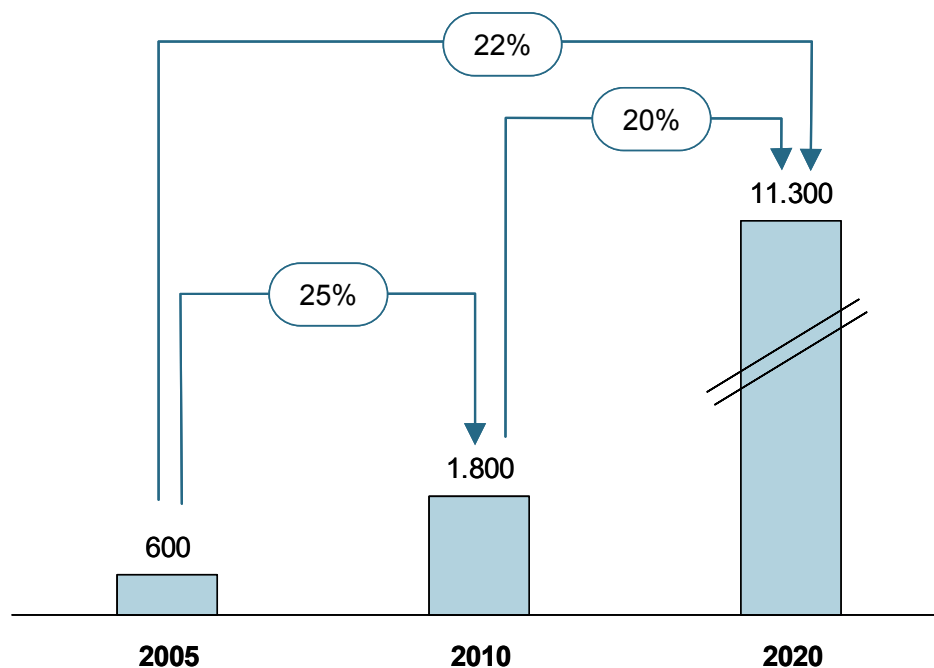
¹² Die Schätzung wurde mit Experten aus Industrie und Forschung in telefonischen Interviews abgeglichen.

¹³ Die im Folgenden gemachten Angaben entstammen einer qualitativen Befragung von Unternehmen und zentralen Akteuren aus dem Bereich der Biokunststoffe (direkte Information von Roland Berger Strategy Consultants ohne Quellenangabe).

kunststoffe im Jahr 2005 im Mittel auf etwa 600 Millionen Euro. Ausgehend von der noch geringen Größe des Biokunststoffmarktes und der hohen Nachfrage rechnen die befragten Experten bis 2010 mit jährlichen Wachstumsraten von im Mittel 25 Prozent. Zusätzlich zur Erschließung neuer Anwendungsbereiche (z. B. kompostierbare Mulchfolien) könnten mit den heute verfügbaren Biokunststoffen bereits 5 Prozent der konventionellen Kunststoffe ersetzt werden. Längerfristig wird dieses Potenzial durch neue Werkstoffe und die verstärkte Nutzung nachwachsender Rohstoffe deutlich höher eingeschätzt.

Auch über das Jahr 2015 hinaus wird es nach Ansicht der Unternehmen ein Wachstum von jährlich knapp über 20 Prozent geben. Diese Entwicklung ist nach Aussagen der Unternehmen durch die absehbaren Investitionen in größere Anlagen zur Produktionssteigerung möglich. Für die in Abbildung 2-7 dargestellte Marktprojektion bis 2020 wurde aufgrund der hohen Unsicherheit bezüglich der langfristigen Marktentwicklungen (Investitionssicherheit etc.) ein Wachstumsszenario am unteren Ende der Unternehmenseinschätzung zugrunde gelegt.

Abbildung 2-7: Projektion des weltweiten Marktvolumens bis 2020 [in Mio. EUR]



Darstellung von Roland Berger Strategy Consultants

Wie bereits in Kap. 2.2.2 erläutert, hängt die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit von Biokunststoffen in erheblichem Maße von dem Verhältnis des Rohölpreises zu dem nachwachsender Rohstoffe und deren Intermediate ab. Unter den aktuellen Rahmenbedingungen eines steigenden Ölpreises nähert sich der Preis für Biokunststoffe be-

reits denen konventioneller Kunststoffe an (siehe Kaeb 2006: 23). Ein aktueller Preisvergleich der Polymere PLA (ca. 1,40 Euro/kg) und Polypropylen (ca. 1,10 Euro/kg) zeigt, dass diese stark annähern (Müssig, Carus 2007: 16).

Eine weitere Voraussetzung für das Erreichen größerer Marktvolumina liegt in der Schaffung entsprechend großer und konkurrenzfähiger Produktionskapazitäten und Absatzmengen („Economies-of-Scale“), die von einer Reihe US-amerikanischer und japanischer Unternehmen bereits mehrfach angekündigt wurden. Die Firmen Toyota und Mazda haben für die Jahre 2007 und 2008 eine Ausweitung bzw. den Einstieg in die Massenproduktion von PLA-Kunststoffen angekündigt (siehe z. B. Toyota 2006 und Mazda 2006). Neben Toyota, die bereits PLA-Komponenten und PLA-Naturfaser-Compounds in einigen Fahrzeugmodellen verwenden, wollen auch erste Elektronikunternehmen wie z. B. Motorola und NEC, Biokunststoffe in ihren Produkten einsetzen (Armansperg 2006: 295). Ein solcher Einsatz von höherwertigen Biokunststoffen und Verbundwerkstoffen könnte damit auch der Anwendung in großvolumigen Massenmärkten dauerhafter Produkte den Weg ebnen.

In einigen Feldern, wie z. B. Verpackungen, Landwirtschaft, Medizin und Spielwaren, haben sich Biokunststoffe bereits heute als alternative Nischenanwendungen etabliert (Armansperg 2006: 295). Dies liegt auch an ihren spezifischen Eigenschaften wie z. B. Abbaubarkeit, gute Bedruckbarkeit und Durchlässigkeit für Wasserdampf, die sie für diese Anwendungen geeignet machen.

Den entscheidenden Vorteil niedrigerer potenzieller Entsorgungskosten können die meisten Biokunststoffe derzeit noch nicht ausspielen. Nach der aktuellen Bioabfall- und Düngemittelverordnung sind als Inputstoffe nur solche Materialien zugelassen, die zu 100 % aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Da die meisten Biopolymere aus technischen Gründen abbaubare, petrochemische Additive enthalten, sind sie von der Sammlung ausgeschlossen (Kaeb 2006:10). Eine Novellierung der Verordnungen könnte den Biokunststoffen einen Vorteil bei den Entsorgungskosten verschaffen.

2.4.2 Verfügbarkeit von Rohstoffen

Zu den wichtigsten Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Biokunststoffen zählen die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnenen Stoffe Zucker, Stärke und Cellulose (siehe Kap. 2.2.2). Diese werden sowohl durch inländische als auch durch ausländische Agrarproduzenten zur Verfügung gestellt. Da eine qualitative und mengenmäßige Versorgung mit nachwachsenden Rohstoffen eine zentrale Voraussetzung für den Ausbau der Produktion und der Vermarktung von Biokunststoffen ist, soll die Verfüg-

barkeit der für ihre Produktion wichtigen Rohstoffe kurz betrachtet werden (alle Daten siehe Armansperg 2006: 269 f).

- Zucker: Der Verbrauch von Zucker ist in der chemischen Industrie in den letzten Jahren deutlich, von 50.000 t im Jahr 1997 auf 240.000 t im Jahr 2004, angestiegen. Für diesen Anstieg ist insbesondere der starke Zuwachs der fermentativen Verfahren in der weißen Biotechnologie verantwortlich. Die Nutzung von Zucker für die Herstellung von Biokunststoffen steht damit in direkter Konkurrenz zu anderen Verfahren und Produkten der weißen Biotechnologie. Der in der chemischen Industrie verwendete Zucker wird zu ca. 95 % aus heimischen Zuckerrüben gewonnen, die verbleibenden 5 % stammen meist aus ausländischem Rohrzucker. Um die hohen Produktionskosten der heimischen Zuckerproduzenten wettbewerbsfähig zu halten, wird durch die EU-Zuckermarktverordnung eine Produktionserstattung gewährt, die den Preis auf das Weltmarktniveau von ca. 200 Euro pro Tonne halbiert. Über die Produkte der chemischen Industrie gemittelt, beträgt der Zuckerpreis ca. 50 - 70 % des Marktwertes von den Endprodukten. Für die Produktion von Biokunststoffen folgt daraus, dass bei einer Steigerung der Produktionskapazitäten bei gleichzeitigem Ausbau der Verfahren der weißen Biotechnologie deutlich größere Flächen der heimischen Landwirtschaft für die Zuckerproduktion genutzt oder auf dem Weltmarkt größere Zuckermengen zugekauft werden müssten. Dies wiederum würde den Abbau von Handelsbeschränkungen und Zöllen voraussetzen¹⁴.
- Stärke: In Deutschland werden durch die chemische Industrie rund 640.000 Tonnen Stärke verbraucht. Der größte Anteil der Stärke wird von der Papier- und Zellstoffindustrie als Bindemittel benötigt. Die wichtigsten Pflanzen für die Stärkegewinnung sind Kartoffeln (43 %), Weizen (32 %) und Mais (25 %). Für den Stärkemarkt wird in den kommenden Jahren mit einem leichten Wachstum von 2 - 3 % gerechnet. Der Stärkebedarf kann bisher gut durch heimische Produzenten gedeckt werden, wobei in Zukunft vor allem die Gewinnung aus Weizen an Bedeutung gewinnen wird (Armansperg 2006: 298 f).
- Cellulose: Für chemisch-technische Anwendungen wird sogenannte Chemiecellulose hoher Reinheit benötigt. Der Bedarf der deutschen Industrie an Chemiecellulose beträgt derzeit rund 320.000 Tonnen pro Jahr. Cellulose wird in erster Linie für die Herstellung von verschiedenen Fasern und Filmen verwendet. Darüber hinaus werden Cellulosederivate als Bauhilfsstoffe in Putz, Mörteln und Fliesenklebern

¹⁴ Mit einem Abbau von Schutzzöllen für sensible Agrargüter ist erst ab 2009 zu rechnen, siehe <http://www.weed-online.org/publikationen/online/18601.html> (letzter Abruf März 2007).

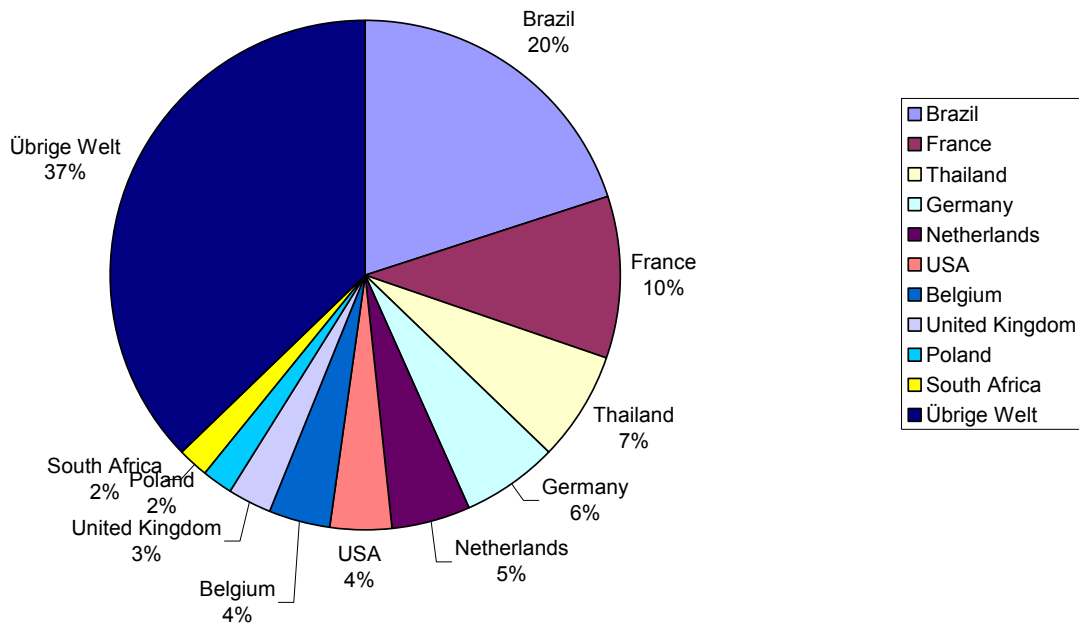
eingesetzt. Die in Deutschland verwendete Chemiecellulose wird fast vollständig importiert. Sie wird im Erzeugerland aus Nadel- und Laubhölzern sowie Baumwolle gewonnen, die aus Nord- und Südamerika, Südafrika, Skandinavien und anderen europäischen Staaten stammen. Der Markt für Chemiecellulose wächst mit ca. 2 - 3 % pro Jahr und der Preis je Tonne Chemiecellulose wird mit 700 - 1.000 Euro angegeben.

Die Darstellung der wichtigsten Rohstoffe für Biokunststoffe verdeutlicht, dass mit der Ausweitung zukünftiger Produktionskapazitäten auch die entsprechende Produktion nachwachsender Rohstoffe, wie im Falle des Zuckers, gesteigert bzw. für die Cellulose geschaffen oder auf Importe zurückgegriffen werden muss. Speziell im Fall des Zuckers können sich durch konkurrierende Nutzungen des Rohstoffes Engpässe ergeben, die kurzfristig nur durch Importe überwunden werden können.

2.4.3 Identifikation und Charakterisierung wichtiger aktueller und zukünftiger Zielländer

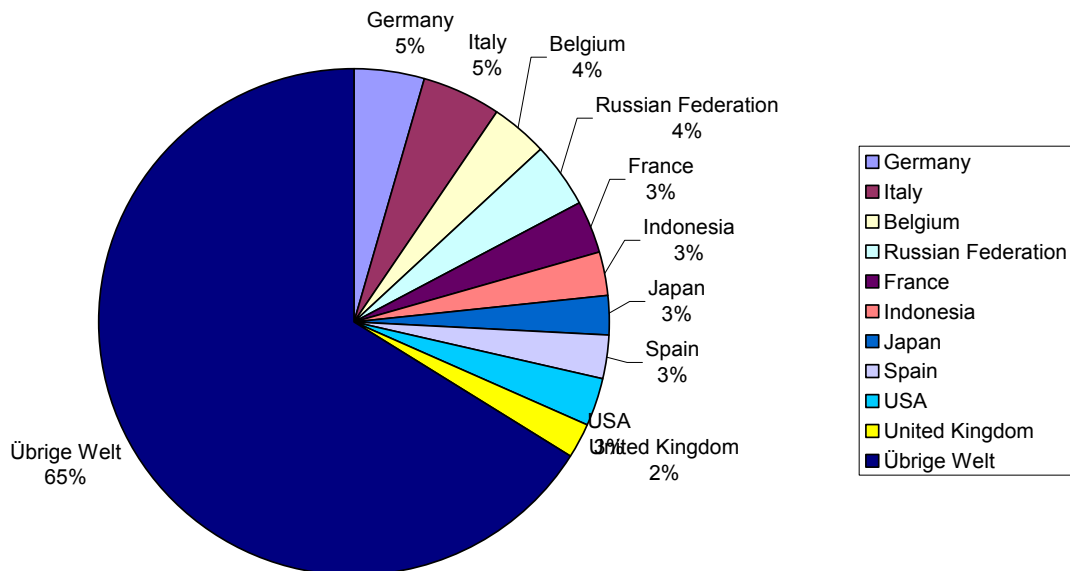
Betrachtet man den Welthandel von Zuckern und Stärken, die zurzeit als Hauptrohstoffe für Biopolymere eingesetzt werden, sieht man, dass Brasilien mit 20 % der Hauptexporteur ist, gefolgt von Frankreich (10 %) und Thailand (7 %) (vgl. Abbildung 2-8). Deutschland hält mit 6 % den vierten Platz. Zucker und Stärke werden weltweit gehandelt, bei den Importländern ist keine große Konzentration zu erkennen. Die größten Importeure sind Deutschland und Italien mit jeweils 5 % (Abbildung 2-9). Die Exporteure der Grundstoffe haben eine gute Voraussetzung, in die Produktion von Biopolymeren einzusteigen.

Abbildung 2-8: Exporte von Biorohstoffen



Darstellung des Fraunhofer ISI

Abbildung 2-9: Importe von Biorohstoffen

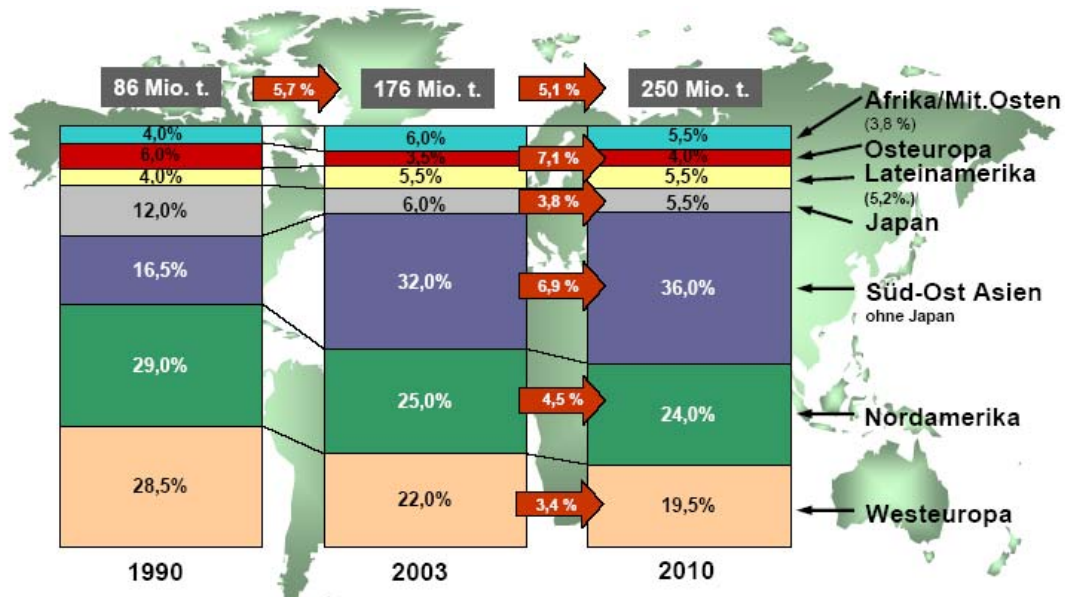


Darstellung des Fraunhofer ISI

Andere Zielländer sind Länder mit großer kunststofferzeugender Industrie und hohem Kunststoffverbrauch, in denen schon heute Absatzmärkte für petrochemische Kunststoffe vorliegen, die durch Biopolymere substituiert werden können. In einer Über-

gangsperiode werden, neben dem Ersatz vorhandener Kapazitäten zur Produktion petrochemisch-stämmiger Kunststoffe, auch zusätzliche Kapazitäten zur Herstellung von Biopolymeren aufgebaut, so dass Regionen mit besonders hohen Zuwachsraten, wie Osteuropa oder Süd-Ost-Asien, von Interesse sind (vgl. Abbildung 2-10).

Abbildung 2-10: Verbrauch von Kunststoffen nach Verbrauchsregionen und Wachstum in % p.a.



VKE 2004

3 Leistungsfähigkeit der wichtigsten Länder in der betrachteten Techniklinie

Der Markt der Biokunststoffe ist wie die Kap. 2.4 und 4.1 zeigen, ein überschaubares Segment, das im Bereich der thermoplastischen Stärken stark von europäischen und im Bereich der Polylactide von US-amerikanischen und japanischen Unternehmen dominiert wird.

Nach den Ergebnissen einer Unternehmensbefragung von Roland Berger Strategy Consultants¹⁵, die diese Einschätzung bestätigt, wird sich bei einem wachsenden Biokunststoffmarkt bis zum Jahr 2020 der relative Marktanteil der europäischen Unternehmen eher verringern, da bereits heute im Bereich der Polylactide US-amerikanische Unternehmen sehr präsent sind. Großes Konkurrenzpotenzial sehen die Unternehmen auch in asiatischen Herstellern, die aufgrund geringerer Produktionskosten rasch mit kostengünstigen Produkten auf den Markt kommen könnten.

Vor dem Hintergrund der Patentanalyse (siehe Kap. 2.2.2) kann die Einschätzung der Unternehmen leicht relativiert werden. Zwar besitzen die USA und Japan eine starke Ausgangsposition im Bereich der PLA-Kunststoffe, Deutschland nimmt jedoch in dem hierfür wichtigen Segment der biotechnologischen Patente den dritten Platz ein. Zudem muss für die in der Literatur angegebenen Produktionskapazitäten der Polylactide anmerkt werden, dass die realen Produktionsmengen laut Expertenmeinungen weitaus niedriger liegen und in Deutschland und Europa mit dem Aufbau erster kleiner Kapazitäten begonnen werden soll (siehe Kap. 4.1.3). Das tatsächliche Konkurrenzpotenzial asiatischer und insbesondere chinesischer Hersteller ist aufgrund fehlender verlässlicher Daten aktuell schwierig zu bewerten und würde eine genauere Analyse erfordern.

¹⁵ Die im Folgenden gemachten Angaben entstammen einer qualitativen Befragung von Unternehmen und zentralen Akteuren aus dem Bereich der Biokunststoffe (Information von Roland Berger Strategy Consultants ohne Quellenangabe).

4 Innovationssystem und marktführende Unternehmen in den führenden Ländern

4.1 Akteursanalyse

4.1.1 Zentrale Akteure (Unternehmen/Zulieferer/Hersteller)

In Kap. 2.2.2 wurde die grundlegende Wertschöpfungskette für Biokunststoffe bereits geschildert. Die Rohstoffe für die Herstellung von Biokunststoffen in Form von Zucker, Stärke, Zellulose, u. a. werden durch Land- und Forstwirtschaft zur Verfügung gestellt (z. B. Südzucker in Deutschland oder Cargill in den USA). Produziert werden die unterschiedlichen Biokunststoffe in erster Linie von Herstellern in den USA, Japan und der EU. Der Markt für Biokunststoffe wird dabei im Wesentlichen von den drei Werkstoffen: thermoplastische Stärken und Stärkewerkstoffe, Polylactide (PLA) und Cellulosewerkstoffe dominiert. Als Erfolg versprechende weitere Materialien gelten Polyhydroxyalkanoate. Einen Überblick über bekannte Biokunststoffe, ihre Hersteller sowie deren Produktionskapazitäten¹⁶ gibt die folgende Tabelle:

¹⁶ Bei den dargestellten Produktionskapazitäten handelt es sich um die von den Produzenten angegebenen Kapazitäten ihrer Anlagen. Die tatsächlich produzierte Menge kann z.T. auch deutlich unter der Kapazität liegen. Fehlen Zahlen so sind die produzierten sehr gering oder es konnte keine verlässliche Angabe recherchiert werden.

Tabelle 4-1: Überblick über Biokunststoffe und ihre Hersteller¹⁷

Material	Hersteller (Handelsname)	Produktionskapazität [t/a]
I Thermoplastische Stärke, Stärkewerkstoffe, Blends	Novamont, Italien (MaterBi)	35.000
	Rodenburg Biopolymers, Niederlande (Solanyl)	40.000
	BIOP, Deutschland (BIOPAR)	10.000
	Biotec, Deutschland (Bioplast)	10.000
	Weitere Hersteller: - Stanelco, UK (Starpol) - Corn Starch, Japan (Cornpol)	
II Polylactide (PLA)	NatureWorks, USA (NatureWorks)	140.000
	Toyota, Japan (Eco Plastic)	5.000
	Hycail, Niederlande (Hycail)	1.000
	Weitere Hersteller: - FKUR, Deutschland (Bio-Flex) - Purac, Niederlande (Purac) - Neste, Finnland (Neste) - Mitsui, Japan (Lacea)	
III Cellulose(-acetate)	Eastman, Japan (Tenite)	15.000
	FKUR, Deutschland (Biograde)	3.500
	Weitere Hersteller: - Tate & Lyle, Dupont (UK) - Albis Plastic, Deutschland (Cellidor) - Mazzuchelli, Italien (Bioceta) - Austel, Österreich (Fasal)	
IV Polyhydroxyalkanoate (PHA) inklusive PHB und PHBH	Procter & Gamble, USA und Kaneka, Japan (Nodax)	250
	Weitere Hersteller: - Biomer, Deutschland (Biomer) - Metabolix, USA (u. a. Biopol) - Mitsubishi, Japan (Biogreen)	

¹⁷ Daten aus IPTS (2005: 35 f), Armansperg (2006), Geuder (2007) bzw. von European Bioplastics, siehe: <http://www.european-bioplastics.org> (letzter Abruf April 2007)

Aus Tabelle 4-1 wird deutlich, dass sich die Schwerpunkte der Biokunststoffproduktion auf Europa (Thermoplastische und Stärke, Stärkewerkstoffe) und USA/Asien (Polylactide) verteilen. Theoretisch bestehen im Bereich der Polylactide die größeren Produktionskapazitäten. Aus den Experteninterviews wurde jedoch deutlich, dass die genannten Kapazitäten bislang nicht voll realisiert werden. Detailliertere Daten liegen derzeit nicht vor. Ein Grund für den starken Ausbau der Produktionskapazitäten kann in den spezifischen und hochwertigen Eigenschaften von PLA gesehen werden, die es zu einem Alternativwerkstoff für Polyethylen und Polypropylen machen und damit neue Anwendungsfelder, wie z. B. die Automobil- und die Elektronikindustrie für Biokunststoffe eröffnen (FORASSET 2006: 9). Im Folgenden werden einige zentrale Hersteller von Biokunststoffen und ihre geplanten Produktionskapazitäten vorgestellt.

4.1.2 Akteure Thermoplastische Stärke, Stärkewerkstoffe

Novamont: Novamont ist Teil des italienischen Chemieunternehmens Montedison und Marktführer im Bereich der thermoplastischen Stärke, Stärkewerkstoffe und Stärkeblends. Novamont hält mehr als 50 Patente zu Werkstoffen und Anwendungen im Bereich der thermoplastischen Stärke. Bis vor einigen Jahren war Novamont weltweiter Marktführer für Biokunststoffe. Heute teilt es sich diese Position mit dem niederländischen Konkurrenten Rodenburg. Bezogen auf den europäischen Markt ist Novamont noch immer einer der zentralen Akteure.

Rodenburg: Rodenburg Biopolymers aus den Niederlanden ist in den letzten Jahren mit 40.000 Tonnen Jahreskapazität zum größten Hersteller von Stärkepolymeren aufgeschlossen. Das Unternehmen nutzt teilfermentierte Kartoffelstärke für die Produktion seiner Polymere und kann diese zu wettbewerbsfähigen Preisen von ca. 1 Euro/kg anbieten. Die Mehrzahl der Anwendungen stellen, wie auch beim Konkurrenten Novamont, Blends mit synthetischen Kunststoffen dar (IPTS 2005: 46).

BIOP: BIOP Biopolymer Technologies ist ein deutscher Hersteller von Polymeren auf Basis von Kartoffelstärke (BIOPAR). Die Produktionskapazitäten betragen nach eigenen Angaben 9.000 Tonnen pro Jahr und sollen dieses Jahr auf 17.000 Tonnen gesteigert werden. In den nächsten Jahren möchte BIOP seine Produktionskapazitäten auf ca. 100.000 Jahrestonnen erhöhen.

Biotec: Biotec ist ein deutsches Unternehmen, das mit mehreren Biokunststoffen im Markt vertreten sein möchte bzw. in diesen eintreten möchte. Das Unternehmen hält eine Reihe von Patenten zu thermoplastischen Stärken und besitzt derzeit eine Produktionskapazität von ca. 10.000 Tonnen pro Jahr.

4.1.3 Akteure Polylactide

Nature Works: Zu den größten Anbietern von Biokunststoffen und Polylactiden gehört Nature Works mit Produktionskapazitäten von rund 140.000 Tonnen PLA. Nature Works hat im Jahr 2002 mit der Errichtung einer großen Anlage für die biotechnologische Milchsäureproduktion mit einer Jahreskapazität von rund 180.000 Tonnen begonnen. Dadurch integriert das Unternehmen in der Zukunft mehrere Wertschöpfungsstufen und möchte damit die Produktionskosten für PLA deutlich senken. Nature Works kann nach eigenen Angaben und in Abhängigkeit von der Marktentwicklung die Produktionskapazitäten für PLA bis zu 500.000 Tonnen im Jahr 2010 steigern (IPTS 2005: 60) und hat bis zum Jahr 2003 450 Mio. USD in die Forschung und Entwicklung von PLA investiert. Das Unternehmen hat zudem eine Reihe von Patenten angemeldet (ca. 25), die sich auf die Produktion und Anwendung von PLA beziehen (FORASSET 2006: 12).

Toyota: Toyota betreibt seit 2005 eine eigene Anlage für die Produktion von PLA im Maßstab von ca. 5.000 Tonnen und setzt den Kunststoff bereits in ersten Automobilmodellreihen ein. Toyota plant darüber hinaus, seinen PLA-Kunststoff unter dem Namen Eco Plastic für eine Vielzahl weiterer Anwendungen wie z. B. Fasern für Kleidung, Gebrauchsgegenstände, etc. zu vermarkten (Toyota 2006: 39). Nach anderen Quellen hat Toyota angekündigt, im Jahr 2020 ca. 66 % des Weltmarktbedarfs an Biokunststoffen durch die Ausweitung der eigenen Polylactidproduktion abzudecken. Das Unternehmen geht davon aus, dass im Jahr 2020 der Anteil von Biokunststoffen an der Weltkunststoffproduktion bei ca. 20 % liegen wird (DECHEMA 2004, 36). Tritt diese Prognose ein, so würde Toyota zu einem zentralen Produzenten von Biokunststoffen werden und damit auch seine Unternehmensstrategie maßgeblich verändern.

Hycail: Hycail ist ein in den Niederlanden ansässiges Unternehmen, das in kleinen Mengen PLA mit dem Produktnamen Hycail produziert. Eine Ausweitung der Produktionskapazitäten auf 25.000 – 150.000 Tonnen pro Jahr ist geplant. Hycail hat zudem Interesse bekundet, in die Produktion naturfaserverstärkter Biokunststoffe einzusteigen.

Biomer und **FkuR** sind deutsche Unternehmen, die kleine Mengen Kunststoffe aus PLA fertigen. Belastbare Angaben über Produktionskapazitäten liegen nicht vor.

Die aktuellen und geplanten Produktionskapazitäten der zentralen Hersteller von Biokunststoffen decken sich in Summe mit den Ergebnissen der Patentauswertung (siehe Kap. 2.2.2 und 2.4). Die USA und Japan verfügen über große und rasch ausbaubare Produktionskapazitäten vor allem im Bereich der vielseitig verwendbaren PLA-Kunststoffe. Europäische Länder wie die Niederlande, Italien und Deutschland verfü-

gen über ernstzunehmende Produktionskapazitäten im Bereich der Stärkewerkstoffe, haben jedoch noch keine konkurrenzfähigen Produktionskapazitäten im Bereich der PLA-Kunststoffe aufgebaut.

Neben den beschriebenen Aktivitäten japanischer Hersteller wie Toyota und Mazda, die den Einstieg in oder den Ausbau von eigenen Produktionsstätten für Biokunststoffe angekündigt haben, werden insbesondere auch in China größere Produktionskapazitäten erwartet. Unternehmen wie Tianan Biologic Material, Lianyi Biotech, u. a. verfügten im Jahr 2005 über geschätzte 100.000 Tonnen Produktionskapazitäten für PLA-Kunststoffe (Chen 2005: 25) und könnten damit zukünftig ein ernstzunehmendes Konkurrenzpotenzial darstellen.

Die Aufstellung der Biokunststoffunternehmen zeigt, dass es sich um eine Vielzahl von Einzelunternehmen handelt und sowohl etablierte Chemieunternehmen, die ihr bestehendes Produktsortiment um Biokunststoffe erweitern, als auch um kleinere eigenständige Unternehmen vertreten sind, die mit eigenen Produktlinien antreten. Obwohl der Markt der Biokunststoffe durch eine starke Segmentierung gekennzeichnet ist, lässt sich doch bei den größeren Herstellern (Nature Works, Tate & Lyle, etc.) eine Tendenz zur Integration von Wertschöpfungsstufen feststellen (Geuder 2007: 34).

4.2 Orientierungsgebende Länder

Im Folgenden sollen Entwicklungen und Regulierungsinitiativen aus europäischen und nichteuropäischen Staaten vorgestellt werden, die für den Einsatz und die Förderung von Biokunststoffen in Deutschland von Relevanz sein können.

Japan: Japan verfügt seit 1991 über das "Law for Promotion of Effective Use of Resources", das auch Regelungen zum Recycling enthält. Prinzipiell gilt darin, dass Endkonsumenten die Recyclinggebühr eines Produkts bezahlen. Bei einigen Produkten ist diese Gebühr beim Erwerb eingepreist, bei anderen wird sie extra erhoben. Letzteres wird beispielsweise bei Automobilen seit 2005 umgesetzt und soll ab 2007 auch für Kunststoff- und Papiereinkaufsstüten bei Einzelhändlern gelten. Diese gesetzliche Regelung ist Motivation für japanische Unternehmen aus der Elektronik- und Automobilindustrie, sich verstärkt der Forschung und dem Einsatz von Biokunststoffen zu widmen.

Im Jahr 2007 soll auch das "Containers and Packaging Recycling Law" erweitert werden. In ihm soll eine noch feinere Trennung von Kunststoffabfällen erfolgen und auf der

Packung deklariert werden, ob sich der Kunststoff dazu eignet, in neuen Produkten wieder verwendet, verbrannt oder entsorgt zu werden¹⁸.

Frankreich: In Frankreich trat mit dem Jahr 2006 ein Gesetz in Kraft, dass die französische Landwirtschaft und den Anbau nachwachsender Rohstoffe fördert und in diesem Rahmen die biologische Abbaubarkeit von Einwegtragetaschen bis zum Jahr 2010 vorschreibt¹⁹.

Weitere richtungweisende Länder im Umfeld der Biokunststoffe sind zudem die **Niederlande**, in denen Zuschüsse für die Produktionsumstellung auf Biokunststoffe erteilt werden und Biokunststoffverpackungen für die Sammlung und Kompostierung in Kombination mit Bioabfällen zugelassen sind; sowie **Großbritannien** wo Biokunststoffe seit einigen Jahren erfolgreich von großen Supermarktketten (Sainsbury, etc.) als Lebensmittelverpackungen eingesetzt werden (Kaeb 2006).

In den USA wird der Biokunststoffmarkt durch starke Joint Venture zwischen der Landwirtschaft und der chemischen Industrie gefördert (Geuder 2007: 34). Zudem haben auch hier größere Supermarktketten den Einsatz von Verpackungen aus Biokunststoffen angekündigt (Kaeb 2006: 24).

4.3 Vernetzung innerhalb der Branche, Vernetzung mit Forschung

Die Darstellung der Unternehmen die Biokunststoffe produzieren ist, wie Kap. 4.1.1 verdeutlicht, überschaubar. Traditionell sind die größeren Produzenten von Biokunststoffen stark in die Wirtschafts- und Forschungsstrukturen der chemischen und biotechnologischen Industrie integriert. Die kunststofferzeugende Industrie wurde bisher in Deutschland durch einen eigenen Verband, den Verband der Kunststofferzeugenden Industrie (VKE) vertreten, der mittlerweile in der deutschen Vertretung Plastics Europe aufgegangen ist.

Deutschland hat eine zentrale Rolle in der Diskussion um Biokunststoffe inne. Speziell für das Thema Biokunststoffe ist im Jahr 2006 der Verein "European Bioplastics" als Branchenverband der industriellen Hersteller, Verarbeiter und Anwender von Biokunststoffen und biologisch abbaubaren Werkstoffen (BAW), sowie daraus hergestellter Produkte gegründet worden. Er ging aus der im Jahr 1993 gegründeten "Interessengemeinschaft Biologisch Abbaubare Werkstoffe" (IBAW) hervor und versteht sich als

¹⁸ Siehe <http://www.plasticker.de/news/shownews.php?nr=2258> (letzter Abruf März 2007)

¹⁹ Siehe <http://www.european-bioplastics.org/index.php?id=79> (letzter Abruf März 2007)

Förderer der Markteinführung von Biokunststoffen. Neben der deutschen Vertretung von European Bioplastics sind für die Branche auch das Centrale-Agrar-Rohstoff-Marketing- und Entwicklungs-Netzwerk (C.A.R.M.E.N.) e.V. und der Informationsdienstleister Bioplastics24 von Bedeutung. Darüber hinaus existieren die folgenden nationalen Netzwerke und Verbände in anderen europäischen Staaten:

- Belgien: Belgian Biopackaging
- Großbritannien: UK Compostable Packaging Working Group
- Frankreich: Club des Bioplastiques
- Niederlande: Belangenvereniging Composteerbare Producten Nederland, BCPN

Auf EU-Ebene ist aus Forschungssicht z. B. die Arbeitsgruppe der Kommission, "EU Renewable Raw Materials Working Group" von Bedeutung, die unter dem Dach der „DG Enterprise and Industry“ angesiedelt ist.

Da das Themenfeld der Biokunststoffe per se ein interdisziplinäres Forschungsgebiet ist, in das sowohl Erkenntnisse der Werkstoff- und Kunststoffforschung, der Chemie und Biotechnologie, als auch Wissen zur Nutzung und Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe einfließen, organisiert sich auch die Forschung gemäß dieser Fachrichtungen und Disziplinen.

Je nach Art des Biokunststoffes (siehe Kap. 2.2.1) können verschiedene Forschungsschwerpunkte, wie z. B. biotechnologische Verfahrenstechnik oder Agrarwissenschaften relevant sein. Die förderpolitischen Zielsetzungen und Zuständigkeiten verteilen sich entsprechend der eingesetzten Roh- und Werkstoffe auf unterschiedliche Organisationen, Ministerien und deren Projektträger. Vereinfacht kann die Situation wie folgt dargestellt werden:

- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) mit Projektträger Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR): Forschung an nachwachsenden Rohstoffen und deren Nutzung und Weiterverarbeitung
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit Projektträgern: Forschung zu neuen Materialien, neuen Verfahren zur Produktion von Biokunststoffen (z. B. weiße Biotechnologie)
- Bundesumweltministerium (BMU), Umweltbundesamt (UBA) und Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU): Forschung zu neuen Werkstoffen, Verfahren und Umwelteffekten durch Biokunststoffe
- Universitäten und Forschungsorganisationen: Eine Vielzahl von universitären Lehrstühlen und Forschungsorganisationen (Fraunhofer Gesellschaft, Max-Planck Ge-

sellschaft, DECHEMA, etc.) beschäftigen sich als Einzelorganisationen oder in Kooperation mit der Industrie mit Forschungsthemen rund um Biokunststoffe. Eine detaillierte Übersicht über die einzelnen Forschungsschwerpunkte und die Forschungslandschaft in Deutschland existiert bisher nicht.

4.4 Rahmenbedingungen und Regulierung

Deutschland besitzt aufgrund seiner Forschungs- und Patentsituation sowie der stark entwickelten Kunststoffindustrie und der entsprechenden Absatzmärkte (z. B. Automobil- und Elektronikindustrie) eine gute Ausgangsposition für die Entwicklung eines tragfähigen Marktes für Biokunststoffe. In wichtigen Schlüsselfeldern wie der Polymerforschung und der weißen Biotechnologie besteht eine international konkurrenzfähige Forschungsinfrastruktur mit gut ausgebildetem Fachpersonal aus Chemie und Biotechnologie (DECHEMA 2004: 42). Insbesondere auch die Standortbedingungen für die als Schlüsseltechnologie der Biokunststoffe geltende weiße Biotechnologie werden von der Branche als gut empfunden (vgl. z. B. Biocom 2006: 17).

Aktuelle Entwicklungen von Regulierungen zu Biokunststoffen in Deutschland

Im Jahr 2005 trat in Deutschland die Regelung für kompostierbare Kunststoffverpackungen in der Deutschen Verpackungsverordnung (VerpackV) in Kraft. Die neue Regelung befreit Verpackungen aus biologisch abbaubaren, befristet von den üblichen Pflichten bei der Rücknahme und Wiederverwertung, bis eine ausreichende Menge von Verpackungen im Markt dies ermöglicht. Eingeflossen sind dabei die Erfahrungen aus dem Kasseler Modellprojekt²⁰ 2001-2003 sowie die Handhabungspraxis im Handel und bei der Verwertung in Deutschland.

Im Kasseler Modellprojekt wurden von 2001 bis Ende 2002 in der Stadt Kassel kompostierbare Verpackungen getestet. Das Vorhaben wurde gemeinsam von der Wirtschaft und dem Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft getragen und finanziert. Im Mittelpunkt des Projekts standen Fragen der Verbraucherakzeptanz und der Verwertung von Biokunststoffen über die Biotonne. Das Projekt konnte zeigen, das:

- die Kreislaufwirtschaft von Biokunststoffen in Form eines dezentralen Sammelsystems und der Kompostierung in technischen Anlagen Praxis funktioniert;

²⁰ Für detaillierte Ergebnisse zu dem Vorhaben siehe <http://www.modellprojekt-kassel.de> (letzter Abruf März 2007)

- die Mitbenutzung der Biotonne für kompostierbare Verpackungen gegenüber dem Recycling konventioneller Verpackungskunststoffe einen deutlichen Entsorgungskostenvorteil verspricht.

Von Seiten der deutschen Hersteller von Biokunststoffen wird zudem eine Novellierung der Bioabfall- und Düngemittelverordnung angeregt, die eine Erfassung und Verwertung von Biokunststoffen aus Verpackungen, etc. über die Sammlung und Verwertung von Bioabfällen ermöglichen soll (Kaeb 2006: 12).

Rahmenbedingungen für Wirtschaft und Forschung

Materialseitig stehen mittlerweile verschiedene Biokunststoffe mit spezifischen Eigenschaften zur Verfügung, die Anwendungen sowohl in Verpackungen und Konsumprodukten wie auch in dauerhaften Nutzungen in der Automobil- und Elektronikindustrie erlauben. Fördernde Rahmenbedingungen können von staatlicher Seite z. B. weiterhin durch die gezielte Förderung der materialwissenschaftlichen und biotechnologischen Forschung im Bereich der Biokunststoffe geleistet werden. Biotechnologische Verfahren besitzen ein großes Potenzial zur Reduktion von Produktionskosten sowie zur Verbesserung von Produktqualität und Einsatzmöglichkeiten der Werkstoffe beizutragen (DECHEMA 2004: 5f).

Erhebliche Forschungsaufwendungen werden notwendig sein, um die Produktion von Biokunststoffen und weiterer konkurrierender Anwendungen von nachwachsenden Rohstoffen auf eine breitere Basis zu stellen und so zukünftige Nutzungskonkurrenzen zu vermeiden (siehe Kap. 2.4). Hierfür stehen Forschung und Politik folgende Anreiz- und Fördermechanismen zur Verfügung:

- Bisher können große Anteile nachwachsender Rohstoffe wie z. B. Lignocellulose, Stroh und andere pflanzliche Reste aus der Landwirtschaft nicht ausreichend genutzt werden, da die notwendigen biotechnologischen Verfahren für eine Spaltung in stofflich nutzbaren Zucker, Stärke, etc. fehlen (FORASSET 2006: 3). Hierfür sind noch grundlegende Arbeiten in der biotechnologischen Forschung notwendig, die durch staatliche Förderung bereitgestellt werden müssen.
- In der Nutzung nachwachsender Rohstoffe konkurrieren energetische und stoffliche Anwendungen miteinander. Derzeit wird die energetische Nutzung gegenüber der stofflichen durch steuerliche Anreize (z. B. Mineralölsteuerbefreiung für Biodiesel) gefördert. Im Sinnen einer ökonomisch und ökologisch effizienten Nutzung sollte diese Förderpraxis in regelmäßigen Abständen durch kritische Analysen geprüft und der Beitrag der jeweiligen Förderung zur Erreichung von Umwelt- und Klimaschutzziele bewertet werden.

- Aufbauend auf den vorangegangenen Punkten, sollte die Erarbeitung eines nationalen Bioraffinerieplans geprüft werden (siehe auch Beucker, Fichter, Marscheider-Weidemann 2007: 32), der die integrierte biochemische und thermochemische Konversion von nachwachsenden Rohstoffen zu Chemikalien, Werkstoffen sowie Brenn- und Kraftstoffen prüft. In ihm sollen die Potenziale der gesamten Stoff- und Energieflüsse einer systemischen und kaskadenförmigen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in einem Gesamtsystem dargestellt werden, um dann verschiedenen Realisierungsoptionen von Teilen des Plans mit Vertretern aus Forschung und Industrie diskutieren und fördern zu können.
- Eine weitere politisch-rechtliche Regulierungsmöglichkeit zur Förderung des Einsatzes von Biokunststoffen liegt in der Anpassung und Änderung des Abfallrechts. So gilt seit Juni 2005 beispielsweise eine Übergangsregelung in der deutschen Verpackungsverordnung, nach der kompostierbare Kunststoffverpackungen von den Rücknahmepflichten nach § 6 der Verordnung befreit sind. Damit sind für Biokunststoffe in Verpackungen unterschiedliche Verwertungswege, auch die Kompostierung, ohne besondere Nachweis- und Verwertungspflichten möglich (VerpackV). Der Verband European Bioplastics fordert darüber hinaus die Bioabfall- und Düngemittelverordnung dahingehend zu ändern, dass auch zertifizierte, biologisch abbaubare Kunststoffe für die Kompostierung und landwirtschaftliche Verwertung zugelassen werden (Kaeb 2006: 12).

Weitere Anpassungen bestehender rechtlicher Regelungen, die die Verwendung von Biokunststoffen fördern, können z. B. in produktbezogenen Regulierungen wie der Altkar- oder der Elektronikschrottverordnung vorgenommen werden.

Neben den genannten Einflussmöglichkeiten und Rahmenbedingungen, spielt für die weitere Entwicklung der Nutzung von Biokunststoffen die Entwicklung des Preisverhältnisses zwischen Rohöl und nachwachsenden Rohstoffen eine entscheidende Rolle. Der steigende Rohölpreis in den letzten Jahren macht bereits jetzt erste Biokunststoffe, wie die thermoplastische Stärke, zu wirtschaftlich konkurrenzfähigen Alternativen (Kaeb 2006: 23).

5 Fazit: SWOT-Analyse

Trotz ihres bisher kleinen prozentualen Anteils am gesamten Kunststoffmarkt haben sich Biokunststoffe in den zurückliegenden Jahren in einigen Nischenanwendungen (z. B. Verpackungsmaterialien und Folien für die Landwirtschaft) etablieren können. Von Experten werden langfristig (Zeithorizont 2020) Marktanteile der Biokunststoffe am Gesamtkunststoffmarkt von bis zu 5 % mit jährlichen Zuwachsraten von ca. 25 % für realistisch gehalten. Ökonomisch interessant ist das Marktsegment der Biokunststoffe auch, da in ihm das mengenmäßig größte Zusatzpotenzial für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe gesehen wird. Biokunststoffe und ihre Rohstoffe stellen damit auch einen wichtigen Zukunftsmarkt für deutsche und europäische Agrarproduzenten dar.

Deutschland und Europa sind bezüglich der technologischen Forschung im Feld der Biokunststoffe gut positioniert. Die europäischen Konzerne Novamont und Rodenburg Biopolymers sind Marktführer für thermoplastische Stärken. Kritischer ist die Situation für Deutschland und Europa im Bereich der attraktiven Polylactide (PLA), die als hochwertiges Biopolymer und Ersatz für Polyethylen in einer Vielzahl von technischen Anwendungen z. B. in der Automobil- und Elektronikindustrie zum Einsatz kommen können. Größere Produktionskapazitäten für PLA werden derzeit in den USA und Japan aufgebaut. Schwer abschätzbar ist die potenzielle Konkurrenz durch chinesische Produzenten. Hierfür ist eine genauere Analyse notwendig.

Die langfristige Entwicklung des Marktes (Zeithorizont 2020) für Biokunststoffe hängt zudem von den folgenden zentralen Schlüsselfaktoren und deren Entwicklung ab:

- **Entwicklung von Rohstoffpreisen:** Entscheidend für die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der Biokunststoffe ist die Entwicklung des Preisverhältnisses zwischen Rohöl und nachwachsenden Rohstoffen. Unter den aktuellen Rahmenbedingungen eines hohen Ölpreises können erste Biokunststoffe bereits zu konkurrenzfähigen Preisen auf den Markt gebracht werden.
- **Erzeugung von Skaleneffekten:** Eine Reihe existierender Biokunststoffe, insbesondere Polylactide sollten durch weitere Optimierung und Modifikation (z. B. Langlebigkeit und Kombination mit Naturfasern) in ihrem Einsatzspektrum erweitert werden. Dadurch könnten große neue Einsatzgebiete und Massenmärkte wie z. B. in der Automobil- und Elektronikindustrie erschlossen werden.
- **Rohstoffverfügbarkeiten und Nutzungskonkurrenzen:** Die aktuelle Diskussion um die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen für die Produktion von Kraftstoffen zeigt, dass auch nachwachsende Rohstoffe unter dem Knappheitsaspekt analysiert werden müssen und ihre Nutzung aus umwelt- und wirtschaftspolitischer Sicht in den Bereichen konzentriert werden sollte, in denen sie den größten ge-

samtgesellschaftlichen Nutzen erzeugen. Da die Rohstoffe der Biokunststoffproduktion heute schon Ausgangsubstanz vieler chemischer Intermediate und Energieträger (z. B. Bioethanol und Biodiesel) sind, sollte das Nutzungssystem und die sich daraus ergebenden Konkurrenzen auf nationaler, interministerieller Ebene in Form eines Ressourcennutzungs- und Bioraffinerieplans diskutiert werden.

- **Grundlagenforschung:** Insbesondere die biotechnologische Forschung könnte der Nutzung nachwachsender Rohstoffe und der Anwendung von Biokunststoffen zu einem Durchbruch verhelfen. Gelingt es, durch den Einsatz biotechnologischer Verfahren bisher nur schwer verwertbare Fraktionen nachwachsender Rohstoffe (z. B. Stroh, landwirtschaftliche Abfälle, Lignocellulose etc.) kostengünstig für die chemische Industrie nutzbar zu machen, so könnten sich die Preisentwicklung und die konkurrierende Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen deutlich entspannen. Gleiches gilt für eine mögliche Nutzung transgener Pflanzen, die zu einer wichtigen Rohstoffquelle für die Produktion von Biokunststoffen werden könnten. Auch auf diesem Gebiet sind jedoch bis zur tatsächlichen Anwendung, viele Grundlagenarbeiten zu leisten und Nutzen-Risiken-Abwägungen zu treffen.

Die vorangegangenen Punkte zeigen, dass eine Analyse und Bewertung der Nutzungspotenziale und -kapazitäten nachwachsender Rohstoffe sowie die Bewertung der Schwerpunktsetzungen auf einer stofflichen bzw. energetischen Nutzung eine wichtige Voraussetzung für die weitere Gestaltung umweltpolitischer Maßnahmen sind.

Darüber hinaus besitzt die europäische und deutsche Umweltpolitik über eine Reihe existierender Verordnungen und Regulierungen die Möglichkeit, Einfluss auf den verstärkten produktbezogenen Einsatz nachwachsender Rohstoffe zu nehmen. Dazu zählen z. B. die Verpackungsverordnung (VerpackV), das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) oder auch die Altfahrzeugverordnung (AltfahrzeugV). Französische und japanische Gesetzesinitiativen liefern Beispiele hierfür.

Für die weitere Diskussion um Biokunststoffe sind eine klare Abgrenzung des Begriffs der Biokunststoffe sowie die Definition eines minimalen Anteils nachwachsender Rohstoffe eine wichtige Voraussetzung. Zentral ist zudem die Bewertung der durch Biokunststoffe induzierten potenziellen Umweltwirkungen, die z. B. mit einer erhöhten Nutzung von Agrarrohstoffen sowie der für die Produktion benötigten Energie einhergehen. Bisher liegen nur wenige belastbare Ergebnisse vor, die Auskunft über die Umwelteffekte dieser neuen Werkstoffgruppe geben.

Tabelle 5-1: SWOT-Analyse für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der EU und Deutschlands in der Techniklinie Biokunststoffe

Stärken	Chancen
<ul style="list-style-type: none"> • Stärkung der europäischen Agrarwirtschaft und Nutzung nachwachsender Rohstoffe aus lokaler Produktion • Beitrag zum Klimaschutz und zur rohstofflichen Versorgungssicherheit in Europa • Schaffung neuer Einsatzmöglichkeiten und europäischer Märkte durch neue Werkstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Ausgangssituation Deutschlands und Europas (Patente, Forschung, etc.) im Bereich der Biokunststoffe • Erschließung neuer Anwendungen und Märkte durch Biokunststoff aufgrund spezifische und vorteilhafter Werkstoffeigenschaften • Steigender Ölpreis macht Biokunststoffe konkurrenzfähig
Schwächen	Herausforderungen
<ul style="list-style-type: none"> • Unter aktuellen Rahmenbedingungen sind hochwertige Biokunststoffe wirtschaftlich oft noch nicht konkurrenzfähig • Bisher nur geringe Mengen verfügbar • Forschung zu Erschließung wichtiger Fraktionen nachwachsender Rohstoffe (Stroh, Lignin, etc.) befindet sich noch im Grundlagenstadium 	<ul style="list-style-type: none"> • Starke Konkurrenz durch US-amerikanische und japanische Hersteller im Bereich Polylactide • Potenzielle Nutzungskonkurrenzen um nachwachsende Rohstoffe in der chemischen Industrie • Stoffliche vs energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe

Literatur

- v. Armansperg, M. (2006): Chemie, in: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hg.) Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, meó Consulting Team, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Faserinstitut Bremen, Gülzow
- Beucker, S.; Fichter, K.; Marscheider-Weidemann, F. (2007): Weiße Biotechnologie. Analyse der Leistungsfähigkeit in „grünen“ Zukunftsmärkten. Vertiefungsstudie im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens „Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern (Zukunftsmärkten)“ (FKZ 206 14 132/05)
- Chen, G. G. Q. (2005): The Development of a Biomass Based Material Industry in China. Biomass-Asia Workshop 2005, January 19-21/2005, Tokyo, Japan
- DECHEMA - Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (2004): Weiße Biotechnologie: Chancen für Deutschland, Positionspapier der DECHEMA e.V., Frankfurt a.M., Stand November 2004
- Detzel, A.; Krueger, M. (2006): Life cycle assessment of Polylactide (PLA). A comparison of food packaging made from NatureWorks® PLA and alternative materials. IFEU, Heidelberg
- DIN EN 13432 (2000): 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, Beuth Verlag, Berlin
- FORASSET – Foresight and Assessment of Environmental Technologies (2006): Case Study Biopolymers, Working Paper Work Package 1: Identification and Characterisation of Environmental Technologies, EU- Projekt FORASSET, Fraunhofer ISE, Karlsruhe
- Geuder, M. (2007): Biopolymere – eine Perspektive für die Landwirtschaft? Master-Thesis an der Universität Hohenheim, Institut für Landwirtschaftliche Betriebswirtschaftslehre, Februar 2007, Stuttgart Hohenheim
- Greenpeace - Allsopp, M.; Walters, A.; Santillo, D.; Johnston; P. (2006): Plastic Debris in the World's Oceans. Greenpeace International, Amsterdam, Niederlande
- IHK - Industrie- und Handelskammer Bonn/Rhein-Sieg (2006): Branchenreport Kunststoff 2006, Bonn

- IPTS – Institut for Prospective Technological Studies (2005): Techno-economic Feasibility of Large-scale Production of Bio-based Polymers in Europe, Technical Report EUR 22103 EN, European Commission, European Communities 2005
- Kaeb, H. (2006): Biokunststoffe & Bioverpackungen. Informationen des Verbandes European Bioplastics für einen parlamentarischen Abend im Dezember 2006, Berlin
- Karus, M. (2003): Marktüberblick: Bio-Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe, nova-Institut, Hürth
- Mazda Motors GmbH (2006): Mazda entwickelt neuen Biokunststoff für Fahrzeug-Innenräume, Meldung der Mazda Motors GmbH vom 18.05.2006, (<http://www.mazda.de/AboutMazda/MazdaAktuell/NeuigkeitenArchiv/20060518.htm>, letzter Abruf März 2007)
- Meiß, K.-M.; Eisenberg, W.; Gustrau-Wissig, M. (2003): Implementationsstudie zu biotechnologischen Produktion von Biopolymeren unter Einsatz digitaler Modelle auf der Basis nachwachsender Rohstoffe und organischer Abfälle, Forschungsbericht 200 66 302, UBA-FB 000455, UBA Texte 38/03, Berlin
- Müssig, J.; Carus, M. (2007): Bio-Polymerwerkstoffe sowie holz- und naturfaserverstärkte Kunststoffe, in: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (Hg.): Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe Teil II, meó Consulting Team, Faserinstitut Bremen, nova-Institut GmbH, Gülzow
- Sartorius, I. (2006) Nachwachsende Rohstoffe – Innovationen für polymere Werkstoffe. Vortrag im Rahmen der Veranstaltung „Mit nachwachsenden Rohstoffe zu Höchstleistungen, Göttingen November 2006 (http://www.riko.net/html/kwstnr2006/messe_1.php3, letzter Abruf März 2007)
- Simon, C.J. (2004): Produktions- und Verbrauchsdaten für Kunststoffe in Deutschland unter Einbeziehung der Verwertung 2003, PlasticsEurope Deutschland (www.vke.de/download/pdf/Consultic2003_kurz.pdf, letzter Abruf März 2007)
- Toyota Motor Corporation (2006): Sustainability Report 2006. Towards a New Future for People, Society and the Planet, August 2006, Tokyo, Japan
- VKE - Verband Kunststoffherstellende Industrie (2004): Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen. VKE Arbeitsausschuss Statistik und Marktforschung, Internet-Version, veröffentlicht am 16.4.2004

In der Reihe „Umwelt, Innovation, Beschäftigung“ sind bisher die folgenden Bände erschienen:

- 01/07 Wirtschaftsfaktor Umweltschutz: Vertiefende Analyse zu Umweltschutz und Innovation
- 02/07 Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen
- 03/07 Zukunftsmarkt Solarthermische Stromerzeugung
- 04/07 Zukunftsmarkt CO₂-Abscheidung und –Speicherung
- 05/07 Zukunftsmarkt Elektrische Energiespeicherung
- 06/07 Zukunftsmarkt Solares Kühlen
- 07/07 Zukunftsmarkt Energieeffiziente Rechenzentren
- 08/07 Zukunftsmarkt Biokunststoffe
- 09/07 Zukunftsmarkt Synthetische Biokraftstoffe
- 10/07 Zukunftsmarkt Hybride Antriebstechnik
- 11/07 Zukunftsmarkt Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement
- 12/07 Zukunftsmarkt Nachhaltige Wasserwirtschaft und Nanotechnologie
- 13/07 Zukunftsmarkt Stofferkennung und -trennung

Alle Veröffentlichungen können kostenlos auf www.umweltbundesamt.de heruntergeladen werden.