

VDI

Zentrum
Ressourceneffizienz

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 15

Ressourceneffizienz biobasierter Materialien im verarbeitenden Gewerbe



© Fotolia / Alberto Masnovo

August 2016

Kurzanalyse Nr. 15: Ressourceneffizienz biobasierter Materialien im verarbeitenden Gewerbe

Autorin:

Dr.-Ing. Katja Saulich, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir danken Herrn Dr.-Ing. Stephan Kabasci, Leiter der Abteilung Biobasierte Kunststoffe am Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT und stellvertretender Vorsitzender des VDI-Fachbereichs Biotechnologie, für seine fachliche Unterstützung.

Die Kurzanalyse wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Bertolt-Brecht-Platz 3

10117 Berlin

Tel. +49 30-2759506-0

Fax +49 30-2759506-30

zre-info@vdi.de

www.ressource-deutschland.de

Satz und Gestaltung: Benjamin Röbig

Titelbild: Fotolia / Alberto Masново

Druck: Bonifatius GmbH, Karl-Schurz-Straße 26, 33100 Paderborn

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:
Kurzanalyse Nr. 15

Ressourceneffizienz biobasierter
Materialien im verarbeitenden Gewerbe

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
TABELLENVERZEICHNIS	4
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	5
1 EINLEITUNG	7
2 STOFFLICHE NUTZUNG NACHWACHSENDER ROHSTOFFE	10
2.1 Begriffe	10
2.2 Überblick	11
2.3 Motive	14
2.4 Anwendung im verarbeitenden Gewerbe	16
3 BIODERIVATE	22
3.1 Marktsituation	25
3.2 Herstellung	27
3.3 Verarbeitung	29
3.4 Anwendung	31
3.5 Verwertung und Beseitigung	33
4 BIOVERBUNDWERKSTOFFE	36
4.1 Marktsituation	38
4.2 Herstellung	40
4.3 Eigenschaften	43
4.4 Anwendung	46
4.5 Verwertung und Beseitigung	50
5 BIOSCHMIERSTOFFE	52
5.1 Marktsituation	53
5.2 Herstellung	55
5.3 Eigenschaften	56
5.4 Anwendung	58
5.5 Verwertung und Beseitigung	64
6 HERAUSFORDERUNGEN	65

7 ZUSAMMENFASSUNG	68
LITERATURVERZEICHNIS	70
ANHANG A	77
ANHANG B	78

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Märkte für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe	12
Abbildung 2: Primär genutzte Inhaltsstoffe nachwachsender Rohstoffe und ihre Einsatzbereiche	13
Abbildung 3: Ressourcennutzung im Lebensweg	17
Abbildung 4: Biobasierte und bioabbaubare Kunststoffe	23
Abbildung 5: Zwei Hauptgruppen der Bioverbundwerkstoffe	36
Abbildung 6: Vergleich des Energieaufwands bei der Herstellung von Formpressteilen aus fossilen und hanfbasierten Verbundwerkstoffen	46
Abbildung 7: Bedeutung von „Bio“ im Schmierstoffbereich	53

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Entwicklungsstand biobasierter Kunststoffe (2012)	24
Tabelle 2:	Weltweite Produktionskapazität von biobasierten und biologisch abbaubaren Kunststoffen (2014)	26
Tabelle 3:	Weltweite Produktionskapazität biobasierter und biologisch abbaubarer Kunststoffe in Abhängigkeit der Marktsegmente (2014)	27
Tabelle 4:	Rohstoffe und Verfahren zur Herstellung von Biokunststoffen	29
Tabelle 5:	Verarbeitungsverfahren für Biokunststoffe	30
Tabelle 6:	Komponenten in Bioverbundwerkstoffen	38
Tabelle 7:	Produzierte Mengen an WPC und NFK in der Europäischen Union differenziert nach Anwendungsfeldern (2012)	39
Tabelle 8:	Eigenschaften von zwei typischen NFK-Formpressteilen	45
Tabelle 9:	Produzierte Gesamtmenge von Bioschmierstoffen in Deutschland (2011) und ihr Anteil in den jeweiligen Produktgruppen	54
Tabelle 10:	Bandbreite von auf dem Markt verfügbaren biobasierten Produkten	77
Tabelle 11:	Primär genutzte Inhaltsstoffe und ihre Rohstoffquellen	77
Tabelle 12:	Förderprogramme zum Themenfeld „Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe“	78

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABS	Acrylnitrilbutadienstyrol
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CA	Celluloseacetat
CO₂	Kohlenstoffdioxid
GF	Glasfaser
H₂O	Wasser
INRO	Initiative Nachhaltige Rohstoffbereitstellung für die stoffliche Biomassenutzung
ISCC	International Sustainability & Carbon Certification
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
Mio.	Millionen
NFK	Naturfaserverstärkte Kunststoffe
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
PCL	Polycaprolacton
PE	Polyethylen
PEF	Polyethylenfuranoat
PES	Polyethersulfon
PET	Polyethylenerephthalat
PHA	Polyhydroxyalkanoat
pharma.	pharmazeutisch
PHB	Polyhydroxybutyrat
PLA	poly(lactid acid) (Polymilchsäure)
POM	Polyoxymethylen

PP	Polypropylen
PTP	Polymer aus Triglyceriden und Polycarbonsäureanhydri- den
PTT	Polytrimethylterephthalat
PUR	Polyurethan
PVAL	Polyvinylalkohol
PVC	Polyvinylchlorid
S.	Seite
t	Tonnen
thermoplast.	thermoplastisch
TPS	Thermoplastische Stärke
vgl.	vergleiche
WPC	wood plastic composites (Holz-Kunststoff-Verbundwerk- stoffe)

1 EINLEITUNG

Im verarbeitenden Gewerbe bestimmt der effiziente Rohstoffeinsatz maßgeblich die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit der produzierten Erzeugnisse. Dieser wird durch die Wahl der Rohstoffquelle und durch materialeffiziente Produktions- und Verarbeitungsverfahren erzielt.

Die Mehrzahl der weltweit hergestellten und genutzten kohlenstoffbasierten Produkte wird aus fossilen Rohstoffquellen erzeugt. Diese sind mengenmäßig allerdings nur begrenzt verfügbar. Die Nutzung fossiler Rohstoffe wirkt sich unter Umständen ökonomisch und ökologisch ungünstig aus. Eine begrenzte Verfügbarkeit und eine ungleichmäßige Verteilung der Abbaustätten können Schwankungen in den Rohstoffpreisen bewirken, beispielsweise verursacht durch spezifische Interessen der Förderländer. Wenn fossil-basierte Produkte im Anschluss an ihre Nutzungsphase energetisch verwertet werden, entstehen CO₂-Emissionen, die einen Anstieg des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre bewirken und zum Klimawandel beitragen.

Insbesondere für Länder ohne oder mit geringen eigenen fossilen Rohstoffmengen sind nachhaltig hergestellte Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen sinnvoll, um die Abhängigkeit von endlichen Ressourcen in der industriellen Produktion zu verringern. Zudem unterstützt der Einsatz nachwachsender Rohstoffe in der Industrie die Reduktion des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre. Die bei der energetischen Verwertung freigesetzten CO₂-Emissionen werden bei der Entstehung nachwachsender Rohstoffe zum Teil wieder verbraucht. Bei fossilen Rohstoffen besteht diese Möglichkeit naturgemäß nicht.

Bereits heute wird eine Vielzahl an biobasierten Produkten hergestellt und eingesetzt. Nachwachsende Rohstoffe dienen als Ausgangsstoff bei der Herstellung von Grundstoffen (z. B. Biokunststoffgranulate) für den Produktionsprozess oder von Hilfs- und Betriebsstoffen (z. B. Bioschmierstoffe). Die Bedeutung von Biokunststoffen und Bioverbundwerkstoffen als Werkstoffe zum Einsatz im verarbeitenden Gewerbe hat in den letzten

Jahren immer weiter zugenommen.¹ Beispielsweise produzieren Betriebe der stoffumwandelnden Industrie Biokunststoffgranulate, die von werkstoffverarbeitenden Betrieben zu Innenverkleidungen weiterverarbeitet und im Automobilbau eingesetzt werden.

Für die Herstellung und Verarbeitung biobasierter Produkte müssen bestehende Verfahren modifiziert und optimiert oder neue Technologien entwickelt werden. Dies ist oftmals nicht trivial und erfordert innovative Ideen, ein hohes technisches Niveau und einen ausreichenden Entwicklungszeitraum.

Um den Einsatz nachwachsender Rohstoffe in der industriellen Produktion in Deutschland zu fördern, werden im Rahmen der Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie diverse Förderinstrumente eingesetzt und Maßnahmen angestoßen. Die Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie wurde im Jahr 2010 unter Federführung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zusammen mit anderen Bundesministerien initiiert. Eines der Handlungsfelder ist die Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der Industrie.²

In kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sind die zeitlichen und personellen Kapazitäten in der Regel begrenzt, um sich mit neuen oder weiterführenden Themen auseinanderzusetzen. Für den Themenbereich „Einsatz biobasierter Materialien im verarbeitenden Gewerbe“ stellt diese Kurzanalyse gezielt Informationen über Vorteile, praxisrelevante Aspekte beim Einsatz sowie Herausforderungen bereit.

Der Einsatz biobasierter Betriebs-, Hilfs- und Werkstoffe im verarbeitenden Gewerbe wird untersucht. Dabei werden die aktuelle Marktsituation, die Herstellungsverfahren, die Materialeigenschaften und verschiedene Aspekte der Anwendung erläutert und durch Beispiele veranschaulicht. Berück-

¹ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014), S. 13 ff.

² Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014), S. 6.

sichtigt werden jene biobasierten Stoffgruppen, die bisher Relevanz erlangt haben: Biokunststoffe, Bioverbundwerkstoffe und Bioschmierstoffe.

Zur Steigerung der Ressourceneffizienz entlang der Wertschöpfungskette wird gemäß dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm II³ ausschließlich die stoffliche Nutzung erneuerbarer Rohstoffe betrachtet.

³ Vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016), S. 35.

2 STOFFLICHE NUTZUNG NACHWACHSENDER ROHSTOFFE

2.1 Begriffe

Wesentliche Begriffe dieser Arbeit werden im Folgenden kurz erläutert.

Biomasse

Laut VDI Richtlinie 6310 Blatt 1 werden mit dem Begriff „Biomasse“ sämtliche Stoffe biologischen Ursprungs (Flora und Fauna) bezeichnet, die nicht aus fossilen und/oder geologischen Quellen stammen.⁴ Unter diese Definition fallen Rohstoffe wie

- lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere) sowie
- hieraus resultierende (noch nicht fossile) Rest- und Abfallstoffe (z. B. Stroh, Altholz, tierische Exkremete).

Nachwachsende Rohstoffe

Unter „nachwachsenden Rohstoffen“ wird die in Land- und Forstwirtschaft erzeugte Biomasse verstanden, die stofflich und energetisch in verschiedener Weise nutzbar ist. Ausgenommen davon sind Nahrungs- und Futtermittel.⁵ Biomasse wird stofflich für die (industrielle) Produktion von Gütern genutzt.⁶

Biobasiertes Produkt

Ein „biobasiertes (Zwischen-)Produkt“ resultiert aus der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe und besteht dementsprechend anteilig oder zu 100 % aus Biomasse.^{7, 8}

⁴ Vgl. VDI 6310 Blatt 1:2016-01, S. 6.

⁵ Vgl. VDI 6310 Blatt 1:2016-01, S. 7.

⁶ Vgl. Carus, M. et al. (2010), S. 10.

⁷ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 5.

⁸ Vgl. VDI 6310 Blatt 1:2016-01, S. 6.

Bioökonomie

„Die Bioökonomie ist die wissensbasierte Erzeugung und Nutzung nachwachsender Ressourcen⁹, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen.“¹⁰

2.2 Überblick

Nachwachsende Rohstoffe stellen erneuerbare Ressourcen dar, die stofflich oder energetisch nutzbar sind. Die energetische Nutzung in Form von alternativen Energieträgern wie diversen Holzprodukten oder Bioethanol ist – allerdings in großem Umfang staatlich unterstützt – bereits am Energiemarkt etabliert.

Die Marktdurchdringung der stofflich genutzten biobasierten Produkte gestaltet sich hingegen schwieriger, auch weil vergleichbare Unterstützungsmaßnahmen wie bei Energieträgern bislang kaum existieren. Dies liegt an den stark am Markt etablierten fossil-basierten Produkten, die in optimierten Verfahren hergestellt und zu rentablen Preis-Leistungs-Verhältnissen angeboten werden. Für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe müssen Herstellungsverfahren modifiziert oder neu entwickelt werden, was u. a. zu hohen Marktpreisen führen und eine Marktdurchdringung hemmen kann.

Demgegenüber stehen die Vorteile einer stofflichen Nutzung: Reduzierung fossiler Rohstoffmengen, Verringerung umweltbelastender, klimaschädlicher Emissionen und Abfälle, Minderung gesundheitlicher Risiken beim Herstellungs- und Verarbeitungsprozess. Diese Vorteile motivieren Unternehmen dazu, biobasierte Zwischen- und Endprodukte zu entwickeln, herzustellen und zu verwenden.¹¹ In den letzten Jahren führte dies zu einem

⁹ In der Begrifflichkeit dieser Arbeit werden hierunter Rohstoffe verstanden.

¹⁰ Bundesministerium für Bildung und Forschung und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014), S. 4.

¹¹ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014), S. 13 ff.

zunehmenden Angebot an biobasierten Produkten in verschiedenen stofflichen Märkten.

In Abbildung 1 sind die wichtigsten stofflichen Märkte für biobasierte Produkte dargestellt. Die Produktgruppen wie Chemikalien, biobasierte Werkstoffe, Schmierstoffe sowie Wasch- und Körperpflegemittel werden den chemischen Märkten zugeordnet. Als sonstige stoffliche Märkte für biobasierte Produkte sind Märkte für Papier, Pappe und Kartonage, für pharmazeutische Produkte sowie für Bauen und Wohnen zu nennen.¹²



Abbildung 1: Märkte für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe¹³

Die Bandbreite der heute verfügbaren biobasierten Produkte ist bemerkenswert. Sie reicht von den klassischen Holzprodukten für den Bau- und Wohnbereich über Faserverbundwerkstoffe bis hin zu Biokunststoffen, Bioschmierstoffen sowie biobasierten chemischen Stoffen (z. B. Lösungsmittel, Hilfsmittel für Gießereien, Tenside, technische Polymere, Farb- und

¹² Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014a), S. 14.

¹³ In Anlehnung an Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014a), S. 14 und S. 115.

Aromastoffe). Eine ausführliche Zusammenstellung biobasierter Produkte ist im Anhang A (vgl. Tabelle 10) aufgeführt.¹⁴

In dieser Kurzanalyse werden jene biobasierten Produktgruppen betrachtet, die bereits als Werkstoff oder Hilfs-/Betriebsstoff im verarbeitenden Gewerbe eingesetzt werden und bisher eine gewisse Relevanz erreicht haben: Biokunststoffe, Bioverbundwerkstoffe und Bioschmierstoffe (vgl. grauer Kasten in Abbildung 1).

	Naturfasern	Holz/Cellulose/ Lignocellulose	Zucker	Stärke	Proteine	Öle und Fette	Besondere Inhaltsstoffe
Biobasierte Werkstoffe	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓
Schmierstoffe	-	-	-	-	-	✓	-
Chemikalien	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Abbildung 2: Primär genutzte Inhaltsstoffe nachwachsender Rohstoffe und ihre Einsatzbereiche¹⁵

Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2013 3,4 Mio. t primär verwertete Inhaltsstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zur stofflichen Nutzung eingesetzt. Davon entsprachen 1,4 Mio. t Kohlenhydraten (45 % Papierstärke, 23 % Chemiezellstoff, 22 % Chemiestärke und -zucker und 10 % Naturfasern)¹⁶, 1,2 Mio. t pflanzlichen Fetten/Ölen und 0,8 Mio. t sonstigen biogenen Rohstoffen (31 % Naturkautschuk, 27 % Glycerin, 24 % anderen bio-

¹⁴ Vgl. Oertel, D. (2007), S. 42.

¹⁵ In Anlehnung an Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014a), S. 16 und Oertel, D. (2007), S. 42.

¹⁶ Ohne Holznutzung.

genen¹⁷ Rohstoffen, 14 % Wachsen, Harzen, Gerbstoffen sowie 4 % Kork).¹⁸ Die Rohstoffquellen der genutzten Inhaltsstoffe umfassen ein breites Spektrum an pflanzlichen und tierischen Produkten (vgl. Anhang A, Tabelle 11).

Fast alle primär genutzten Inhaltsstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen werden bei der Herstellung biobasierter Werkstoffe und Chemikalien eingesetzt. Bei Schmierstoffen kommt nur die Inhaltsstoff-Kategorie „Öle und Fette“ zum Einsatz (vgl. Abbildung 2).

2.3 Motive

Die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe kann zu einer Reduktion von CO₂-Emissionen in die Atmosphäre¹⁹ und zur Einsparung fossiler Rohstoffe führen:

- Nachwachsende Rohstoffe sind im Gegensatz zu fossilen Rohstoffen nach der Entnahme erneuerbar und verbrauchen während des Entstehungsprozesses CO₂. Das bei der thermischen oder biologischen Verwertung eines biobasierten Produkts emittierte CO₂ wird zu Teilen bei einer erneuten Rohstoffentstehung wieder aus der Atmosphäre entnommen und stofflich gebunden. Hingegen reichern sich die bei der Beseitigung von fossil-basierten Produkten freigesetzten CO₂-Mengen in der Atmosphäre an. Im Vergleich zu nachwachsenden Rohstoffen erneuern sich fossile nicht. Das CO₂-Reduktionspotenzial durch den industriellen Einsatz nachwachsender Rohstoffe kann einen Beitrag zum Erreichen der nationalen und internationalen Klimaschutzziele leisten.
- In der Regel induziert die Substitution fossiler durch nachwachsende Rohstoffe eine Einsparung fossiler Rohstoffmengen. Dadurch ist der Hersteller biobasierter Produkte unabhängiger von Preisschwankungen fossiler Rohstoffe, die beispielsweise durch eine Rohstoffverknappung

¹⁷ Definition von „biogen“ nach VDI 6310 Blatt 1:2016-01: „Biologischen Ursprungs (Fauna, Flora) mit Ausnahme von Material aus fossilen und/oder geologischen Quellen.“

¹⁸ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016h), S. 6 f.

¹⁹ Vgl. Deimling, S.; Goymann, M.; Baitz, M. und Rehl, T. (2007), S. 122 f.

hervorgerufen werden können. Die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe zieht in der Regel eine geringere Abhängigkeit von wirtschaftlichen und politischen Interessen der rohstoffabbauenden²⁰ Industrien und Länder nach sich.

Verglichen mit ihren fossil-basierten Pendanten können biobasierte Produkte folgende günstigere Eigenschaften aufweisen:

- Technische Eigenschaften: geringeres Gewicht (z. B. Bioconcept-Car²¹), bessere Verarbeitbarkeit (z. B. geringere Splitterneigung bei Bioverbundwerkstoffen²²) oder günstigere Nutzungseigenschaften (z. B. bessere Verschleißschutzeigenschaften von Bioschmierstoffen²³)
- Biologische Abbaubarkeit: unkomplizierter Einsatz in umweltsensiblen Bereichen ohne aufwendige Sicherheitsvorkehrungen oder Vermeidung aufwendig zu entsorgender Abfälle²⁴

Die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der Industrie dient neben den oben genannten Aspekten dem übergeordneten Ziel eines effizienten und schonenden Umgangs mit natürlichen Ressourcen. Die Herstellung biobasierter Produkte fördert ein nachhaltiges unternehmerisches Handeln und trägt daher zu einem positiven Umweltimage eines Unternehmens bei.

Rohstoffgewinnungs- und Produktionsverfahren müssen bei der Umstellung von fossilen auf nachwachsende Rohstoffe angepasst oder komplett neu entwickelt werden. In vielen Fällen impliziert dies die Entwicklung neuer Technologien. Damit verbunden ist häufig ein hohes Innovationspotenzial. Hierin besteht die Chance, das hohe Technologieniveau in Deutschland und die damit verbundene große Wissens- und Erfahrungskompetenz in der Technologieentwicklung zu nutzen. Hieraus können effiziente Tech-

²⁰ Bezogen auf fossile Rohstoffe.

²¹ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2013), S. 4.

²² Vgl. Carus, M. et al. (2008), S. 137.

²³ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 8.

²⁴ Vgl. Peters, D. et al. (2010), S. 76.

nologien und neue Technologiebereiche entstehen wie beispielsweise die industrielle Biotechnologie, die in der Produktion von biobasierten Chemikalien Anwendung findet. Durch neue Anwendungen und Technologiebereiche werden etablierte Märkte gestärkt und neue erschlossen. Dies sichert den Wirtschaftsstandort Deutschland und fördert das Wirtschaftswachstum.

2.4 Anwendung im verarbeitenden Gewerbe

Herstellungs- und Nutzungsphasen

In Abbildung 3 sind verschiedene Phasen der Herstellung und Nutzung biobasierter Produkte dargestellt. Zu Beginn stehen die Gewinnung und Aufbereitung der nachwachsenden Rohstoffe. Im nachfolgenden Schritt werden aus den extrahierten Inhaltsstoffen (z. B. Stärke, Fasern oder Öle) Grundstoffe wie Kunststoffgranulate, naturfaserverstärkte Kunststoffplatten oder Tenside erzeugt. Diese werden durch einen oder mehrere Verarbeitungsschritte zu Endprodukten (z. B. Biokunststoffflaschen oder PKW-Armaturenbrett aus naturfaserverstärktem Kunststoff) oder zu Betriebs- und Hilfsstoffen (z. B. Biohydrauliköl) weiterverarbeitet.

Ein biobasiertes Endprodukt kann besonders ressourcenschonend verwendet werden, wenn mehrere Nutzungszyklen und/oder ein Produktrecycling nach der Nutzungsphase zur Erzeugung neuer Grundstoffe erfolgen. Ist eine erneute Nutzung oder ein Recycling nicht mehr möglich, kann das Produkt in der Regel einer energetischen Nutzung zugeführt werden (Kaskadennutzung). Die hierbei freigesetzten Mengen an CO₂ werden beim erneuten Entstehen nachwachsender Rohstoffe wieder verbraucht.

Im Sinne der Ressourcenschonung sollte das biobasierte Produkt langlebig und recyclingfähig sein sowie eine Mehrfachnutzung erlauben. Bereits bei der Produktgestaltung besteht die Möglichkeit, ressourcenschonende Produkteigenschaften zu berücksichtigen.

Eine umweltgerechte, ressourcenschonende und sozial verantwortliche Produktion nachwachsender Rohstoffe verringert ungünstige Umweltwirkungen. Zu einer nachhaltigen Rohstoffproduktion zählt auch ein flächeneffizienter Biomasseanbau. Auf einer begrenzten Fläche werden solche

nachwachsenden Rohstoffe angebaut, die für die vorliegenden Anbaubedingungen geeignet sind und hohe Erträge liefern.

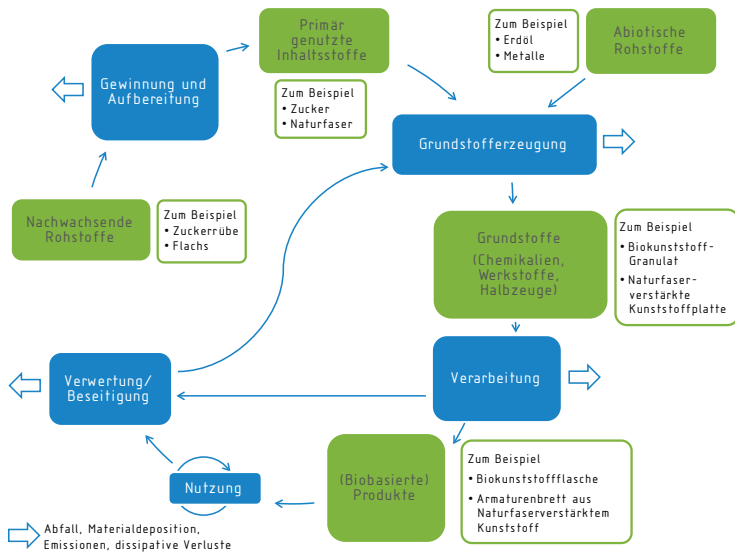


Abbildung 3: Ressourcennutzung im Lebensweg²⁵

Das Nachhaltigkeitszertifikat ISCC PLUS²⁶ wurde u. a. für Anwendungen im chemisch-technischen Bereich (z. B. Biokunststoffe) entwickelt und informiert über den Grad der Nachhaltigkeit bei Anbau und Gewinnung nachwachsender Rohstoffe, die in biobasierten Produkten eingesetzt werden (vgl. Kapitel 6).

Substitution

Für die Herstellung biobasierter Produkte sind mehrere Schritte notwendig (vgl. Abbildung 3). Die Rohstoffgewinnung/-aufbereitung und die Grundstoffherzeugung sind in der Regel landwirtschaftliche, chemische oder biotechnologische Prozesse und erfolgen durch Betriebe der agrarwirtschaftlichen und stoffumwandelnden Industrie. Das Weiterverarbeiten der bioba-

²⁵ In Anlehnung an VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 19.

²⁶ Weblink: www.iscc-system.org/iscc-system/iscc-plus/ [abgerufen am 28. Juni 2016].

sierten Grundstoffe zu Endprodukten findet durch einen verarbeitenden Betrieb statt.

Der von Produktherstellern getroffenen Entscheidung, konventionelle durch biobasierte Werkstoffe zu substituieren, gehen in der Regel diverse Fragestellungen voraus. Die Antworten auf diese Fragen geben darüber Auskunft, inwieweit für den Hersteller eine teilweise oder vollständige Umstellung von fossiler auf biobasierte Grundstoffbasis im konkreten Anwendungsfall sinnvoll erscheint. Gleiches gilt für industrielle Nutzer, die der Entscheidung gegenüberstehen, fossil-basierte Hilfs- und Betriebsstoffe mit biobasierten Pendanten zu ersetzen.

Im Folgenden sind mögliche Fragen, die in einem Entscheidungsprozess hinsichtlich einer Substitution aufkommen könnten, in einem Fragenkatalog zusammengefasst. Dabei werden technische, ökonomische und ökologische Fragestellungen unterschieden.

Fragenkatalog „biobasierter Werkstoff“²⁷

Technische Relevanz

- Können bestehende Produktentwicklungsprozesse beibehalten werden?
- Lässt sich der biobasierte Werkstoff mit den bereits vorhandenen Technologien oder Prozessen verarbeiten?
- Können bereits eingestellte Parameter der Fertigungsmaschinen genutzt werden?
- Ist der biobasierte Werkstoff in einer gewünschten und konstanten Qualität beziehbar?
- Besitzt das biobasierte Produkt mindestens die gleiche oder für den Anwendungsfall ausreichende technische Leistungsfähigkeit?

²⁷ Bei vergleichenden Fragen wird das biobasierte Substitut mit dem fossil-basierten Pendant verglichen.

Wirtschaftliche Relevanz

- Ist die Verfügbarkeit des biobasierten Werkstoffs zu jeder Zeit gegeben?
- Ist der Preis des biobasierten Werkstoffs auf einem vergleichbaren Niveau?
- Sind die Kosten für Neuentwicklung oder Veränderung der Fertigungstechnologie in einem vertretbaren Rahmen?
- Können zusätzliche Investitionen (z. B. Anschaffung neuer Fertigungsmaschinen) vermieden werden?
- Gibt es Abnehmer für das biobasierte Produkt?
- Trägt das biobasierte Produkt zur Verbesserung des Umweltimages des Unternehmens bei?
- Bleibt der Recyclingaufwand gleich?

Ökologische Relevanz²⁸

- Können während des Verarbeitungsprozesses aufgrund der verwendeten biobasierten Werkstoffe Material und/oder Energie eingespart werden?
- Spart das biobasierte Produkt in der Nutzungsphase Material und/oder Energie ein?
- Hat das biobasierte Produkt eine insgesamt bessere ökologische Wirkung?

²⁸ Aus Sicht des effizienten Ressourceneinsatzes.

Fragenkatalog „biobasierter Hilfs-/Betriebsstoff“²⁹**Technische Relevanz**

- Besitzt der biobasierte Hilfs-/Betriebsstoff mindestens die gleichen technischen Eigenschaften?
- Lässt sich der biobasierte Hilfs-/Betriebsstoff in den Fertigungsschritten problemlos einsetzen? Wenn nein:
 - Können bestehende Parameter der Fertigungsverfahren beibehalten werden?
 - Kann das bestehende Equipment (z. B. Behälter oder Pumpen) verwendet werden?
- Ist der biobasierte Hilfs-/Betriebsstoff in der gewünschten und konstanten Qualität beziehbar?
- Ist die korrekte Handhabung des biobasierten Hilfs-/Betriebsstoffs durch Personalschulungen/-hinweise möglich?

Wirtschaftliche Relevanz

- Ist die Verfügbarkeit des biobasierten Hilfs-/Betriebsstoffs zu jeder Zeit gegeben?
- Ist der Preis des biobasierten Hilfs-/Betriebsstoffs auf einem vergleichbaren Niveau?
- Bewegen sich die Kosten hinsichtlich der Integration des biobasierten Hilfs-/Betriebsstoffs in den Produktionsprozess (z. B. Anschaffung neuer Lagerungsbehälter) in einem vertretbaren Rahmen?
- Bleibt der Recyclingaufwand gleich?
- Trägt der Einsatz von biobasierten Hilfs-/Betriebsstoffen zur Verbesserung des Umweltimages des Unternehmens bei?

²⁹ Bei vergleichenden Fragen wird das biobasierte Substitut mit dem fossil-basierten Pendant verglichen.

Ökologische Relevanz³⁰

- Können im Verarbeitungsprozess durch den Einsatz biobasierter Hilfs-/Betriebsstoffe Material und/oder Energie eingespart werden?

³⁰ Aus Sicht des effizienten Ressourceneinsatzes.

3 BOKUNSTSTOFFE

Kunststoffe werden vielseitig eingesetzt und in Produkten für den Industrie- und Konsumbereich verarbeitet. Sie finden bei der Herstellung von Verpackungen, Baumaterialien, Automobilen, Möbeln, Elektrogeräten und Haushaltswaren Anwendung. Das breite Einsatzgebiet ist nicht zuletzt auf die einstellbaren technischen Eigenschaften (Formbarkeit, Elastizität, Festigkeit, Härte, chemische Beständigkeit und Wärmeformbeständigkeit) und die gute Verarbeitbarkeit zurückzuführen.³¹

Kunststoffe, auch als Polymere bezeichnet, sind langkettige und teilweise verzweigte Moleküle auf Kohlenstoffbasis. Bei der Mehrzahl der heute verfügbaren Polymere entstammt der Kohlenstoffanteil einer fossilen Rohstoffquelle. Kunststoffe werden grundsätzlich in Funktions- und Strukturmaterialien unterschieden. Funktionsmaterialien (z. B. Klebstoffe, Lacke oder Verdickungs-/Flockungsmittel) werden überwiegend als Hilfs- und Betriebsstoff im Herstellungsprozess eingesetzt; Strukturpolymere kommen in werkstofflichen Anwendungen zum Einsatz.³²

Biokunststoffe sind biobasierte und/oder bioabbaubare Kunststoffe. Biobasierte Kunststoffe bestehen zu 100 % oder zu einem wesentlichen Anteil aus nachwachsenden Rohstoffen und können biologisch abbaubar oder nicht biologisch abbaubar sein. Weiterhin gibt es noch fossil-basierte Kunststoffe, die biologisch abbaubar sind. (vgl. Abbildung 4).³³

Bereits vor ca. 25 Jahren wurden biologisch abbaubare Kunststoffe entwickelt, die zum Teil auf nachwachsenden Rohstoffen basierten. Die Motivation für die Entwicklungstätigkeiten bestand darin, eine biologische Abbaubarkeit der Kunststoffe zur Schaffung neuer Entsorgungsoptionen zu ermöglichen. Heute werden biobasierte Kunststoffe mit einer hohen Langlebigkeit entwickelt.³⁴

³¹ Vgl. Thielen, M. (2015), S. 4.

³² Vgl. Thielen, M. (2015), S. 4.

³³ Vgl. Thielen, M. (2015), S. 5.

³⁴ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 217.

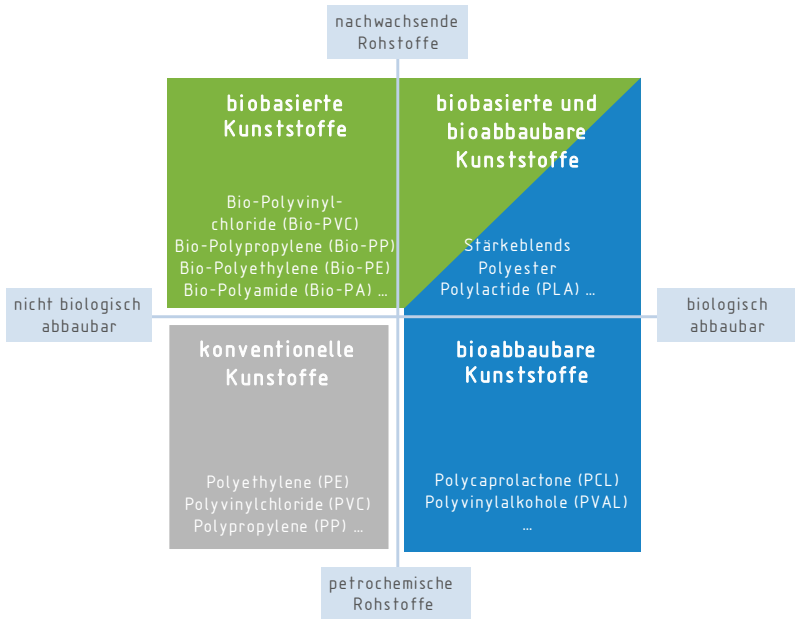


Abbildung 4: Biobasierte und bioabbaubare Kunststoffe³⁵

In Tabelle 1 sind typische Biokunststoffe und ihr aktueller Entwicklungsstand (2012) aufgelistet. Biologisch abbaubare Kunststoffe werden aufgrund ihres Entwicklungsvorsprungs bereits industriell und großtechnisch hergestellt. Die biobasierten und beständigen Kunststoffe hingegen befinden sich noch in der Entwicklungsphase oder werden bereits in kleinen Mengen für den Markt produziert. Ein Entwicklungsschwerpunkt ist es, Herstellverfahren für klassische Kunststoffe wie Polyethylen (PE) oder Polyvinylchlorid (PVC) auf Basis nachwachsender Rohstoffe, sogenannter Drop-in-Biokunststoffe, zu konzipieren.

³⁵ In Anlehnung an Endres, H.-J. und Siebert-Raths, A. (2009), S. 5 und Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 206.

Tabelle 1: Entwicklungsstand biobasierter Kunststoffe (2012)³⁶

	Biokunststoffe	Produktionsmaßstab
Nicht biologisch abbaubar	Bio-PP (B [*]), Bio-PVC (B), Bio-POM (B), PBT (B)	Forschung und Entwicklung ^a
	Bio-PUR (B), Bio-PE (B), Bio-PET (B), Bio-PA (B), PHA (B), PTT (B)	Pilotanlage oder kleintechnische Anlage ^b
Biologisch abbaubar	Abbaubare Polyester (B), Stärkeblends (B), PLA (B)	Großtechnische Anlage ^c
	Celluloseerenerate (B), CA (B), PCL (E ^{**}), PVAL (E)	Industrielle Herstellung ^c

^a kommerziell nicht erhältlich, ^b teilweise kommerziell erhältlich, ^c kommerziell erhältlich

* B = (teil-)biobasiert, ** E = fossil-basiert

Neben der Differenzierung nach ihrer biologischen Abbaubarkeit lassen sich Biokunststoffe aufgrund ihrer chemischen Struktur wie folgt unterteilen:

- Bei **Drop-in-Biokunststoffen** wurde die Rohstoffbasis zumindest teilweise ausgetauscht, aber die Synthesewege sind beibehalten worden. Die hieraus resultierenden biobasierten Kunststoffe verfügen über eine identische oder ähnliche chemische Struktur und weisen ähnliche Verarbeitungs-, Gebrauchs- und Entsorgungseigenschaften wie ihre petrochemischen Pendanten auf. Dadurch können bei der Weiterverarbeitung zu Endprodukten in der Regel die gleichen Maschinen und Verfahren wie bei den fossil-basierten Pendanten benutzt werden. Typische Vertreter für Drop-in-Kunststoffe sind Bio-Polyethylen (Bio-PE), Bio-Polyamid (Bio-PA) und Bio-Polyethylenterephthalat (Bio-PET).^{37, 38}
- Die chemische Struktur **neuartiger Biokunststoffe** weicht deutlich von dem strukturellen Aufbau fossil-basierter Kunststoffe ab. Dies bewirkt in den meisten Fällen andere chemische Eigenschaften. Dadurch können beispielsweise andere Einsatzgebiete erschlossen werden. Allerdings zieht eine andere chemische Struktur auch andere Verarbeitungseigenschaften nach sich, was zu abweichenden Weiterverarbeitungsverfahren

³⁶ Vgl. Endres, H.-J. (2012), S. 96.

³⁷ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 217.

³⁸ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016i).

oder -maschinen führen kann. Polymilchsäure (PLA) ist beispielsweise solch ein neuartiger Biokunststoff.³⁹

Um Informationen über den Anteil nachwachsender Rohstoffe im Biokunststoff zu erhalten, bieten zwei europäische Zertifizierungssysteme (DIN CERTCO, Vincotte) eine erste Orientierung:⁴⁰

- Bei DIN CERTCO (Deutschland) gibt es drei verschiedene Zertifizierungszeichen. Sie werden auf der Basis des Anteils der biobasierten Kohlenstoffmenge im Produkt vergeben: 20 - 50 %, 50 - 85 % und > 85 %. Für dieses Zertifizierungssystem muss demnach eine Mindestmenge von 20 % an biobasiertem Kohlenstoff im Kunststoff vorhanden sein.
- Das Vincotte-Zertifizierungssystem (Belgien) verwendet vier verschiedene Zertifizierungszeichen, die ebenfalls vom Anteil der biobasierten Kohlenstoffmenge im Produkt abgeleitet werden. Die Zeichen sind mit eins bis vier Sternen ausgezeichnet (* = 20 - 40 %, ** = 40 - 60 %, *** = 60 - 80 % und **** = > 80 %). Die zu leistende Mindestmenge an Biokohlenstoff liegt bei diesem System ebenfalls bei 20 %.

3.1 Marktsituation

Biokunststoffe machen derzeit ca. 1 % am gesamten Kunststoffmarkt aus.⁴¹ 2014 wurden weltweit insgesamt 1,7 Mio. t Biokunststoffe hergestellt. Davon nehmen die dauerhaften (nicht abbaubaren) Biokunststoffe (60,9 %) den größeren Anteil im Vergleich mit den abbaubaren Biokunststoffen (39,1 %) ein (vgl. Tabelle 2). In einer aktuellen Marktstudie für Biokunststoffe von 2015 wurde ein Anstieg der gesamten Biokunststoffproduktion für 2016 auf 2,1 Mio. t und für 2017 auf 3,4 Mio. t prognostiziert. Dabei soll der anteilige Zuwachs dauerhafter Biokunststoffe überproportional anstei-

³⁹ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016i).

⁴⁰ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 207.

⁴¹ Vgl. Thielen, M. (2015), S. 50.

gen (z. B. 2018 auf 6,8 Mio. t), wohingegen für abbaubare Biokunststoffe geringere Wachstumsraten geschätzt werden.⁴²

Tabelle 2: Weltweite Produktionskapazität von biobasierten und biologisch abbaubaren Kunststoffen (2014)⁴³

Biokunststoffe	Anteil an den 2014 weltweit produzierten Biokunststoffen (%)
Biobasiert/nicht biologisch abbaubar	gesamt 60,9
Bio-Polyethylenterephthalat (Bio-PET30)	35,4
Bio-Polyethylen (Bio-PE)	11,8
Polytrimethylenterephthalat (PTT)	7,1
Bio-Polyamid (Bio-PA)	5,5
Andere (biobasiert/nicht biologisch abbaubar)	1,1
Biologisch abbaubar	gesamt 39,1
Bioabbaubare Stärkeblends	13,0
Polylactid (PLA)	12,2
Bioabbaubarer Polyester	10,0
Polyhydroxyalkanoat (PHA)	2,0
Celluloseregenerate	1,6
Andere (biologisch abbaubar)	0,3

Bis vor ca. fünf Jahren haben abbaubare Biokunststoffe aus natürlichen Polymermolekülen (z. B. Stärkeblends oder Cellulosederivate) den Biokunststoffmarkt noch dominiert. Mittlerweile wurden sie durch Drop-in-Biokunststoffe abgelöst. Diese weisen die gleichen oder ähnlichen Eigenschaften wie ihre konventionellen Pendanten auf. Der sich hieraus ergebende Vorteil besteht darin, dass Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren nicht in großem Maße modifiziert werden müssen. Typische Vertreter sind Bio-PET, Bio-PE oder Bio-PA. Bio-PET und Bio-PE waren 2014 mit 35,4 % bzw. 11,8 % die weltweit absatzstärksten Biokunststoffe (vgl. Tabelle 2). Die Marktverschiebung wurde u. a. dadurch ausgelöst, dass sich einige internationale Unternehmen aus der Lebensmittelbranche dazu entschlossen haben, Lebensmittelverpackungen teilweise aus Drop-in-Biokunststoffen zu fertigen. Die Drop-in-Biokunststoffe stehen im Markt mit ihren fossilbasierten Verwandten in Konkurrenz.⁴⁴

⁴² Vgl. Aeschelmann, F. und Carus, M. (2015), S. 5.

⁴³ Vgl. Aeschelmann, F. und Carus, M. (2015), S. 6.

⁴⁴ Vgl. Thielen, M. (2015), S. 50.

Biobasierte Kunststoffe werden als Grundstoff für Produkte aus verschiedenen Marktsegmenten verwendet. Mit insgesamt 68 % wurden Biokunststoffe 2014 am häufigsten für harte und weiche Verpackungen eingesetzt. Produktbeispiele hierfür sind: Flaschen, formstabile Tiefziehschalen, Blasfolien für Beutel, Tragetaschen oder Obstnetze und Flachfolien. Außerhalb des Verpackungsbereichs werden biobasierte Kunststoffe beispielsweise für Textilien/Konsumartikel (Stifte, Badezubehör, Staubsauger etc.), Automobile/Transport (Schläuche, Fußmatten, Airbagabdeckung etc.), Gebäude (Stühle etc.) sowie Elektrik und Elektronik (Gehäuse für Computermäuse, Tastaturen, Telefone etc.) verwendet (vgl. Tabelle 3).⁴⁵

Tabelle 3: Weltweite Produktionskapazität biobasierter und biologisch abbaubarer Kunststoffe in Abhängigkeit der Marktsegmente (2014)⁴⁶

Marktsegmente	Anteil an den 2014 weltweit produzierten Biokunststoffen (%)
harte Verpackungen	46,6
weiche Verpackungen	21,2
Textilien	11,0
Konsumartikel	7,4
Landwirtschaft und Gartenbau	6,3
Automobile und Transport	5,5
Gebäude	1,2
Elektrik und Elektronik	0,4
Andere	0,4

3.2 Herstellung

Biokunststoffe werden aus einer Vielzahl primärer pflanzlicher Inhaltsstoffe wie Zucker, Stärke, Cellulose und Pflanzenöle hergestellt und lassen sich in drei Gruppen unterteilen: biobasierte synthetische Polymere, natürliche Polymere und Mischungen (Blends).

- **Biobasierte synthetische Polymere:** Aus den natürlichen Inhaltsstoffen werden fermentativ (biotechnologisch) Zwischenprodukte wie Ethanol, Milchsäure, Fettsäuren oder Lysin erzeugt. Anschließend werden diese Fermentationsprodukte in einer Polymerisationsreaktion chemisch zu Polymeren synthetisiert. Zu dieser Biokunststoff-Gruppe zählen Drop-

⁴⁵ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 219.

⁴⁶ Vgl. Aeschelmann, F. und Carus, M. (2015), S. 15.

in-Kunststoffe (z. B. Bio-PE oder Bio-PA), aber auch neuartige Biokunststoffe wie PLA.⁴⁷

- **Natürliche Polymere:** Aus Zucker oder Stärke werden durch bakterielle Fermentation (Biosynthese) natürliche Polymere wie Polyhydroxyalkanoat (PHA) direkt synthetisiert. Nach der Fermentation werden die Biopolymere aus der Fermentationslösung isoliert, compoundiert und granuliert. Neben der direkten Biosynthese gibt es einen weiteren Verfahrenstyp. Biopolymere wie Stärke oder Cellulose werden entweder fermentativ produziert oder aus Pflanzen direkt durch Extraktion gewonnen, um anschließend noch eine chemische Modifizierung zur Einstellung typischer Eigenschaften zu durchlaufen. Typische Vertreter sind Stärke- oder Cellulosederivate.⁴⁸
- **Mischungen (Blends):** Zur Verbesserung von Eigenschaftsprofilen biobasierter Kunststoffe wurden in den letzten Jahren verschiedene Blends (z. B. Cellulose- und Stärkeblends) entwickelt. Hierbei werden in der Regel zwei verschiedene Biopolymere in einem bestimmten Verhältnis miteinander vermischt. Die meisten Blends basieren auf thermoplastischer Stärke und einem anderen Biokunststoff wie Bio-Polyester oder Cellulosederivat.⁴⁹

Verwendete Rohstoffe und Verfahren zur Herstellung von Biokunststoffen sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Der Einsatz bisher für Biokunststoffe noch nicht genutzter natürlicher Rohstoffe wie von Ligninen und Proteinen wird zurzeit in Forschungs- und Entwicklungsprojekten untersucht. Gleiches gilt für Rest- und Abfallstoffe.⁵⁰

⁴⁷ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 230.

⁴⁸ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 234 ff.

⁴⁹ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 237 f.

⁵⁰ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 223.

Tabelle 4: Rohstoffe und Verfahren zur Herstellung von Biokunststoffen⁵¹

Rohstoff	Zwischenprodukt	Biokunststoff	Polymerart	Herstellungsverfahren
Zucker/ Stärke	Butanol Ethanol Lysin Milchsäure Bernsteinsäure	Bio-Polyethylenterephthalat (Bio-PET) Bio-Polyethylen (Bio-PE) Bio-Polyamid (Bio-PA) Polymilchsäure (PLA) Biopolyester	Biobasierte synthetische Polymere	Chemische Synthese biotechnologisch hergestellter Zwischenprodukte
	-	Polyhydroxyalkanoat (PHA) Polyhydroxybutyrat (PHB)	Natürliche Polymere	Direkte Biosynthese
	-	PLA-Blends Polyester-Blends	Blends	Mischverfahren (Blending)
Pflanzenöle	Fettsäuren Dialkohole Dianime Polyole	Bio-Polyamid (Bio-PA) Bio-Polyurethan (Bio-PUR)	Biobasierte synthetische Polymere	Chemische Synthese biotechnologisch hergestellter Polymerrohstoffe
Stärke	-	Thermoplastische Stärke (TPS) Stärkederivate	Natürliche Polymere	Modifizierung von natürlichen Polymeren
	-	Stärkeblends	Blends	Mischverfahren (Blending)
Cellulose	-	Celluloseregenerate Cellulosederivate	Natürliche Polymere	Modifizierung von natürlichen Polymeren
	-	Celluloseblends	Blends	Mischverfahren (Blending)

3.3 Verarbeitung

Das Eigenschaftsprofil eines biobasierten Polymers wird, genau wie bei konventionellen Polymeren auch, durch Beimischung von Zuschlagstoffen wie Füllstoffen oder Additiven (Farbpigmente, UV-Stabilisatoren, Schlagzäh-Modifikatoren etc.) optimiert. Das erklärte Ziel liegt hierbei darin, das mechanische und/oder thermische Eigenschaftsprofil des Biokunststoffs den Anforderungen an das Endprodukt anzupassen sowie eine optimale Verarbeitung zu ermöglichen.⁵²

Compoundierte Biokunststoffe sind mit unterschiedlichsten Verfahren zu Halbzeugen oder Endprodukten verarbeitbar. Die bereits für konventionelle Kunststoffe verwendeten Verarbeitungsmaschinen oder -anlagen sind in den meisten Fällen auch für die Verarbeitung der Biokunststoffe geeignet.

⁵¹ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 224 und S. 231.

⁵² Vgl. Thielen, M. (2015), S. 29 f.

Allerdings müssen in der Regel die Verarbeitungsparameter wie Temperatur oder Druck angepasst werden.⁵³ Die typischen Weiterverarbeitungsverfahren für Biokunststoffe sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Verarbeitungsverfahren für Biokunststoffe⁵⁴

Verarbeitungsverfahren	Produkte	Bemerkung
Extrusion	z. B. Rohre, Profile, Platten, Folien	Herstellung von Halbzeugen für die Weiterverarbeitung
Blasfolien-Extrusion	z. B. Verpackungen, Müllsäcke, Beutel für Biomüll, Hygienefolien für Windeln, Tragetaschen	Erzeugnisse aus geblasenen Folien
Spritzgießen	z. B. Kugelschreiber, Lineal, Einwegbesteck, Gartenmöbel, Stoßstangen, mechanische Kleinteile, Getränke-kästen	Formteile aller Größen und Formen möglich (häufig eingesetztes Verarbeitungsverfahren)
Blasformen	z. B. Flaschen (Shampoo, Spülmittel etc.), Kanister, Fässer, Tanks	Erzeugnisse aus Hohlkörpern
Thermoformen (Tiefziehen)	z. B. Joghurt- und Margarinebecher, Schalen mit Klappdeckel, Pralinen-schachteleinlagen	Dreidimensionale Formteile aus flächenförmigen Kunststoffhalbzeugen (Folien, Platten)
Schäumen	z. B. PLA-Fleischschalen	Formteile aus stark porösen Schäumen
Fügen	z. B. zusammengefügte Rohre, Verpackungen, Tragetaschen, Säcke	Verbinden thermoplastischer Formteile in der Regel durch Kleben
Gießen	z. B. Folien aus Celluloseacetat	Gegossene Formteile aus nicht thermoplastischen Kunststoffen

Die Anpassung und Optimierung gängiger Verarbeitungsverfahren für Biokunststoffe werden in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht. In der von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. herausgegebenen Broschüre „Verarbeitung von Biokunststoffen – ein Leitfaden“ werden mehrere Projekte und die erzielten Ergebnisse vorgestellt.⁵⁵ Die Informationssammlung enthält viele vertiefende Details zum Themenfeld „Verarbeitung von Biokunststoffen“.

⁵³ Vgl. Thielen, M. (2015), S. 30.

⁵⁴ Vgl. Thielen, M. (2015), S. 30 ff.

⁵⁵ Vgl. IAP, IfBB, SKZ, SLK (2016).

3.4 Anwendung

Herstellung von Bio-Polyethylen (Bio-PE) aus Rohrzucker⁵⁶

Ein brasilianisches Unternehmen führte ein Pilotprojekt zur Herstellung des Drop-in-Biokunststoffs Bio-Polyethylen (Bio-PE) durch. Von einem Zulieferer wurde aus dem nachwachsenden Rohstoff Zuckerrohr (primärer Inhaltsstoff Rohrzucker) das Zwischenprodukt Bio-Ethanol hergestellt. Diese chemische Grundchemikalie dient als Ausgangsstoff für die Bio-Polyethylen-Produktion (vgl. Tabelle 4). Die Bio-Ethanol-Zulieferer müssen die Vorgabe erfüllen, den Biorohstoff umweltverträglich anzubauen.

Beim Zuckerrohranbau wird anstelle eines konventionellen Düngemittels ein Nebenprodukt der Bioethanolherstellung verwendet. Zudem werden die pflanzlichen Reste bei der Zuckerrohrverarbeitung energetisch verwertet. Für die Produktion von 200.000 t Bio-PE braucht das Unternehmen geschätzt ca. 68.000 Hektar Fläche. Dies entspricht 0,02 % des in Brasilien bebaubaren Landes.⁵⁷

Der kommerzielle Vertrieb des Bio-PEs startete 2010. Verbraucher kommen überwiegend aus der Verpackungs- und Automobilindustrie oder sind Hersteller von Kosmetik, Hygieneprodukten, Putzmitteln und Spielzeug.

Die Etablierung von Bio-PE am Markt erweist sich aufgrund des höheren Preises im Vergleich zum fossil-basierten Produkt als herausfordernd. Die Gründe hierfür liegen in den zusätzlichen Kosten bei der Anpassung des bestehenden Herstellungsverfahrens an das biobasierte Produkt sowie den vergleichsweise geringen Produktionsmengen.

Wird die Produktion von fossil-basiertem mit biobasiertem PE verglichen, ergibt sich bei der Produktion von 200.000 t Bio-PE eine Reduktion von CO₂-Emissionen um 850.000 t.⁵⁸

⁵⁶ Vgl. Bilsen, V. et al. (2014), S. 68 ff.

⁵⁷ Vgl. Bilsen, V. et al. (2014), S. 69.

⁵⁸ Vgl. Bilsen, V. et al. (2014), S. 72.

Herstellung von Biokunststoff durch KMU⁵⁹

Ein Kunststoffhersteller aus der Gruppe der kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) hat sich auf die Herstellung von Biokunststoffen auf Basis lokal angebauter Rohstoffe wie Mais, Kartoffeln, Getreide und Rübenzucker spezialisiert. Kooperationspartner verarbeiten den Biokunststoff weiter zu Produkten wie Flaschen, Verpackungsfolien oder Plastiktüten. Der Biokunststoffproduzent stellt den Kunststoffverarbeitern das Wissen über die chemische Zusammensetzung und die Eigenschaften des Biokunststoffs zur Verfügung. Dadurch kann der Verarbeiter den Verarbeitungsprozess optimal anpassen und effizient gestalten.

Im Vergleich zu einer konventionellen Kunststoffflasche werden beim Kauf einer Biokunststoffflasche zwischen 20 % und 65 % CO₂ eingespart.⁶⁰ Allerdings liegt der Energieeinsatz bei der Produktion einer konventionellen und einer biobasierten Flasche aus Kunststoffgranulat auf gleichem Niveau.

Einsatz von Verpackungsmaterial aus Biokunststoff⁶¹

Ein Messgeräte-Hersteller verwendet für die Verpackung seiner Produkte einen Füllstoff aus Biokunststoff, welcher auf dem nachwachsenden Rohstoff Weizen basiert.

Das Füllmaterial ist biologisch abbaubar und somit kompostierbar. Dies ermöglicht eine umweltfreundliche Entsorgung und stößt bei dem Messgeräte-Hersteller und seinen Kunden auf positive Resonanz. Die Kosten und Leistungsfähigkeit des biologisch abbaubaren Füllmaterials sind vergleichbar mit konventionellen Füllstoffen wie Styropor. Nur bei schweren Transportgegenständen kommt zusätzlich zum Biofüllstoff noch Papier zum Einsatz. Aufgrund der praktischen Handhabung des Füllmaterials während des Verpackungsprozesses wird ein Viertel der Verpackungszeit eingespart.

⁵⁹ Vgl. Bilsen, V. et al. (2014), S. 107 ff.

⁶⁰ Vgl. Bilsen, V. et al. (2014), S. 109.

⁶¹ Vgl. Effizienz-Agentur NRW (2008), S. 20.

3.5 Verwertung und Beseitigung

Am Ende der Nutzungsphase von Biokunststoffprodukten ist eine stoffliche oder energetische Verwertung einer Deponierung vorzuziehen, denn im Sinne einer schonenden Ressourcennutzung sollte „sowohl der gespeicherte Kohlenstoff als auch die enthaltene Energie in technischen Kreisläufen recycelt werden“⁶².

Wie Biokunststoffe nach ihrer primären Nutzungsphase verwertet werden, ist von diversen Faktoren abhängig. Dies sind beispielsweise die Art des Produktes und die Materialeigenschaften, die anfallenden Mengen und die verfügbaren Verwertungssysteme.⁶³ Verschiedene „End-of-Life“-Szenarien sind im Folgenden kurz erläutert.

Recycling

Bei einer stofflichen Wiederverwertung (Recycling) werden aus nicht mehr benötigten Produkten Sekundärrohstoffe gewonnen. Es gibt prinzipiell zwei Recyclingarten, das werkstoffliche und das rohstoffliche Recycling.

Werkstoffliches Recycling

Beim werkstofflichen Recycling bleibt der chemische Aufbau (Polymerstruktur) des Werkstoffs unverändert. Die gesammelten Biokunststoffabfälle werden zerkleinert, gereinigt, wiederaufgeschmolzen und regranuliert. Die Reinheit und Qualität des erhaltenen Rezyklatmaterials bestimmen die Produktgruppe, in der das Sekundärmaterial wieder verwendet werden kann.

Voraussetzung für ein werkstoffliches Recycling von petro- und biobasierten Kunststoffen ist eine möglichst sortenreine Sortierung. Da sich verschiedene Kunststoffsorten in Zusammensetzung (Polymerart und Additive) und Eigenschaften unterscheiden, resultiert aus einer Kunststoffmischung ein Mischrezyklat, dessen Eigenschaften sich deutlich von den Primärkunststoffen unterscheiden. Dies mindert in der Regel die Qualität

⁶² Thielen, M. (2015), S. 46.

⁶³ Vgl. European Bioplastics (2016), S. 2.

des erhaltenen Rezyklats und schränkt dessen Anwendungsbereich ein. Dieses „Downcycling“ gilt es zu vermeiden.⁶⁴

Eine Biokunststofffraktion kann im Recyclingprozess konventioneller Kunststoffe zu einem erhöhten Prozessaufwand und einer veränderten Rezyklatqualität führen. Aufgrund des insgesamt noch geringen Marktanteils von Biokunststoffprodukten (vgl. Kapitel 3.1) ist eine getrennte Sammlung derzeit allerdings noch nicht wirtschaftlich.⁶⁵ Die Entwicklung innovativer Sortiertechnologien, die eine Trennung zwischen konventionellen und biobasierten Kunststofffraktionen ermöglichen, würde einen Lösungsansatz bilden.

Eine Ausnahme bei den Herausforderungen des Recyclings von Mischfraktionen bilden Drop-in-Biokunststoffe. Diese können zusammen mit ihren fossil-basierten Pendanten gesammelt und wiederaufbereitet werden.⁶⁶

Das werkstoffliche Recycling von Produktionsabfällen (z. B. Folien-Randbeschnitt) bei der Herstellung biobasierter Produkte ist hingegen gut möglich. Es erweist sich im Sinne eines ressourcenschonenden Umgangs als ausgesprochen sinnvoll, denn das Sammeln sortenreiner Biokunststoffabfälle ist in diesem Fall mit geringem Aufwand zu bewältigen. Der sortenreine Abfall kann direkt zum Beginn des Produktionsprozesses zurückgeführt oder aufbereitet und danach wieder in den Herstellungsprozess gegeben werden.⁶⁷

Rohstoffliches Recycling

Beim rohstofflichen (chemischen) Recycling wird der Biokunststoff in seine chemischen Bausteine (Monomere) zerlegt. Beispielsweise existiert ein Produktionsverfahren, bei dem Polymilchsäure (PLA) in den Grundbaustein

⁶⁴ Vgl. Thielen, M. (2015), S. 47.

⁶⁵ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016j).

⁶⁶ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016j).

⁶⁷ Vgl. Thielen, M. (2015), S. 47.

Milchsäure umgewandelt wird. Die Milchsäure kann wieder für die PLA-Produktion oder für andere Grundstoffe verwendet werden.⁶⁸

Energetische Verwertung

Die energetische Verwertung von (Bio-)Kunststoffen zur Erzeugung von Wärme und Strom stellt die bisher am häufigsten in Europa eingesetzte Verwertungsmethode dar. Dabei werden für fossil- oder biobasierte Kunststoffe die gleichen thermischen Verwertungsverfahren eingesetzt.⁶⁹

Biologische Behandlung

Es gibt bereits einige Anwendungen, bei denen aus einem bestimmten Produktnutzen heraus eine Kompostierung von biologisch abbaubaren Biokunststoffen wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll ist. Bei der Kompostierung wird der bioabbaubare Kunststoff durch Mikroorganismen zu CO₂, H₂O und Mineralstoffen aerob verstoffwechselt. Bei einem Anwendungsbeispiel werden Speisereste zusammen mit dem Catering-Geschirr aus biobasiertem und abbaubarem Kunststoff kompostiert. In einem anderen Anwendungsbeispiel werden Biokunststoff-Clips, die zur Befestigung von Tomatenpflanzen eingesetzt werden, zusammen mit den Grünabfällen auf dem Kompost entsorgt. Weiterhin gibt es bereits biobasierte Mulchfolie, die nach der Ernte einfach untergepflügt und von den Mikroorganismen im Boden zersetzt wird.⁷⁰

⁶⁸ Vgl. Thielen, M. (2015), S. 48.

⁶⁹ Vgl. European Bioplastics (2016).

⁷⁰ Vgl. Thielen, M. (2015), S. 48.

4 BIOVERBUNDWERKSTOFFE

Ein Werkstoff, der aus mindestens zwei miteinander verbundenen Materialien besteht, wird als Verbundwerkstoff bezeichnet. Bioverbundwerkstoffe bestehen aus zwei Hauptkomponenten: einer Kunststoffmatrix und einem Naturstoffanteil. Wenn mindestens eine der beiden Komponenten aus einem nachwachsenden Rohstoff hergestellt wird, wird von einem Bioverbundwerkstoff gesprochen. Der biobasierte Werkstoffanteil liegt in der Regel zwischen 20 % und 90 %.⁷¹ Prinzipiell werden biobasierte Verbundwerkstoffe in zwei Gruppen unterschieden (vgl. Abbildung 5): Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) und Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (WPC).

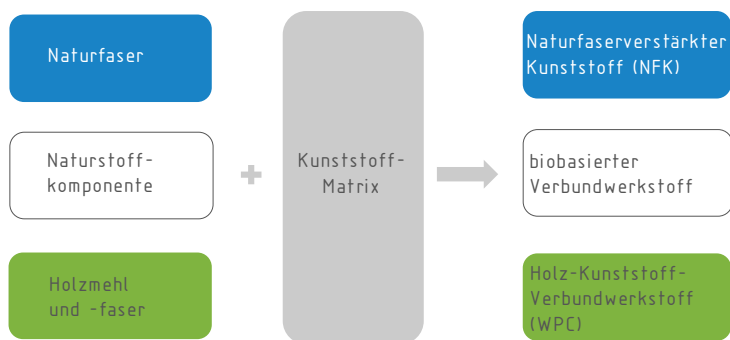


Abbildung 5: Zwei Hauptgruppen der Bioverbundwerkstoffe⁷²

Als Matrix werden sowohl thermoplastische als auch duroplastische Kunststoffe eingesetzt. Thermoplaste lassen sich mehrfach einschmelzen und neu formen und eignen sich daher für eine stoffliche Verwertung am Ende der Nutzungsphase. Hingegen sind Duroplaste nach dem Aushärten nicht mehr formbar. Thermoplastische Kunststoffe sind in diversen Verarbeitungsverfahren wie thermoplastischem Formpressen, Spritzgießen und Extrusion vielfältig verarbeitbar. Dies begründet die größere Verbreitung in

⁷¹ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 226.

⁷² In Anlehnung an Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 6.

Bioverbundwerkstoffen verglichen mit duroplastischen Kunststoffen. Biokunststoffe (vgl. Kapitel 3) finden in Bioverbundwerkstoffen ebenfalls Anwendung. Allerdings ist ihr Anteil bisher gering.⁷³

Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK)

Bei Naturfaserverstärkten Kunststoffen sind Fasern aus Baumwolle, Flachs, Kenaf, Hanf oder anderen Faserpflanzen in die Kunststoffmatrix eingebettet. Ihr Anteil im Werkstoff variiert zwischen 20 % und 45 %.⁷⁴ Darüber hinaus sind als Faserkomponente auch biobasierte synthetische Fasern wie beispielsweise biobasierte Kunststoff- oder Kohlenstofffasern oder cellulosebasierte Chemiefasern möglich. Ihre Eignung für den Einsatz in Verbundwerkstoffen ist zurzeit Gegenstand von Forschungsarbeiten.⁷⁵

Die Kunststoffmatrix wird durch Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), Polycarbonat (PC) und Polyamid (PA) (Thermoplaste) gebildet. Weniger häufig kommen duroplastische Werkstoffe (Phenol- oder Epoxidharze) sowie in seltenen Fällen Biokunststoffe zum Einsatz (vgl. Tabelle 6). Additive werden zur Einstellung bestimmter Materialeigenschaften zugesetzt, die entweder für eine effiziente Verarbeitung (z. B. Haftvermittler zwischen Naturfaser und Kunststoff) oder eine gute Bauteilfunktion (z. B. UV-Beständigkeit) erforderlich sind.

Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (WPC)

Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe bestehen zu unterschiedlichen Anteilen aus lignocellulosehaltigen Materialien (Holzmehl oder Holzfasern), einer Kunststoffmatrix und Additiven. Abhängig von den gewünschten Eigenschaften variiert der Naturstoffanteil zwischen 40 % und 70 %.⁷⁶ Die Kunststoffmatrix besteht in der Regel aus mineralölbasierten Kunststoffen wie Polypropylen (PP), Polyethylen (PE) und Polyvinylchlorid (PVC) (vgl. Tabelle 6). Die Verwendung biobasierter Kunststoffe ist zurzeit noch die Aus-

⁷³ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 9 f.

⁷⁴ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 226.

⁷⁵ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 229.

⁷⁶ Vgl. Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014), S. 226.

nahme. Additive sind auch hier aus denselben Gründen wie bei NFKs erforderlich.

Tabelle 6: Komponenten in Bioverbundwerkstoffen⁷⁷

Bioverbundwerkstoff	Naturstoffkomponente	Kunststoffmatrix	
		Thermoplastisch	Duroplastisch
Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK)	Baumwolle Flachs Kenaf Hanf Jute Sisal	Polypropylen (PP) Polyethylen (PE) Polystyrol (PS) Polycarbonat (PC) Polyamid (PA) Biokunststoffe	Phenolharze Epoxidharze
Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (WPC)	Holz (Mehl und Fasern)	Polypropylen (PP) Polyethylen (PE) Polyvinylchlorid (PVC)	Melaminharz

Sonstige Verbundwerkstoffe

Weiterhin bestehen forschungsseitige Bestrebungen, das Sortiment an Biowerkstoffen zu erweitern. In einem Verbundprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wurden zwischen 2012 und 2015 Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau untersucht. Ziel dabei war die Entwicklung von strukturellen, ressourceneffizienten Leichtbaukomponenten. Die Herausforderung bestand in der richtigen Kombination der verschiedenen Holzschichten (z. B. Birke, Ahorn, Buche) zusammen mit den einlamierten Metall- und Polymerfolien, um die gewünschten Bauteileigenschaften für den Einsatz als Fahrzeugkomponenten zu erzielen. Neben der Erforschung von Einbindungstechnologien zur Integration in die Gesamtfahrzeugstruktur wurden weiterhin Reparatur- und Recyclingkonzepte aufgestellt.⁷⁸

4.1 Marktsituation

Von den in der Europäischen Union 2012 insgesamt produzierten 2,4 Mio. t Verbundwerkstoffen (NFC, WPC, Carbon und Glas) sind 352.000 t (15 %) biobasiert. Davon entfallen 260.000 t auf WPCs und

⁷⁷ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 9 ff.

⁷⁸ Vgl. Böhm, S. (2016).

92.000 t auf NFKs.⁷⁹ Bei WPCs machen Terrassendielen den größten Produktanteil (67 %) aus. NFK-Produkte hingegen werden fast ausschließlich für den Automobilbereich (98 %) produziert (vgl. Tabelle 7)

Tabelle 7: Produzierte Mengen an WPC und NFK in der Europäischen Union differenziert nach Anwendungsfeldern (2012)⁸⁰

Verbundwerkstoff	Anwendungsfelder	Menge [t]
Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK)	Automobil	90.000
	Andere	2.000
Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (WPC)	Terrassendielen	174.000
	Automobil	60.000
	Fassadenverkleidungen	16.000
	Technische Anwendungen	5.000
	Möbel	2.500
	Konsumgüter	2.500

Naturfaserverstärkte Kunststoffe weisen kein Alleinstellungsmerkmal bezüglich ihrer technischen Eigenschaften auf. Deshalb ersetzen sie keine etablierten Werkstoffe, sondern tragen zur Ergänzung des Werkstoffspektrums bei. Dennoch ist es bemerkenswert, in welcher Varianz und Vielzahl Faserverbundwerkstoffe und ihre Produktionsverfahren in den letzten beiden Dekaden entwickelt wurden. Einige dieser neuen Werkstoffe und Verfahren sind aus technischer Sicht schon weit entwickelt. Ihre Marktpreise liegen im selben Preisniveaubereich wie jene der etablierten Werkstoffe. Dies ist damit zu begründen, dass mit zunehmendem Erfahrungspotenzial, Bekanntheits- und Bewährungsgrad die Anzahl der Anwendungsfelder und Substitutionsmöglichkeiten ansteigt. Dies führt zu höheren Stückzahlen und damit zu reduzierten Marktpreisen.⁸¹

Die Steigerung von NFK-Marktanteilen ist von verschiedenen Faktoren und Zusammenhängen abhängig. Einige sind im Folgenden genannt:⁸²

- Neben den am Markt etablierten Bioverbundwerkstoffen gibt es viele andere, die technisch noch nicht so ausgereift sind, als dass sie sich am

⁷⁹ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 35.

⁸⁰ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 35.

⁸¹ Vgl. Carus, M. et al. (2008), S. 152.

⁸² Vgl. Carus, M. et al. (2008), S. 152 f.

Markt behaupten könnten. Ihre Eigenschaften und Herstellungsverfahren müssen für eine Marktetablierung weiter optimiert werden.

- Oftmals liegen unzureichende Informationen bezogen auf die Werkstoffeigenschaften und das Werkstoffverhalten während der Bearbeitung vor. Der Hersteller oder Anbieter sollte diese Informationen generieren und dem Anwender bereitstellen.
- Anbieter von Bioverbundwerkstoffen sind oftmals kleine Unternehmen, die in großen Industriebetrieben nicht bekannt sind. Eine Kooperation mit bereits etablierten Werkstoffanbietern könnte den Bekanntheitsgrad sowie die Akzeptanz des Anbieters in der Industrie erhöhen.
- In manchen Branchen (z. B. Automobil- oder Elektroindustrie) sind konkrete Qualitätsvorgaben einzuhalten. Die damit verbundenen Materialfreigaben bezüglich technischer Eigenschaften, Art und Menge möglicher Emissionen, Recyclingfähigkeit, Brandverhalten etc. erweisen sich als zeit- und kostenaufwendig. Kleine Unternehmen sind hierbei oftmals überfordert und stoßen an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit.

4.2 Herstellung

Grundsätzlich werden fünf verschiedene Herstellungsverfahren unterschieden. Form- und Fließpressen, Spritzgießen sowie Resin-Transfer-Moulding-Verfahren (RTM) kommen überwiegend bei der Herstellung von NFKs zum Einsatz, wobei Formpressen das etablierteste und am häufigsten eingesetzte Verfahren darstellt. WPCs hingegen werden zu 81 % durch Extrusion gefertigt, 13 % entfallen auf Formpressen und 6 % auf Spritzgießen.⁸³

Formpressen⁸⁴

Mit diesem Herstellungsverfahren werden einfach strukturierte, dreidimensionale Bauteile geformt. Im ersten Schritt wird ein Halbzeug aus Naturfaservlies oder -filz hergestellt. Dieses wird zusammen mit dem ausge-

⁸³ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 21 ff. und S. 27.

⁸⁴ Abschnittsinhalte vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 21 ff.

wählten Kunststoff (thermo- oder duroplastisch) in ein Formpresswerkzeug gegeben und durch gezielte Temperatur- und Druckeinwirkung zum gewünschten Bauteil gepresst. Die Qualität der Fasermatte (Faserlänge und -ausrichtung; Gleichmäßigkeit der Vliesstruktur etc.) ist mitentscheidend bei der Werkstoffqualität. Nach dem Pressen wird das Bauteil aus der Form gelöst, die entstandenen Ränder werden entfernt.

In der europäischen Automobilindustrie eingesetzte Formpressteile aus Bioverbundwerkstoff besitzen zu 55 % eine thermoplastische und zu 45 % eine duroplastische Matrix. In Abhängigkeit vom verwendeten Kunststoff wird das Herstellungsverfahren in thermoplastisches und duroplastisches Formpressen differenziert.

- **Thermoplastischer Matrixwerkstoff:** Im One-step-Verfahren werden Hybrid-Nadelfilze, bestehend aus Natur- und Polypropylenfasern, auf 175 ± 5 °C erhitzt und in eine Formpresse überführt. Nach der Formgebung werden die Ränder des Verbundwerkstoffs mit einem Laser beschnitten. Vorteil des Verfahrens ist die Integration von zusätzlichen Materialien wie Dekorteilen und Soft-touch-Oberflächen in einem Arbeitsschritt und ohne Verwendung zusätzlicher Klebstoffe.
- **Duroplastischer Matrixwerkstoff:** In die passende Form geschnittene Naturfaserhalbzeuge werden mit einem duroplastischen Kunststoff von jeder Seite beschichtet und anschließend in einer Metallform bei 20 bar und 120 °C verpresst. Dabei entstehen Verbundwerkstoffe mit einem Faseranteil von zwischen 40 % und 70 %. Die Wanddicken liegen zwischen 1,5 und 2 mm.

Fließpressen

Aus Naturfasern oder Naturfaserhalbzeugen (Vliesen oder Filzen) sowie einem thermo-/duroplastischen Kunststoff wird eine Pressmasse erzeugt und in das Presswerkzeug gegossen. Komplexe Bauformen sind durch das Fließen und gleichmäßige Verteilen der Faser-Kunststoffmasse in der Werkzeugform möglich.

Thermoplastische Pressmassen werden auf ca. 180 °C erhitzt und härten beim Abkühlen aus. Duroplastische Pressmassen hingegen reagieren bei

Drücken von 65 ± 5 bar und bei Temperaturen zwischen $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ und härten in der Werkzeugform aus.⁸⁵

Spritzgießen⁸⁶

Bisher dominierten die Form- und Fließpresstechnikverfahren bei der NFK-Herstellung (über 95 % in 2012). In letzter Zeit gab es verschiedene Entwicklungsarbeiten hinsichtlich serienreifer Anwendungen im Bereich Naturfaser-spritzgießtechnik. Energiebedarf und Zykluszeit werden als gering eingestuft. Ein großes Einsatzgebiet für dieses Herstellungsverfahren wird im Automobilbereich vermutet.

Aus Naturfasergranulat wird in einem Plastifizierungsprozess durch Zuführung thermischer und mechanischer Energie eine Formmasse erzeugt, die zu einem passgenauen Formteil spritzgegossen wird. Eine Nacharbeit ist gar nicht oder nur in geringem Maße notwendig.

Im Durchschnitt enthält spritzgießfähiges Naturfasergranulat 65 % thermoplastischen Kunststoff (i. d. R. Polypropylen), 35 % Naturfaser und 5 % Additive. Es wird im Extruder bei $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ aus den Einzelkomponenten hergestellt. Als herausfordernd zeigen sich hierbei die gleichmäßige Zufuhr und Verteilung der Faserkomponente (Naturfaser, Naturfaserbänder oder Naturfaserpellets) in die Kunststoffschmelze und das daraus resultierende Granulat. Mit den bisherigen Verfahrensentwicklungen und -optimierungen sind beachtliche Fortschritte erzielt worden. Somit können auch lange Naturfasern verarbeitet werden. Zurzeit sind Naturfaser-spritzgussteile nur dann wirtschaftlich, wenn sie mit bestehenden Spritzgussmaschinen hergestellt wurden. Eine Vielzahl von Naturfaser-spritzgussprodukten steht vor der Markteinführung.⁸⁷

RTM-Verfahren

Bei der Anwendung des RTM-Verfahrens wird ein Naturfaservlies/-filz in einer spezifischen Form ausgelegt. Anschließend wird eine Harzmasse auf

⁸⁵ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016g).

⁸⁶ Abschnittsinhalte vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 30 f.

⁸⁷ Vgl. Diepenbrock, W. (2014), S. 246.

das ausgelegte Naturfaserhalbwerkzeug aufgetragen. Nach dem Aushärten wird die erzeugte Form aus dem Herstellungswerkzeug entnommen.⁸⁸

RTM-Verfahren wurden bisher nur für Kleinserien angewendet. Es bestehen allerdings Bestrebungen, das Verfahren auch für größere Serien einzusetzen.⁸⁹

Extrusion⁹⁰

Zunächst wird die Holzkomponente aufbereitet. Dabei bestimmen Mahlgrad, Fraktionierung und Feuchtegehalt über die Qualität des Verbundwerkstoffs. Das trockene Holzmehl wird anschließend mit der Kunststoffkomponente zusammen mit Additiven unter Wärmeeinfluss vermischt. Das erhaltene Holz-Kunststoff-Additiv-Gemisch wird mit einem Druck von 100 bis 300 bar durch eine formgebende Austragsdüse gedrückt. Die erhaltene Form erstarrt beim Austritt aus der Düse.

Es gibt zwei Verfahrensvarianten: Beim einstufigen Verfahren werden die Komponenten direkt gemischt und nachfolgend extrudiert. Dabei erfolgt nur einmal eine Wärmebehandlung, was zu einer Schonung der Einsatzstoffe führt. Bei einem zweistufigen Extrusionsverfahren werden in einem ersten Schritt WPC-Granulate hergestellt. Der WPC-Produkthersteller fertigt diese Granulate selbst an oder erwirbt diese als fertige Mischungen. Im zweiten Schritt werden die Granulate geschmolzen und zum Profil extrudiert. Bei dem zweistufigen Verfahren können die Materialeigenschaften exakter eingestellt werden. Zudem ist eine flexible Zeitplanung möglich.

4.3 Eigenschaften

NFKs weisen technische Eigenschaften (vgl. Tabelle 8) auf, die sie von etablierten, konventionellen Verbundwerkstoffen unterscheiden und für

⁸⁸ Vgl. Carus, M. et al. (2008), S. 145.

⁸⁹ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 33.

⁹⁰ Abschnittsinhalte vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 27 f.

eine industrielle Weiterverarbeitung interessant machen:⁹¹

- Eine **hohe Festigkeit und Steifigkeit** machen den Werkstoff für eine Vielzahl von Bauteilen und Produkten interessant. Hohe Festigkeiten werden durch schlanke Naturfasern hervorgerufen.
- Die niedrige Dichte der Naturfasern sorgt im Vergleich zur konventionellen Alternative (zumeist glasfaserverstärkte Kunststoffe) für ein **geringeres Gewicht**.
- **Höhere Einsatztemperaturen** und eine bessere **Temperaturwechselbeständigkeit** gegenüber nicht verstärkten Kunststoffen ermöglichen NFKs ein breites Einsatzspektrum. Resultierend aus der Beständigkeit der pflanzlichen Anteile ist die maximale Verarbeitungstemperatur allerdings auf 200 °C beschränkt. Bei tiefen Temperaturen hingegen neigen die NFKs nicht zu sprödem Verhalten.
- Im Vergleich zu konventionellen Verbundwerkstoffen besitzen NFKs eine **geringere Splitterneigung**.
- Zudem zeichnet NFKs eine **geringere Abrasion** bei der maschinellen Verarbeitung verglichen mit glasfaserverstärkten Kunststoffen aus.
- NFKs lassen sich gut verarbeiten. Beispielsweise weisen Polypropylen-Naturfaser-Bauteile eine **gute Verschweißbarkeit** bei einem minimalen Einsatz an Klebstoff auf.
- Zudem haben biobasierte Faserverbundwerkstoffe gute **akustische Eigenschaften** (z. B. Dämpfungseigenschaften).
- In vielen Kategorien zeigen NFKs eine **günstigere Ökobilanz** im Vergleich zu glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffen. Dies resultiert vor allem in einem geringeren Energiebedarf und niedrigeren CO₂-Emissionen.

⁹¹ Vgl. Carus, M. et al. (2008), S. 133 f.

Tabelle 8: Eigenschaften von zwei typischen NFK-Formpressteilen⁹²

Eigenschaft	NF-EP	EcoCor
Naturfaseranteil	65 % (Flachs : Hanf 50 : 50)	50 % (Bastfasern)
Kunststoffmatrix	Duroplast (Epoxid)	Thermoplast (Polypropylen)
Dichte [g/cm ³]	0,8 - 0,85	0,86 - 0,9
Biegefestigkeit [N/mm ²]	50 - 70	45 - 55
Biege-E-Modul [N/mm ²]	4.000 - 5.000	2.300 - 2.700
Zugfestigkeit [N/mm ²]	40 - 50	25 - 30
Schlagzähigkeit [MJ/mm ²]	14 - 20	25 - 35
Fogging [mg]	0,2 - 0,6	0,3 - 0,9

Ökologische Bewertung von NFKs

In einer Meta-Analyse von 2011 wurden Ökobilanzstudien zu Formpressteilen aus (Hanf-)Faserbundwerkstoffen analysiert. Alle untersuchten Studien zeigten eine deutliche Reduzierung des kumulierten Energieaufwands zwischen 25 % und 75 % bei der Herstellung von Hanffaser-Formpressteilen (vgl. Abbildung 6). Zudem werden auch weniger Treibhausgase freigesetzt. Die Einsparungen liegen zwischen 12 % und 55 %. Wird der Speichereffekt der Naturfasern bezüglich des Kohlendioxids mit einbezogen, beläuft sich die Treibhausgasreduktion sogar auf Werte zwischen 28 % und 74 %.⁹³

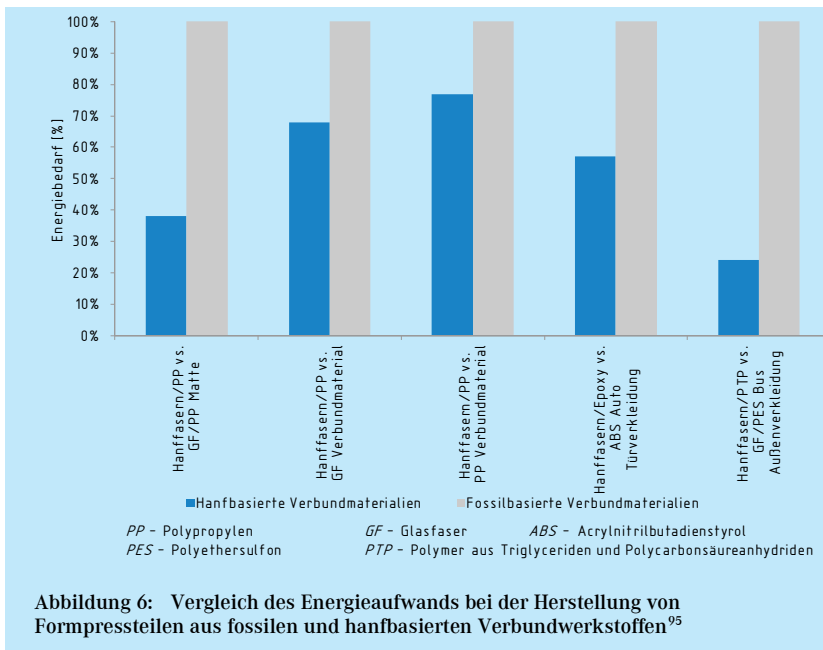
Aufgrund des geringeren Bauteilgewichts, verglichen mit konventionellen Verbundwerkstoffen, kann während der Nutzungsphase in Kraftfahrzeugen der Kraftstoffverbrauch reduziert werden.⁹⁴

Nach der Nutzungsphase des biobasierten Verbundwerkstoffs sollten Verwertungs- und Beseitigungsstrategien angestrebt werden, die zu geschlossenen Kreisläufen führen. Dadurch sind der enthaltene natürliche Kohlenstoff sowie die gespeicherte Energie über einen großen Zeitraum nutzbar.

⁹² Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016f).

⁹³ Vgl. Haufe, J. und Carus, M. (2011), S. 17.

⁹⁴ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 25.



NFKs werden meist in einem endkonturnahen Herstellungsprozess gefertigt. Daher fällt das Bearbeitungsvolumen im Vergleich zum Gesamtvolumen gering aus. Bei der Auswahl von Bearbeitungsverfahren ist das mechanische und thermische Werkstoffverhalten entscheidend. Bestimmt wird das Werkstoffverhalten während der Bearbeitung (z. B. spanende Verfahren wie Fräsen, Drehen oder Bohren) durch die im Verbund verwendete Faserart. Das Werkstoffverhalten muss experimentell bestimmt werden.⁹⁶

4.4 Anwendung

Die Gruppe der WPCs macht den größten Anteil der weltweit verarbeiteten Biowerkstoffe aus. WPCs werden vor allem im Bau sowohl innen als auch außen eingesetzt und ersetzen oftmals (Tropen-)Holz. Bekannte Einsatzgebiete sind Terrassendielen (79 % in 2012, Europa) und Bauteile für den

⁹⁵ In Anlehnung an Haufe, J. und Carus, M. (2011), S. 17.

⁹⁶ Vgl. AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. [Hrsg.] (2010), S. 502 f.

Fahrzeuginnenraum (13 % in 2012, Europa). Zudem gibt es Anwendungen für Fassadenverkleidungen, technische Profile und Konsumgüter.⁹⁷

NFKs substituieren in der Regel Verbundwerkstoffe mit nicht biobasierten Fasern wie Glasfaser- oder Kohlefaserverbundwerkstoffe. NFK-Bauteile sind leicht und mechanisch stark belastbar. Diese Eigenschaften machen die Werkstoffmaterialien interessant für die Automobilindustrie. Typische serienreife Anwendungen sind Fahrzeuginnenausstattungen wie Hutablagen, Armaturenbretter, Reserveradmulden, Türinnen- und Säulenverkleidungen sowie Kofferraumauskleidungen. Bauteile für den Außenbereich sind größeren mechanischen, witterungsbedingten und korrosiven Beanspruchungen ausgesetzt. Nach diversen Entwicklungsarbeiten liegen auch für diesen Anwendungsbereich bereits erste in Serie produzierte Bauteilgruppen (z. B. Unterboden) vor.⁹⁸

In Europa wurden 2012 insgesamt 150.000 t Bioverbundwerkstoffe im Automobilbereich verwendet.⁹⁹ Gegenüber den konventionellen Verbundwerkstoffen setzen sich naturfaserverstärkte Kunststoffe in der industriellen Anwendung durch, wenn Werkstoffkosten und -funktion den Bauteilanforderungen entsprechen. Spezifische Vorteile von Faserverbundwerkstoffen während der Nutzungsphase sind ein günstiges Crash-Verhalten sowie ein geringes Flächengewicht. Die Verarbeitung kann durch einfache und kosteneffiziente Prozesse (auch bei kleinen Stückzahlen) geleistet werden. Faserverbundwerkstoffe sind im Vergleich zu anderen Werkstoffmaterialien teurer. Allerdings können Bauteile aus Naturfaserverbundwerkstoffen effizient hergestellt werden. Die Herstellungsverfahren vereinen in der Regel mehrere Arbeitsschritte in einem. Daher sind die Systemkosten für das komplette Bauteilprodukt konkurrenzfähig mit Bauteilen aus konventionellen Werkstoffen.¹⁰⁰

⁹⁷ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 40 f.

⁹⁸ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 21.

⁹⁹ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 36.

¹⁰⁰ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 37.

Anwendungsbeispiele

Einsatz von Naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK) für Innenraumkomponenten im Automobilbau¹⁰¹

Ein Unternehmen stellt aus naturfaserverstärktem Kunststoff serienmäßig Innenraumkomponenten für Fahrzeuge im Spritzgießverfahren (z. B. Innenverkleidungen und Trägerstrukturen) und Werkzeugkomponenten wie Schleifscheiben her. Zum Teil sind die für die NFK-Herstellung verwendeten Rohstoffe regional produziert und verarbeitet. Als Naturfaser wird Hanf eingesetzt.

Entscheidende Faktoren für die Substitution von glasfaserverstärkten und fossil-basierten Kunststoffen durch naturfaserverstärkte Kunststoffe sind die Preishöhe des Substituts, die geforderten Produkteigenschaften und eine gewünschte Umweltverträglichkeit. Bei Innenraumverkleidungen und Fächerschleifscheiben wurden die Entscheidungskriterien erreicht. Diese Produkte werden serienmäßig aus NFK hergestellt.

Die Innenraumverkleidungen zeichnen sich durch ein geringes Gewicht und eine hohe Formstabilität aus. Fächerschleifscheiben verfügen über eine erhöhte Festigkeit bei reduzierter Bruchdehnung und Schlagzähigkeit. Dies ermöglicht eine Anwendung bei hoher Umdrehungszahl. Zudem ist keine Spezialentsorgung wie beim konventionellen Pendant notwendig und es entstehen keine gesundheitsschädlichen Glasfaserstäube.

BIOCONCEPT-CAR – Leichtbaukarosserie aus Pflanzenfasern¹⁰²

Ein Leuchtturmprojekt im Hinblick auf Biowerkstoffe ist das BIOCONCEPT-CAR. Den Projektbeteiligten ist es unter der Federführung des Instituts für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (IfBB) gelungen, den Anteil an biobasierten Werkstoffbauteilen in einem Rennwagen zu erhöhen. Die deutliche Reduktion des Fahrzeuggewichts durch die Verwendung von Bioverbundwerkstoffen bei Fahrzeugaußenbauteilen war dabei das erklärte

¹⁰¹ Vgl. Effizienz-Agentur NRW (2008), S. 16 f.

¹⁰² Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2013), S. 4 f.

Ziel. Zudem sollte die Werkstoffmatrix aus biobasiertem Kunststoff bestehen.

Am Ende der Entwicklungsphase wurden großflächige Karosserieteile wie Motorhaube, Tür, Heckklappe, Dach-/Heckspoiler, Unterbodenabdeckung aus biobasiertem Duroplast mit Leinenfasern gefertigt. Während der Bauteilentwicklungsphase war neben dem Testen verschiedener Materialkonzepte eine flexible bauteilspezifische Verarbeitung ein Untersuchungsschwerpunkt. Dabei wurde ermittelt, inwieweit gängige Maschinen und Verfahren für Bioverbundwerkstoffe einsetzbar sind, denn ein Anreiz für das Verwenden einer neuen Werkstoffgeneration stellen die geringen Investitionskosten dar. Erfolgreich durchgeführt wurden die Untersuchungen mit einer branchenbekannten Extruder- und Spitzgussmaschine.

Als Ergebnis der Entwicklungsarbeit wurde eine erhebliche Gewichtseinsparung am Fahrzeug erzielt. Allein durch Substitution von Stahl durch einen Bioverbundwerkstoff bei Türen, Motorhaube und Heckklappe wurde eine Gewichtsreduktion von 67 kg erreicht. Bei einem Bauteil konnte durch das Substitut das Gewicht um 60 % reduziert werden.¹⁰³ Die deutliche Gewichtseinsparnis führt in der Nutzungsphase zu einem geringeren Verbrauch und damit zu einem niedrigeren CO₂-Ausstoß bei Verbrennungsmotoren oder einer größeren Reichweite bei Elektrofahrzeugen. Neben den erwähnten Vorteilen gegenüber Stahlbauteilen sind weiterhin die Fragen nach Crash-Verhalten und Reparaturmöglichkeiten zu klären.

Ein biobasierter Faserverbundwerkstoff weist gegenüber einem fossilbasierten Verbundwerkstoff einen signifikanten Kostenvorteil auf. Die Kosten für Leinenfasern lagen bei ca. 2,50 Euro/kg und für Kohlefasern bei ca. 30 Euro/kg.¹⁰⁴

¹⁰³ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2013), S. 4.

¹⁰⁴ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2013), S. 4.

Bleistift aus einem Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoff (WPC)¹⁰⁵

Ein Unternehmen aus der Büroartikel-Branche produziert einen marktreifen Bleistift mit einem Schaft aus einem extrudierten Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoff, dessen Holzanteil bei 70 % liegt. Der Herstellungsprozess weist im Vergleich zu jenem von konventionellen Bleistiften Vorteile auf. Die Prozesskette des Erzeugungsprozesses ist deutlich verkürzt. Zudem wurde der Energieeinsatz verringert und der Rohstoff Holz ausgesprochen effizient eingesetzt. Zum einen entstammen die Holzfasern aus zertifiziertem Sägerestholz, zum anderen konnte der Holzverschnitt um bis zu 80 %, verglichen mit konventionellen Prozessen, reduziert werden.

4.5 Verwertung und Beseitigung

Bioverbundwerkstoffe weisen in der Regel eine hohe Langlebigkeit auf. Daher werden sie auch in Produkten eingesetzt, die eine hohe Lebensdauer erfordern.

Ist eine Wiederverwendung nicht (mehr) möglich, so können biobasierte Verbundwerkstoffe energetisch verwertet werden. In der Regel ist die energetische Nutzung einmalig und nicht reversibel. Hingegen bietet das stoffliche Recycling („internal recycling“¹⁰⁶ und „end-of-life recycling“) den Vorteil der Rohstoffeinsparung. Daraus ergeben sich ökonomische und ökologische Vorteile. Zurzeit werden im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben die technischen Rahmenbedingungen für eine effiziente stoffliche Nutzung untersucht.¹⁰⁷

Beim stofflichen Recycling werden aus gebrauchten Bioverbundwerkstoffen durch Mahlen, Aufschmelzen und erneutes Extrudieren Reggranulate hergestellt. Hierfür muss die Kunststoffmatrix aus einem einschmelzbaren Kunststoff (Thermoplast) bestehen.¹⁰⁸ Die während des Rezyklierungsprozesses zum Teil vorkommenden Schädigungen des Fasermaterials fallen bei Naturfasern verglichen mit konventionellen Fasern aus Carbon oder

¹⁰⁵ Vgl. Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015), S. 29.

¹⁰⁶ Entspricht Produktionsabfall-Recycling.

¹⁰⁷ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014b).

¹⁰⁸ Vgl. Fraunhofer-Institut für Holzforschung (2016).

Glas erheblich geringer aus. Im Aufbereitungsprozess können letztgenannte Fasern deutlich eingekürzt werden. Die verkürzten Fasern können die Qualität der Verbundmaterialien negativ beeinflussen.¹⁰⁹

Eine weitere Form der stofflichen Verwertung ist rohstoffliches Recycling durch Kompostierung. Dies ist möglich, wenn der biobasierte Werkstoff bei definierten aeroben Bedingungen und innerhalb eines bestimmten Zeitraums vollständig biologisch abgebaut wird.¹¹⁰ Voraussetzung dafür ist eine Kunststoffmatrix aus kompostierbaren Polymeren. Diese müssen nicht zwangsläufig aus einer biobasierten Rohstoffquelle entstammen, da ihre Kompostierbarkeit von der Polymerstruktur und nicht von der Rohstoffquelle abhängt.

Die Voraussetzung für eine stoffliche und energetische Verwertung ist ein zuverlässiger Sortierprozess. Grundsätzlich können moderne Sortieranlagen biobasierte Verbundwerkstoffe von anderen Fraktionen trennen. Für eine sichere und effiziente Trennung sind allerdings eine Nach- und Umrüstung erforderlich, die sich jedoch erst ab einer Mindestmenge als wirtschaftlich erweisen.¹¹¹

¹⁰⁹ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014b).

¹¹⁰ Vgl. DIN SPEC 33928:2011.

¹¹¹ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014b).

5 BIOSCHMIERSTOFFE

Schmierstoffe finden als Hilfs- und Betriebsstoffe im industriellen Umfeld ein großes Einsatzgebiet. Sie verringern die Reibung und den Verschleiß von Bauteilen, sorgen für Kühlung und Korrosionsschutz, weisen eine Dichtwirkung auf und werden zur Kraftübertragung eingesetzt. Ihr Einsatzbereich ist vielfältig und erstreckt sich von der Industrie (z. B. Fertigungsanlagen, Maschinen für spanende Bearbeitung, Pumpen) über die Forst- und Landwirtschaft (z. B. Kettensägen, Hydraulikanlagen) bis hin zu Gebäuden (z. B. Aufzüge, Türscharniere). Ihr Einsatz in der industriellen Produktion führt zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Beispielsweise wird durch ihren Einsatz der Energieverbrauch von Maschinen und Anlagen reduziert und dadurch deren Lebensdauer erhöht.¹¹²

Die Forderung des Marktes nach einer nachhaltigen Herstellung und Nutzung von Schmierstoffen gewann in den letzten Jahren an Bedeutung. Bioschmierstoffe entsprechen diesen Anforderungen: Sie sind schnell biologisch abbaubar, nicht toxisch und gelten generell als umweltfreundlich. Zurzeit sind über 500 verschiedene Produkte auf dem Markt verfügbar.¹¹³

Die Silbe „Bio“ wird im Schmierstoffbereich vielfältig gebraucht und ist abhängig von der Rohstoffherkunft und der biologischen Abbaubarkeit (vgl. Abbildung 7). Mit der im Oktober 2011 veröffentlichten DIN SPEC 51523¹¹⁴ wurde ein erster Schritt hin zu einer einheitlichen Definition vollzogen. Aus den veröffentlichten Mindestanforderungen für Bioschmierstoffe wurden drei Kriterien abgeleitet, die alle drei zutreffen müssen. Ein Schmierstoff erhält die Vorsilbe „Bio“, wenn dieser

- einen Anteil von mindestens 25 % an nachwachsenden Rohstoffen aufweist,
- zu mehr als 60 % biologisch abbaubar ist und

¹¹² Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 4.

¹¹³ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016a).

¹¹⁴ Vgl. DIN SPEC 51523:2011-10.

- nachweislich keine Gefährdung für die Umwelt darstellt.¹¹⁵

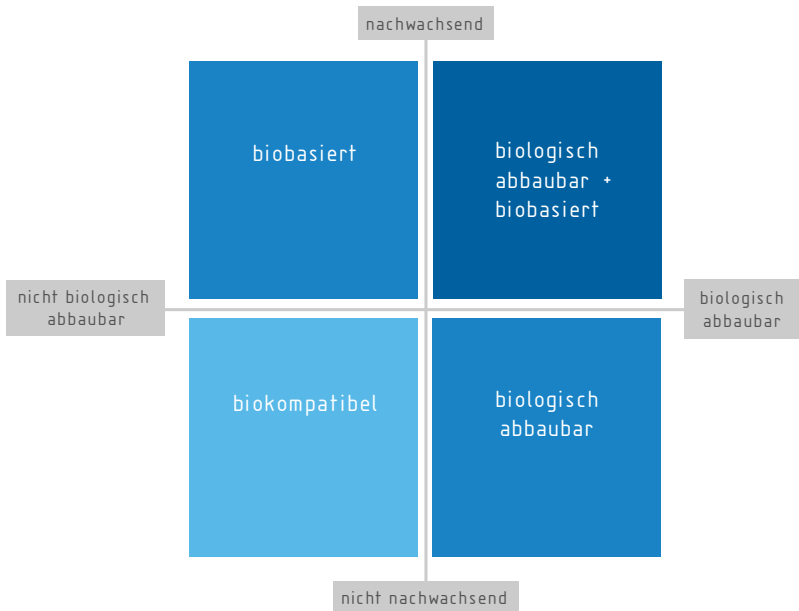


Abbildung 7: Bedeutung von „Bio“ im Schmierstoffbereich¹¹⁶

Diverse europäische Umweltsiegel zeigen das Erfüllen dieser Kriterien an: Swedish Standard (Hydraulic oils [SS 15 54 34], Lubricating Greases [SS 15 54 70]), Nordic Swan, Blauer Engel (biologisch schnell abbaubare Hydraulikflüssigkeiten [RAL-UZ 79], biologisch schnell abbaubare Schmierstoffe und Schalöle [RAL-UZ 64]) und EU-Umweltzeichen.¹¹⁷

5.1 Marktsituation

Eine Million Tonnen umfasste der Gesamtmarkt an Schmierstoffen im Jahr 2011 in Deutschland. Davon entfielen 18.510 t (1,8 %) auf das Segment Bioschmierstoffe.¹¹⁸ In den letzten zehn Jahren wurde ein durchschnittli-

¹¹⁵ Vgl. DIN SPEC 51523:2011-10.

¹¹⁶ In Anlehnung an Böttger, M. (2014), S. 456.

¹¹⁷ Vgl. Böttger, M. (2014), S. 459.

¹¹⁸ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2015a), S. 25.

ches Wachstum von 2 % bis 4 % pro Jahr beobachtet. Dieses wird auch für die kommenden zehn Jahre prognostiziert.¹¹⁹ Der Anteil an Bioschmierstoffen in den jeweiligen Produktgruppen ist in Tabelle 9 aufgeführt. Hydrauliköl stellt mit 10.000 t das größte Marktsegment bei den Bioschmierstoffen. Sägeketten- und Schalöle erreichen mit 50 % bzw. 38 % den größten Anteil am Gesamtmarkt der jeweiligen Produktgruppe.

Tabelle 9: Produzierte Gesamtmenge von Bioschmierstoffen in Deutschland (2011) und ihr Anteil in den jeweiligen Produktgruppen¹²⁰

Produktgruppe	Mengen [t]	Anteil [%]	
		Bioschmierstoffe	Produktgruppe
Hydrauliköle	10.000	33,6	7,6
Metallbearbeitungsöle	5.000	16,8	9,2
Sägeketten- und Sägegatteröle	4.500	15,1	50,0
Schalöle	3.800	12,8	38,0
Schmierfette	2.500	8,4	6,1
Getriebeöle	2.000	6,7	1,9
Motorenöle	2.000	6,7	0,7

Der Marktanteil biobasierter Schmierstoffe am gesamten Schmierstoffmarkt ist mit unter 5 % zurzeit noch recht gering. Folgende Faktoren wirken sich positiv auf die Marktentwicklung aus:¹²¹

- Öffentliche Diskussionen um Ressourcensicherheit, Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit
- Technische Leistungsfähigkeit von Bioschmierstoffen ist für die meisten Anwendungen gegeben
- Unsicherheiten beim Mineralölpreis
- Gezielte Förderung bei nachhaltigen und/oder neuen Produktgruppen (z. B. Windkraftanlagen)
- EU-Umweltsiegel sorgen für Transparenz und Information

¹¹⁹ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016e).

¹²⁰ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2015a), S. 25.

¹²¹ Vgl. Böttger, M. (2014), S. 479.

Folgende Gründe gelten für eine gute Marktentwicklung als hemmend:¹²²

- Höherer Preis verglichen mit etablierten Produkten auf Mineralölbasis
- Verbrauchergewohnheiten (Vorbehalte, Umstellungsaufwand)
- Eingeschränkte Rohstoffverfügbarkeit durch Nutzungskonkurrenzen (z. B. Biokraftstoffe, Nahrungsmittel)
- Eingeschränkte Leistungsfähigkeit bei bestimmten technischen Anwendungen (z. B. dauerhaft hohe Temperaturen, hoher Feuchtegehalt in der Umgebung)

5.2 Herstellung

Bioschmierstoffe werden in Deutschland zu 85 % aus Rapsöl, Palmöl und Palmkernöl sowie tierischen Fetten hergestellt.¹²³ Sie bestehen aus einer Basisflüssigkeit (Grundöl) und Zusatzstoffen (Additive). Dabei entspricht das Grundöl einem Anteil von 70 % bis 99 %.¹²⁴ Es besteht im Wesentlichen aus aliphatischen Kohlenwasserstoffen und biologisch abbaubaren Estern (Öle und Fette).¹²⁵

Im Herstellungsprozess werden zuerst die natürlichen Ester aus dem nachwachsenden Rohstoff gewonnen, um danach durch den Raffinationsprozess aufgereinigt zu werden.¹²⁶

- (1) **Gewinnung von Ölen und Fetten aus Pflanzen:** Zerkleinern, Wärmebehandlung, Pressen oder Zentrifugieren, Extrahieren
- (2) **Raffination**
 - (a) Chemisch: Entschleimung, Neutralisation, Bleichung, Desodorierung

¹²² Vgl. Böttger, M. (2014), S. 479.

¹²³ Vgl. Böttger, M. (2014), S. 475; (Daten aus 2011).

¹²⁴ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016b).

¹²⁵ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 7.

¹²⁶ Vgl. Böttger, M. (2014), S. 467 f.

- (b) Physikalisch: Entschleimung, Bleichung, destillative Entsäuerung, Desodorierung

Nach dem Entfernen von Verunreinigungen (freien Fettsäuren, Pestiziden, Phosphatiden, Wachsen etc.) aus dem Rohöl werden anschließend gewünschte Eigenschaften der raffinierten Öle und Fette durch weitere chemische und physikalische Prozesse wie Fraktionieren, Umestern, Verestern, Härten und Mischen gezielt eingestellt. Dabei eignen sich die durch chemische Modifikationen entstandenen synthetischen Ester als Hochleistungsschmierstoffe.¹²⁷

Das Grundöl wird durch die Mischung von aliphatischen Kohlenwasserstoffen und den durch Extraktions-, Aufreinigungs- und Modifikationsprozessen erhaltenen natürlichen und synthetischen Estern hergestellt. Durch Hinzufügen verschiedener Additive werden rheologische, chemische und tribologische Eigenschaften des Bioschmierstoffs eingestellt. Somit werden für das jeweilige Einsatzgebiet der Verschleißschutz und die Altersbeständigkeit optimal eingestellt.¹²⁸

5.3 Eigenschaften

Bioschmierstoffe unterscheiden sich in ihren technischen Eigenschaften von etablierten Schmierstoffen auf Mineralölbasis.¹²⁹ Beispielsweise sind sie weniger scheranfällig, da aus folgenden Gründen eine geringere Menge an scheranfälligen Additiven ausreicht, um eine gewünschte Funktionalität zu erzielen:¹³⁰

- Die höhere Polarität von Bioschmierstoffen resultiert in besseren **Schmierstoff- und Verschleißschutzeigenschaften**. Bei metallischen Oberflächen führt dies zu einer vollständigen Benetzung anstatt einer Tropfenbildung, wie dies bei mineralölbasierten Schmierstoffen oft der Fall ist.

¹²⁷ Vgl. Böttger, M. (2014), S. 468.

¹²⁸ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 7.

¹²⁹ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016c).

¹³⁰ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 8.

- Bioschmierstoffe besitzen einen höheren Viskositätsindex als mineralölbasierte Schmierstoffe. Zudem weist ihre **Viskosität** eine geringere Temperaturabhängigkeit auf. Gute Schmiereigenschaften sind daher für einen breiteren Temperaturbereich ohne weitere Zusatzstoffe möglich.

Der **Einsatztemperaturbereich** für Bioschmierstoffe liegt zwischen $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, wenn diese auf natürlichen Estern basieren. Werden synthetische Ester auf Pflanzenölbasis verwendet, sind weit höhere Temperaturen ohne eine Produktschädigung möglich. Der maximal wählbare Temperaturbereich wird durch den Hersteller in der Produktspezifikation angegeben. Eine kurzzeitige Über- bzw. Unterschreitung des zulässigen Temperaturbereichs hat in der Regel keinen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Bioschmierstoffs. Allerdings führen dauerhaft hohe Temperaturen zu signifikanten Änderungen der molekularen Struktur (z. B. Aufspalten der Ester- oder Doppelbindung). Dies beeinträchtigt die Schmiereigenschaften und schränkt die Schmierstoffleistung ein.¹³¹

Verschiedene Einflussparameter verändern die Funktionsfähigkeit des Schmierstoffs und führen zur sogenannten **Alterung**. So verändern beispielsweise Sauerstoff, Wasser, Staubpartikel, UV-Strahlung und hohe Temperaturen die Leistungsfähigkeit von Schmierstoffen signifikant. Verglichen mit mineralölbasierten Schmierstoffen neigen Bioschmierstoffe zu höheren Alterungsgeschwindigkeiten. Um die Lager- und Betriebszeiten zu erhöhen, muss Bioschmierstoffen in der Regel eine größere Menge an Zusatzstoffen hinzudosiert werden. Durch eine effektive Filterung von Alterungsprodukten und Feststoffpartikeln während des Nutzungszeitraums kann die Standzeit zusätzlich verlängert werden. Schmierstoffe auf Basis synthetischer Ester pflanzlichen Ursprungs zeigen im Vergleich zu jenen auf natürlicher Esterbasis eine höhere Alterungsstabilität.¹³²

Im Gegensatz zu mineralölbasierten Schmierstoffen weisen Bioschmierstoffe eine schnelle **biologische Abbaubarkeit** auf. Ein Stoff gilt als biologisch

¹³¹ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016c).

¹³² Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 8 f.

schnell abbaubar, wenn er innerhalb von 28 Tagen zu mindestens 60 % abgebaut wird. Zertifizierte Bioschmierstoffe erfüllen diese Bedingung.¹³³

Toxizität: „Natürliche Pflanzenöle und synthetische Ester sind nicht toxisch, physiologisch unbedenklich und schwermetallfrei. Dies gilt auch für die Bioschmierstoffe, da in der Regel umweltverträgliche Additive eingesetzt werden.“¹³⁴

5.4 Anwendung

Produktgruppen

Die Anwendungsbereiche, in denen Bioschmierstoffe in der Praxis bereits eingesetzt werden, sind im Folgenden kurz vorgestellt:

Hydrauliköl

Hydrauliköle übertragen Energie in Hydrauliksystemen. Folgende zwei Sorten an biobasiertem Hydrauliköl sind u. a. am Markt erhältlich:¹³⁵

- HEES (Hydraulic Oil Environmental Ester Synthetic): HEES bestehen aus synthetischen Estern, die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Sie übertreffen in ihrem Alterungsverhalten, ihrer Materialkompatibilität und ihren Schmiereigenschaften die meisten Mineralöle. Zudem sind sie unempfindlich gegenüber hohen Betriebstemperaturen. Allerdings liegen ihre Herstellungskosten etwas höher.
- HETG (Hydraulic Oil Environmental Triglyceride): HETG basieren auf natürlichen Estern und weisen einen hohen Anteil an ungesättigten Fettsäuren auf. Diese bewirken eine geringere Temperaturstabilität. Daher werden HETG-Produkte bevorzugt bei Anwendungen mit geringer Temperaturbelastung eingesetzt.

Die von den Hydraulikölherstellern angebotenen HEES- und HETG-Produkte sind alterungsbeständig und weisen ein gutes Viskositäts-

¹³³ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016c).

¹³⁴ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016c).

¹³⁵ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 12 f.

Temperatur-Verhalten auf. Zudem besteht eine Materialkompatibilität mit den in Hydraulikanlagen vorkommenden Werkstoffen. Biohydrauliköle erfüllen die technischen Mindestanforderungen der DIN ISO 15380. In vielen Eigenschaftsbereichen werden diese sogar übertroffen.¹³⁶

Motoren- und Getriebeöle

In stationären Maschinen und Nutzfahrzeugen eingesetzte Motorenöle sind sehr hohen Belastungen und Anforderungen ausgesetzt. Ihre Schmierleistung muss für einen breiten Temperaturbereich sowie für verschiedene Belastungsstufen gewährleistet sein. Zudem müssen sie über einen hohen Verschleißschutz verfügen, alterungsbeständig sein und einen sparsamen Verbrauch aufweisen. Für Zweitakt- und Viertaktmotoren sind bereits biobasierte Motorenöle auf dem Markt erhältlich, die diese Anforderungen erfüllen. Sie enthalten synthetische Ester auf pflanzlicher Basis. Im Vergleich zu mineralölbasierten Motorölen weisen Biomotoröle eine geringere Verdunstungsneigung auf. Dies führt im Verbrennungsmotor zu einem geringeren Ölverbrauch und einer reduzierten Partikelbildung. Zudem werden in Biomotorölen umweltfreundliche Additive (zinkfrei und phosphorarm) eingesetzt. Diese unterstützen eine längere Haltbarkeit des Abgas-Katalysatorsystems.¹³⁷

Ebenfalls auf dem Markt erhältlich sind biobasierte Getriebe- und Umlauföle. Eingesetzt werden diese insbesondere bei Getrieben von Windkraftanlagen und Fahrzeugen sowie bei Schnecken- und Planetengetrieben in der Verpackungsindustrie. Diese Bioöle weisen einen sehr guten Verschleißschutz und eine ausgezeichnete Scherstabilität auf. Die Viskosität und die entsprechende Viskositätsklasse ändern sich auch bei langen Ölwechselintervallen, sprich größeren Beanspruchungszeiten, nicht wesentlich.¹³⁸

Metallbearbeitungsöle

In der Metallbearbeitung reduzieren Schmierstoffe die Reibung zwischen Bearbeitungswerkzeug und Werkstoff, gleichzeitig zeigen sie eine kühlen-

¹³⁶ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 13.

¹³⁷ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 14.

¹³⁸ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 14 f.

de Wirkung. Diese sogenannten Kühlschmierstoffe unterstützen eine effiziente Metallbearbeitung. Die am Markt erhältlichen biobasierten Kühlschmierstoffe sind biologisch gut abbaubar und neigen gegenüber konventionellen Schmierstoffen seltener zur Verdunstung.¹³⁹

Verlustschmierstoffe

Verlustschmierstoffe sind Schmierstoffe, die während des Gebrauchs in die Umwelt gelangen können. Der Schmierstoffverlust kann permanent (z. B. Kettensäge) oder partiell (z. B. Fahrradkette, Kugellager) auftreten. Für diese Anwendungen ist der Einsatz von Bioschmierstoffen aufgrund ihrer schnellen biologischen Abbaubarkeit prädestiniert. Dementsprechend liegen biobasierte Sägekettenhaftöle und Sägegatteröle im entsprechenden Marktsegment mit über 80 % Marktanteil deutlich über den fossilen Schmierstoffen.¹⁴⁰

Anwendung in der Praxis

Bioschmierstoffe lassen sich genauso einfach einsetzen wie konventionelle Schmierstoffe.¹⁴¹ Generell sind folgende Wartungs- und Betriebshinweise beim Einsatz von Bioschmierstoffen, insbesondere beim Umrüsten von Anlagen, zu beachten.

Im Anwendungsfall sind die Einsatzbedingungen (maximale und minimale Temperaturen, geforderte Viskosität etc.) im Vorfeld zu definieren. In Abhängigkeit der ermittelten Parameter wird ein für die Anwendung geeigneter Bioschmierstoff ausgewählt. Vor allem ist die Wahl der richtigen Viskosität entscheidend. Weicht der Viskositätswert vom Optimalwert ab, so kann sich dies auf den Energieverbrauch und die Betriebstemperatur auswirken. Im Vergleich zu mineralischen Schmierstoffen besitzen Bioschmierstoffe bessere Schmiereigenschaften und einen höheren Viskositätsin-

¹³⁹ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 17.

¹⁴⁰ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 15 f.

¹⁴¹ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012b), S. 2.

dex. Daher ist es empfehlenswert, den Bioschmierstoff eine Viskositätsgruppe niedriger als das Mineralöl zu wählen.¹⁴²

Die Materialverträglichkeit der mit dem Bioschmierstoff in Berührung kommenden Anlagenkomponenten wie beispielsweise Dichtungen, Schläuche, Rohre (inklusive Lacke) sollte vor jeder Schmierstoffumstellung auf Basis des Datenblatts vom Hersteller überprüft werden. Dies betrifft vor allem ältere Anlagen (Baujahr vor 1995). Bei neuen Anlagen ist eine Materialverträglichkeit in den meisten Fällen gegeben.¹⁴³

Im Gegensatz zu mineralischen Schmierstoffen reagieren Bioschmierstoffe auf wasserbasierte Verunreinigungen viel empfindlicher. Daher ist das Eindringen selbst kleinster Feuchtigkeitsmengen in das Öl- oder Schmierstoffsystem (z. B. Hydrauliksystem oder Metallbearbeitung) unbedingt zu vermeiden. Ein Wassergehalt von 0,1 % sollte dabei nicht überschritten werden.¹⁴⁴

Bioschmierstoffe sollten nicht mit konventionellen Schmierstoffen verunreinigt werden. Eine Vermischung beeinträchtigt ihre Qualität. Dies liegt in einer unterschiedlichen Additivierung begründet. Die Additive des Mineralöls können ab einer bestimmten Konzentration flockige Abbauprodukte im Bioschmierstoff verursachen, die die Komponenten des Ölsystems (z. B. Ölfiler) verschmutzen. Nach einer Umölung wird daher empfohlen, den Ölfiler ab einer Betriebszeit von ca. 50 Betriebsstunden zu kontrollieren und gegebenenfalls zu wechseln. Weiterhin kann eine Vermischung zu Schaumentwicklung, Pumpenverschleiß oder Korrosionsschäden führen. Zudem wird auch die biologische Abbaubarkeit des Bioschmierstoffs negativ beeinflusst. Um die negativen Auswirkungen zu unterbinden, sollte der Mineralölgehalt im Bioschmierstoff 2 % nicht überschreiten.¹⁴⁵ Bei der

¹⁴² Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 45.

¹⁴³ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 51 f.

¹⁴⁴ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016d), vgl. auch Unterseite „Umstellung auf Biohydrauliköl“.

¹⁴⁵ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 45.

Umstellung von etabliertem auf biobasierten Schmierstoff ist daher Folgendes zu beachten:¹⁴⁶

- Hydraulik-, Motoren- und Getriebeöle: Eine Anlage muss bei einer Umstellung gründlich entleert und gespült werden. Der Ölfilter sollte nach einer Woche kontrolliert und gegebenenfalls gewechselt werden. Zudem sollte ein Aufkleber in der Nähe der Tanköffnung auf den Einsatz von Bioschmierstoff hinweisen, damit bei einem Ölwechsel oder einer Nachfüllung nicht aus Versehen ein mineralischer Schmierstoff verwendet wird.
- Metallbearbeitungsöle und Verlustschmierstoffe: Bei oberflächlich aufgetragenen Schmierstoffen sollte die mit mineralischen Schmierstoffresten verunreinigte Oberfläche vor Gebrauch gründlich gereinigt werden.

Die Standzeiten von biobasierten Hydraulik-, Motoren- und Getriebeölen können um ein Vielfaches erhöht werden, wenn zusätzlich Filter zum Absenken des Feinstoff- und Feuchtegehalts eingesetzt werden. Zudem ermöglichen regelmäßig im Labor untersuchte Proben den Alterungszustand, Verschmutzungsgrad und Feuchtegehalt festzustellen. Üblich sind Prüfintervalle von 500 Betriebsstunden.¹⁴⁷ Ein Ölwechsel erfolgt nur im Bedarfsfall, wodurch sich die Ölverbrauchsmenge deutlich reduziert. Durch die regelmäßige Beprobung werden zudem Informationen über den Anlagenzustand (Verschleiß, Störungen etc.) gewonnen. Der Mehraufwand dieser Wartungsmethode sorgt für erheblich längere Ölwechselintervalle. Dadurch verringert sich die Kostendifferenz zwischen einem konventionellen (preiswerteren) und biobasierten Schmierstoff signifikant. Der Einsatz von Bioschmierstoffen wird für den Anwender aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv.¹⁴⁸

¹⁴⁶ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016d), vgl. auch Unterseite „Wartungshinweise“.

¹⁴⁷ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 54.

¹⁴⁸ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a), S. 40 ff.

Anwendungsbeispiele

Anwendung von Bioschmierstoffen in Windkraftanlagen¹⁴⁹

Im Projekt Winlub wurde der dauerhafte Einsatz von biobasierten Schmierstoffen in Windkraftanlagen durch diverse Forschungsinstitutionen und Unternehmen untersucht. Auf Prüfständen und in dreijährigen Feldversuchen wurden die eingesetzten Bioschmierstoffe bei wechselnden Betriebsparametern und Verunreinigungen in verschiedenen Lager- und Getriebetypen getestet und mit mineralölbasierten Schmierstoffen verglichen.

Aufgrund der hervorragenden Schmiereigenschaften und der damit verbundenen im Vergleich zu mineralölbasierten Schmierstoffen geringeren Reibung sank die Temperatur in den untersuchten Rotorlagern. Dies führte zu höheren Wirkungsgraden und zu einem geringeren Bauteilverschleiß. Die funktionsbasierten Prüfkriterien wurden allesamt auch nach dreijährigem Einsatz erfüllt. Zudem konnte kein biologischer Abbau des eingesetzten Schmierstoffs innerhalb der dreijährigen Untersuchungszeit festgestellt werden.

Einsatz von biobasiertem Schmierstoff in der spanenden Bearbeitung¹⁵⁰

Ein Metallarbeiter aus der Gruppe der kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) hat im Rahmen eines Projekts zwölf CNC-Maschinen auf einen Bioschmierstoff umgestellt. Die Motivation für das Vorhaben ist vielseitig: Wissens- und Erfahrungsvorsprung, Unabhängigkeit von schwankenden Ölpreisen, Mitarbeitergesundheit und Beitrag zum Umweltschutz.

Der biobasierte Kühlschmierstoff konnte dem Vergleich zum fossilbasierten Schmierstoff standhalten. Die Standzeit des Bioschmierstoffs ist um rund drei bis sechs Monate länger. Zudem wurde eine Verbesserung der Oberflächenqualität der bearbeiteten Werkstücke festgestellt. Die Maschinen müssen seltener gereinigt werden, da beim eingesetzten Bioschmierstoff das Spülvermögen und die Schmutzaufnahmekapazität im Ver-

¹⁴⁹ Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012c), S. 23 ff.

¹⁵⁰ Vgl. Effizienz-Agentur NRW (2008), S. 22 f.

gleich zum mineralischen Pendant deutlich größer sind. Zudem ist der Bioschmierstoff auf Grund einer rückfettenden Wirkung hautverträglicher als fossil-basierte Produkte.

Während des Projektzeitraums von zwei Jahren wurden jährlich 1.200 kg Bioschmierstoff verbraucht. In diesem Zeitraum war der Bioschmierstoff um ca. einen Euro pro Liter teurer als das mineralische Schmiermittel. Durch die positiven Effekte des Bioschmierstoffs wurden jährliche Einsparungen von rund 700 Euro erzielt, was den höheren Einkaufspreis teilweise kompensierte.¹⁵¹

5.5 Verwertung und Beseitigung

Bei der Entsorgung von gebrauchten Bioschmierstoffen ist die in 2002 in Kraft getretene Altölverordnung zu beachten. Die leicht abbaubaren Bioschmierstoffe fallen in die Kategorie 4. Sie werden zuerst gesammelt, um dann energetisch oder stofflich verwertet zu werden. Eine Aufbereitung zu Basisöl wird nicht eingefordert. Ist der gebrauchte Bioschmierstoff allerdings mit Schadstoffen verunreinigt, so wird eine aufwendige Entsorgung als Sonderabfall notwendig.¹⁵²

¹⁵¹ Vgl. Effizienz-Agentur NRW (2008), S. 23.

¹⁵² Vgl. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012b).

6 HERAUSFORDERUNGEN

Den Vorteilen einer stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der Industrie stehen einige technologische und wirtschaftliche Herausforderungen gegenüber:

- Bei der Modifizierung oder Neuentwicklung eines Produktionsverfahrens sind personelle und zeitliche Kapazitäten für die Entwicklungsaktivitäten sowie gegebenenfalls Investitionen in neue Technologien und Anlagen notwendig. Dies betrifft in erster Linie Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren. Um die derzeit zum Teil höheren Kosten zu reduzieren, wurden von staatlicher Seite diverse Förderprogramme (vgl. Anhang B, Tabelle 12) für die Unterstützung einer stofflichen Nutzung nachwachsender Stoffe in der Industrie aufgelegt.
- Die Akzeptanz biobasierter Produkte bei den Endanwendern ist derzeit nicht immer gegeben. Oft stellt sich die Frage nach vergleichbarer Leistungsfähigkeit und Anwendungsfreundlichkeit in Bezug auf fossilbasierte Produkte. Hieraus leiten sich die Forderungen nach einer zuverlässigen Zertifizierung biobasierter Produkte von unabhängiger Stelle sowie detaillierten Informationen vom Hersteller zum Produkt ab. In den letzten Jahren wurden diverse Zertifizierungslabels initiiert.
- Biobasierte Produkte sind oftmals teurer als ihre konventionellen Pendanten. Gründe hierfür können z. B. kleine Produktionsmengen oder hohe Investitionsabschreibungen neu eingesetzter oder entwickelter Technologien sein. Eine gewisse Marktrelevanz wird insbesondere dann erreicht, wenn ein Vorteil gegenüber fossil-basierten Produkten erzielt wird. Dies ist der Fall, wenn biobasierte Produkte beispielsweise neue Funktionalitäten aufweisen oder geringere Umweltwirkungen erzielen.¹⁵³
- Bei der industriellen Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen können Nutzungskonkurrenzen auftreten. Diese beziehen sich nicht nur

¹⁵³ Vgl. VDI 6310 Blatt 1:2016-01, S. 41 f.

auf die Fläche, sondern „[...] auch [...] [auf] landwirtschaftliche oder auch wasserwirtschaftliche Nutzungsansprüche an die Umwelt und auch Ökosystemleistungen. [...] Diese Konkurrenzbeziehungen bestehen bei der Verwendung der Biomasse für Lebensmittel, stoffliche Nutzungsmöglichkeiten und energetische Nutzungswege.“¹⁵⁴ Die Herausforderung besteht darin, eine umweltgerechte, ressourcenschonende und sozial verantwortbare Agrarproduktion sicherzustellen.¹⁵⁵

- Die Umweltwirkung biobasierter Produkte wird neben den eingesetzten Verfahren bei der Produktherstellung von den Produkteigenschaften während der Nutzungsphase, der Produktlebensdauer, den Recyclingeigenschaften und den möglichen Beseitigungsverfahren bestimmt. Zudem beeinflussen die Verfahren der Rohstoffherstellung (Biomasseproduktion) und -gewinnung die Auswirkungen auf die Umwelt.¹⁵⁶ Beispielsweise kann eine intensive Bewirtschaftung landwirtschaftlich genutzter Fläche ungünstige Umwelteinflüsse wie Eutrophierung von Gewässern oder Veränderung von Naturraum durch Abholzung bewirken. Im Regelfall beeinflusst die Art und Weise der Biomasseproduktion die Umweltwirkungen biobasierter Produkte deutlich.¹⁵⁷

Nachhaltig produzierte und gewonnene Biomasse trägt zu einer Reduktion ungünstiger Umweltwirkungen bei: „Nachhaltige Biomasseproduktion bedeutet, dass die Bodenfruchtbarkeit sowie die Wasserqualität erhalten, nicht erneuerbare Ressourcen sparsam eingesetzt und Kulturlandschaften mit deren Biotop- und Artenvielfalt bewahrt werden, um Land, Wasser sowie genetische und nicht erneuerbare Ressourcen auch für künftige Generationen zu erhalten. Vorzugsweise sollten daher zertifizierte Biomasse oder Reststoffe als Ausgangsmaterial in Bioraffinerien verwendet werden. Biomasseproduktion, die zu regionaler Wasserknappheit führt, wertvolle Habitate infolge einer Nutzungsänderung zerstört, eine negative Treibhausgasbilanz (THG-Bilanz) aufweist oder

¹⁵⁴ VDI 6310 Blatt 1:2016-01, S. 40.

¹⁵⁵ Vgl. VDI 6310 Blatt 1:2016-01, S. 53.

¹⁵⁶ Vgl. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2009), S. 10.

¹⁵⁷ Vgl. VDI 6310 Blatt 1:2016-01, S. 53 f.

negative soziale und gesundheitliche Folgen für die Landbevölkerung hervorruft, gilt nicht als nachhaltig.“¹⁵⁸

Nachhaltigkeitskriterien für die stoffliche Biomassenutzung sind 2013 durch die „Initiative Nachhaltige Rohstoffbereitstellung für die stoffliche Biomassenutzung“ (INRO) erarbeitet worden und dienen als Grundlage für die Zertifizierung der stofflichen Biomassenutzung.¹⁵⁹ ISCC (International Sustainability & Carbon Certification) PLUS¹⁶⁰ ist ein solches Zertifizierungssystem für Nachhaltigkeit und Treibhausgasemissionen für technische und chemische Anwendungen (z. B. Biokunststoffe), Bioenergie und Nahrungs-/Futtermittel.

¹⁵⁸ VDI 6310 Blatt 1:2016-01, S. 53.

¹⁵⁹ Vgl. VDI 6310 Blatt 1:2016-01, S. 54.

¹⁶⁰ Weblink: www.iscc-system.org/iscc-system/ueber-iscc/ [abgerufen am 28. Juni 2016].

7 ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem Ziel der Ressourcenschonung hat in den letzten beiden Dekaden die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der Industrie zugenommen. Auf dem Markt sind diverse Produktgruppen vertreten, die teilweise oder vollständig aus biobasierten Grundstoffen (Werkstoffen oder Hilfs-/Betriebsstoffen) gefertigt werden. Zu den Grundstoffen mit einer gewissen Marktrelevanz zählen Biokunststoffe, Bioverbundwerkstoffe oder Bioschmierstoffe. Der Marktanteil biobasierter Produkte fällt im Vergleich zu ihren fossil-basierten Produktpendants bisher teilweise noch recht gering aus. Mittlere Wachstumsraten werden für die meisten biobasierten Produktgruppen prognostiziert.

Die Entscheidung über den Einsatz biobasierter Materialien in der verarbeitenden Industrie wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Ein bedeutender Entscheidungsfaktor liegt in der Verfügbarkeit der benötigten Mengen in der geforderten Qualität. Die Frage nach der Eignung der bereits vorhandenen Herstellungs- und Verarbeitungstechnologien und der sich daraus gegebenenfalls ableitenden Entwicklungskosten ist ebenfalls mitentscheidend. Zudem bilden die technischen Eigenschaften und die Anschaffungskosten des biobasierten Substituts wichtige Entscheidungskriterien.

Der Einsatz biobasierter Materialien in der Industrie als Substitut für fossil-basierte Pendants leistet in der Regel einen Beitrag zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und unterstützt die Schonung fossiler Rohstoffe. Eine stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe im industriellen Umfeld kann allerdings auch ungünstige Umwelteinflüsse hervorrufen. Eine effiziente Nutzung landwirtschaftlicher Fläche und eine nachhaltige Produktion nachwachsender Rohstoffe können dem entgegenwirken. Die begrenzt verfügbaren nachwachsenden Rohstoffe sollten zudem stofflich effizient genutzt werden. Dies kann beispielsweise durch innovative Verwertungstechnologien oder durch die Nutzung landwirtschaftlicher Abfall- und Reststoffe erzielt werden.

Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz biobasierter Materialien im verarbeitenden Gewerbe ist die Förderung von Forschung und Entwicklung

durch Schaffung innovations- und investitionsfreundlicher Rahmenbedingungen. Auch wenn ökonomische und ökologische Vorteile biobasierter Produkte in frühen Entwicklungsstadien nicht immer erkennbar sind, ist eine weitere Forschung und Entwicklung wünschenswert. Das Entwicklungs- und Optimierungspotenzial sollte genauso ausgeschöpft werden wie bei den etablierten Produkten. Am Ende des Entwicklungsprozesses kann ein biobasiertes Produkt mit besseren Produkteigenschaften im Vergleich zu seinem konventionellen Pendant stehen. Zudem können Innovationen in der Produkt- und Verfahrensentwicklung Wettbewerbsvorteile schaffen.

LITERATURVERZEICHNIS

Aeschelmann, F. und Carus, M. (2015): Bio-based Building Blocks and Polymers in the World – Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends Towards 2020 (short version). 3rd edition, Michael Carus, nova-Institut GmbH, Hürth, auch verfügbar als PDF unter: bio-based.eu/download/?did=32875&file=0

AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. [Hrsg.] (2010): Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 3., vollständig überarbeitete Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-0881-3.

Bilsen, V. et al. (2014): Cases of implementing resource efficient policies by the EU industry. Final report, European Commission, Directorate-General Environment, Brüssel, auch verfügbar als PDF unter: www.ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/REPC%20final%20%20report%20IDEA%20Consult.pdf

Böhm, S. (2016): Hammer – Holzformteile als Multi-Materialsysteme für den Einsatz im Fahrzeug-Rohbau [online]. Universität Kassel – Fachgebiet Trennende und Fügende Fertigungsverfahren [abgerufen am 15. Jul. 2016], verfügbar unter: www.tff-kassel.de/index.php/hammer.html

Böttger, M. (2014): Oleochemie (Bioschmierstoffe). In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. FNR, Gülzow-Prüzen, Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 34, ISBN 978-3-942147-18-7, auch verfügbar als PDF unter: fnr.de/marktanalyse/marktanalyse.pdf

Bundesministerium für Bildung und Forschung und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014): Bioökonomie in Deutschland – Chancen für eine biobasierte und nachhaltige Zukunft. Bundesministerium für Bildung und Forschung und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin, auch verfügbar als PDF unter: www.bmbf.de/pub/Biooekonomie-in-Deutschland_001.pdf

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2009): Aktionsplan der Bundesregierung zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, auch verfügbar als PDF unter: www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/AktionsplanNaWaRo.pdf?__blob=publicationFile

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014): Neue Produkte: Aus Natur gemacht - Nachwachsende Rohstoffe im Alltag. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin, auch verfügbar als PDF unter:
www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/NeueProdukteNaWaRoImAlltag.pdf?__blob=publicationFile

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin, auch verfügbar als PDF unter:
www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf

Carus, M. et al. (2008): Studie zur Markt- und Konkurrenzsituation bei Naturfasern und Naturfaser-Werkstoffen (Deutschland und EU). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, Gülzower Fachgespräche, Band 26, auch verfügbar als PDF unter: www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_315gf_band_26_komplet_100.pdf

Carus, M. et al. (2010): Entwicklung von Förderinstrumenten für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland (Kurzfassung). 2. Auflage, nova-Institut für politische und ökologische Innovation GmbH, Hürth, ISBN 978-3-9812027-3-1, auch verfügbar als PDF unter: www.nova-institut.de/download/Studie_Stofflich_Material

Carus, M.; Eder, A. und Scholz, L. (2015): Bioverbundwerkstoffe - Naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) und Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, auch verfügbar als PDF unter:
www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Bioverbundwerkstoffe-web-V01.pdf

Deimling, S.; Goymann, M.; Baitz, M. und Rehl, T. (2007): Auswertung von Studien zur ökologischen Betrachtung von nachwachsenden Rohstoffen bei einer stofflichen Nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, auch verfügbar als PDF unter: www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/Oekologische_Betrachtung_stoffliche_Nutzung_nR.pdf

Diepenbrock, W. (2014): Nachwachsende Rohstoffe. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, ISBN 978-3-8252-4189-6.

DIN SPEC 33928:2011: Deutsches Institut für Normung e. V., DIN SPEC 33928: Biobasierte Produkte – Übersicht über Normen, Deutsche Fassung CEN/TR 16208:2011, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN SPEC 51523:2011-10: Deutsches Institut für Normung e. V., Flüssige Mineralöl-Erzeugnisse – Bio-Schmierstoffe – Empfehlungen für die Terminologie und Charakterisierung von Bio-Schmierstoffen und bio-basierten Schmierstoffen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Effizienz-Agentur NRW (2008): Erfolgsstoff – Nachwachsende Rohstoffe in Produktion und Produkten. Effizienz-Agentur NRW, Duisburg, auch verfügbar als PDF unter: www.pius-info.de/dokumente/docdir/efa/praxis_info/pdf/0804_EFA_Erfolgsstoff.pdf

Endres, H.-J. (2012): Marktanalyse. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: Biobasierte Polymere – Kunststoffe der Zukunft. FNR, Gülzow-Prüzen, Gülzower Fachgespräche, Band 41, ISBN 978-3-942147-10-1, auch verfügbar als PDF unter: media-thek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/1/2/121211_etagungsband_fachkongress_biobasierte_polymere__v04.pdf

Endres, H.-J. und Siebert-Raths, A. (2009): Technische Biopolymere. Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, ISBN-10 3446416838.

Endres, H.-J.; Kohl, M. und Berendes, H. (2014): Biobasierte Kunststoffe und biobasierte Verbundwerkstoffe. In: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. FNR, Gülzow-Prüzen, Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 34, ISBN 978-3-942147-18-7, auch verfügbar als PDF unter: fnr.de/marktanalyse/marktanalyse.pdf

European Bioplastics (2016): Fact Sheet: Bioplastics – furthering efficient waste management. European Bioplastics e. V., Berlin, auch verfügbar als PDF unter: docs.european-bioplastics.org/2016/publications/fs/EUBP_fs_end-of-life.pdf

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012a): Technische Bio-öle, Grundlagen – Produkte – Rahmenbedingungen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, auch verfügbar als PDF unter: www.mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/t/e/technische_biooele_dina5_web.pdf

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012b): Bioschmierstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, auch verfügbar als PDF unter: mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/1/2/120703_flyer_web_pdf.pdf

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2012c): tolle ideen - Nachwachsende Rohstoffe auf dem Weg zum Markt. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, auch verfügbar als PDF unter: www.ibbnetzwerk-gmbh.com/uploads/media/FNR_-_Tolle_Ideen.pdf

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2013): Bioconcept-Car. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, auch verfügbar als PDF unter: mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/1/3/130902-bcc-folder-final_1.pdf

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014a): Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, Band 34, ISBN 978-3-942147-18-7, auch verfügbar als PDF unter: fnr.de/marktanalyse/marktanalyse.pdf

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2014b): Produkte aus biobasierten Werkstoffen – Verwertung und Entsorgung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, auch verfügbar als PDF unter: mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/f/l/flyer_biopolymere_2014_web.pdf

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2015a): Bioschmierstoff-Kongress. 12. - 13. November in Hagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, Gülzower Fachgespräche, Band 50, ISBN 978-3-942147-26-2.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016a): Bioschmierstoffe – Einführung [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. [abgerufen am 15. Jan. 2016], verfügbar unter: www.bioschmierstoffe.fnr.de/bioschmierstoffe-info/einfuehrung/

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016b): Bioschmierstoffe – Grundöle [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. [abgerufen am 19. Jan. 2016], verfügbar unter: www.bioschmierstoffe.fnr.de/bioschmierstoffe-info/produktgruppen/grundoele/

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016c): Eigenschaften von Bioschmierstoffen [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. [abgerufen am 21. Jan. 2016], verfügbar unter: www.bioschmierstoffe.fnr.de/bioschmierstoffe-info/eigenschaften/

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016d): Bioschmierstoffe – Praxistipps [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. [abgerufen am 3. Feb. 2016], verfügbar unter: www.bioschmierstoffe.fnr.de/praxistipps/

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016e): Bioschmierstoffe – Marktsituation [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. [abgerufen am 15. Feb. 2016], verfügbar unter: www.bioschmierstoffe.fnr.de/bioschmierstoffe-info/marktsituation/

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016f): Bioverbundwerkstoffe – Verarbeitungsverfahren Formpressen [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. [abgerufen am 22. Feb. 2016], verfügbar unter: www.biowerkstoffe.fnr.de/bioverbundwerkstoffe/verarbeitung/

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016g): Bioverbundwerkstoffe – Verarbeitungsverfahren Fließpressen [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. [abgerufen am 24. Feb. 2016], verfügbar unter: www.biowerkstoffe.fnr.de/bioverbundwerkstoffe/verarbeitung/

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016h): Basisdaten biobasierte Produkte. 2. Auflage, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, auch verfügbar als PDF unter: www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Basisdaten_biobasierte_Produkte-2016_web.pdf

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016i): Biokunststoffe – Untergliederung. [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. [abgerufen am 25. Mai 2016], verfügbar unter: biowerkstoffe.fnr.de/biokunststoffe/klassifizierung/

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2016j): Biokunststoffe – Verwertung/Recycling [online]. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. [abgerufen am 30. Mai 2016], verfügbar unter: biowerkstoffe.fnr.de/biokunststoffe/verwertung/

Fraunhofer-Institut für Holzforschung (2016): Stoffliches Recycling von Wood-Polymer Composites [online]. Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI) [abgerufen am 24. Feb. 2016], verfügbar unter: www.wki.fraunhofer.de/de/leistung/vst/projekte/wpc-recycling.html

Haufe, J. und Carus, M. (2011): Hemp Fibres for Green Products – An assessment of life cycle studies on hemp fibre applications. nova-Institut GmbH, Hürth, auch verfügbar als PDF unter: www.bio-based.eu/?did=1086&vp_edd_act=show_download

IAP, IfBB, SKZ, SLK (2016): Verarbeitung von Biokunststoffen – ein Leitfaden –. 1. Auflage. Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP), Potsdam-Golm; Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (IfBB), Hochschule Hannover; Das Kunststoff-Zentrum (SKZ), Horb am Neckar; Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung (SLK), TU Chemnitz.

Oertel, D. (2007): Industrielle stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag, Berlin, Arbeitsbericht Nr. 114, auch verfügbar als PDF unter: www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab114.pdf

Peters, D. et al. (2010): Nachwachsende Rohstoffe in der Industrie – Stoffliche Nutzung von Agrar- und Holzrohstoffen in Deutschland. 3. vollständig überarbeitete Auflage, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, auch verfügbar als PDF unter: www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_228-bro_nr_industrie_dt_15072010_02_klein.pdf

Thielen, M. (2015): Biokunststoffe. 2. Auflage, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen, auch verfügbar als PDF unter: www.mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/b/r/brosch.biokunststoffe-web-v01.pdf

VDI 4800 Blatt 1:2016-02: Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6310 Blatt 1:2016-01: Klassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

ANHANG A

Tabelle 10: Bandbreite von auf dem Markt verfügbaren biobasierten Produkten¹⁶¹

Primär genutzte Inhaltsstoffe	Biobasierte Zwischen- und Endprodukte
Naturfasern	Faserverbundwerkstoffe, Vliese und Filtermaterialien, Dämmstoffe, Papier, Pappe, (technische) Textilien
Holz/Cellulose/Lignocellulose	Bauholz, Holzfaserplatten, Span- und Holzwolle, Zellstoff, Cellulose, cellulosebasierte Chemiefasern, Kohlenstofffasern, Biokunststoffe, chemische Grundstoffe, Farbstoffe, Harze, Fette, Wachse
Zucker	chemische Grundstoffe, Kosmetika, Natur-Pharmazeutika, Waschmittel, Seifen, Tenside, Biokunststoffe, Farbstoffe, Anstrichmittel, Lösungsmittel, Hilfsmittel für Gießereien und Betonindustrie
Stärke	Papier und Pappe, Klebstoffe, Baustoffe, Biokunststoffe, Waschmittel, chemische Grundstoffe, Kosmetika, Natur-Pharmazeutika
Proteine	Tenside, technische Polymere, chemische Grundstoffe, Dünger, Leime, Kasein-Anstrichstoffe, Kosmetika, Natur-Pharmazeutika, Hilfsmittel für Papier-, Leder- und Textilindustrie
Öle/Fette	Bioschmierstoffe, Wasch- und Reinigungsmittel, Kosmetika, Natur-Pharmazeutika, chemische Grundstoffe, Baustoffe, Farben und Lacke
Besondere Inhaltsstoffe	Natur-Pharmazeutika, Kosmetika, Gewürze, Aromastoffe, Farbstoffe, Gerbstoffe, chemische Grundstoffe, Gummi, Kautschuk, Wachse, Harze, Balsame

Tabelle 11: Primär genutzte Inhaltsstoffe und ihre Rohstoffquellen¹⁶²

Primär genutzte Inhaltsstoffe	Rohstoffquellen
Naturfasern	Agave, Altpapier/-textilien, Baumwolle, Brennessel, Flachs, Hanf, Jute, Kork, Kokosfaser, Ramie, Schilf, Sisal, Stroh
Holz/Cellulose/Lignocellulose	Holz verschiedener Baumarten
Zucker	Topinambur, Zichorie, Zuckerhirse, Zuckerrohr, Zuckerrübe
Stärke	Erbsen, Kartoffeln, Mais, Maniok, Pfeilwurz, Reis, Roggen, Sagopalme, Weizen
Proteine	Erbsen, Federn, Horn, Kartoffeln, Leder, Milch, Raps, Sojabohnen, Wolle
Öle/Fette	Baumwolle, Färbedistel, Koriander, Leinen, Mohn, Oliven, Raps, Ringelblume, Rizinus, Soja, Sonnenblumen
Besondere Inhaltsstoffe	Arzneipflanzen, Färberpflanzen, Gerbstoffe, Gewürzpflanzen, Gummi, Harze, Kautschuk, Wachse

¹⁶¹ Vgl. Oertel, D. (2007), S. 42.¹⁶² Vgl. Oertel, D. (2007), S. 42.

ANHANG B

Tabelle 12: Förderprogramme zum Themenfeld „Stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe“

Förderprogramm	Link
Förderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“ (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft)	www.fnr.de/projektfoerderung/fuer-antragsteller/foerderprogramm-nachwachsende-rohstoffe/
Förderschwerpunkte	www.fnr.de/projektfoerderung/fuer-antragsteller/foederschwerpunkte/
Aktuelle Bekanntmachungen	www.fnr.de/projektfoerderung/fuer-antragsteller/aktuelle-bekanntmachungen/
Aktuelle Projekte (seit Mai 2015)	www.fnr.de/projektfoerderung/projekte-und-ergebnisse/projekte-ab-mai-2015/
BioÖkonomie 2030 (Bundesministerium für Bildung und Forschung)	www.foerderdatenbank.de/Foerder-DB/Navigation/Foerderrecherche/suche.html?get=e006951dc5fc716fd19774616c7196af;views;document&doc=11324

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30-2759506-0
Fax +49 30-2759506-30
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE