

Marktrelevante Biopolymere

Technologie, Ökonomie & Nachhaltigkeit im Fokus

Mit Steckbriefen zu Biopolymertechnologien,
Bewertungsergebnissen und Biomasseverfügbarkeiten



Marktrelevante Biopolymere

Technologie, Ökonomie & Nachhaltigkeit im Fokus

Autor:innen

Kathleen Meisel
Lilli Sophia Röder
Niels Dögnitz
Inga Katharina Götz
Karl-Friedrich Cyffka

Besonderer Dank für die wertvollen Hinweise und Anmerkungen im Verlauf des GreenFeed-Projektes und bei der Erstellung dieses Fokusheftes gilt insbesondere folgenden Kolleg:innen vom DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH:

Arne Gröngröft
Lena Seidel
Cornelia Cron
Yalda Eghbalian

Wir danken ebenso dem Koordinator und Projektpartner für die Unterstützung im Projekt:
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (WI)
Universität Kassel, Kassel Institute for Sustainability
Institut für Technische Chemie (ITC) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Das Fokusheft ist im Rahmen des Vorhabens „Green Feedstock for a Sustainable Chemistry – Energiewende und Ressourceneffizienz im Kontext der dritten Feedstock-Transformation der chemischen Industrie (GreenFeed)“ entstanden. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1.	<u>Hintergrund und Zielsetzung</u>	5
2.	<u>Biomasseverfügbarkeit</u>	7
3.	<u>Bilanzgrenzen und Bewertungsrahmen</u>	10
4.	<u>Bilanzierungs- und Bewertungsmethoden</u>	11
5.	<u>Technologiesteckbriefe</u>	
	5.1 <u>Gewinnung von Zucker und Lignin</u>	12
	5.2 <u>Polymilchsäure (PLA)</u>	14
	5.3 <u>Polyamid 6 (PA 6)</u>	16
	5.4 <u>Polyethylen hoher Dichte (HDPE)</u>	18
	5.5 <u>Polyethylen niedriger Dichte (LDPE)</u>	19
	5.6 <u>Polyurethane (PUR)</u>	21
	5.7 <u>Polypropylen (PP)</u>	23
	5.8 <u>Polyethylenterephthalat (PET)</u>	25
	5.9 <u>Polybutylensuccinat (PBS)</u>	27
6.	<u>Fazit</u>	29
7.	<u>Literaturverzeichnis</u>	31

Abkürzungen

BDO	1,4-Butandiol (engl.: 1,4- Butanediol)	NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
CCS	Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoffdioxid (engl.: Carbon Capture and Storage)	PA	Polyamid (engl.: Polyamide)
CCU	Abscheidung und Nutzung von Kohlenstoffdioxid (engl.: Carbon Capture and Utilization)	PA 6	Polyamid 6 (engl.: Polyamide 6)
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH	PBS	Polybutylensuccinat (engl.: Polybutylene Succinate)
DE	Deutschland	PE	Polyethylen (engl.: Polyethylene)
EDM-i	Modell des Wuppertal Institut	PET	Polyethylenterephthalat (engl.: Polyethylene Terephthalate)
ENSPRESO	Energiesystem-Potential-Ressourcenoptimierung	PLA	Polymilchsäure (engl.: Polylactic Acid)
ER	Emissionsreduktion	PMMA	Polymethylmethacrylat (engl.: Polymethyl Methacrylate)
GWP	Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potential)	PP	Polypropylen (engl.: Polypropylene)
HDPE	Polyethylen hoher Dichte (engl.: High-Density Polyethylene)	PTA	Terephthalsäure (engl.: purified terephthalic acid)
HMF	Hydroxymethylfurfural	PUR	Polyurethan (engl.: Polyurethane)
HH	Haushalte	PVC	Polyvinylchlorid (engl.: Polyvinyl Chloride)
HVO	Hydrierte Pflanzenöle (engl.: Hydrogenated vegetable oils)	SA	Bernsteinsäure/Succinylsäure (engl.: Succinic Acid)
KEA	Kumulierter Energieaufwand (engl.: Cumulative Energy Demand)	THG	Treibhausgase
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	TRL	Technologiereifegrad (engl.: Technology Readiness Level)
LDPE	Polyethylen niedriger Dichte (engl.: Low-Density Polyethylene)	VCI	Verband der Chemischen Industrie
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (engl.: Land Use, Land-Use Change and Forestry)		
MEG	Monoethylenglykol (engl.: Monoethylene Glycol)		

Hintergrund und Zielsetzung

Das GreenFeed-Projekt

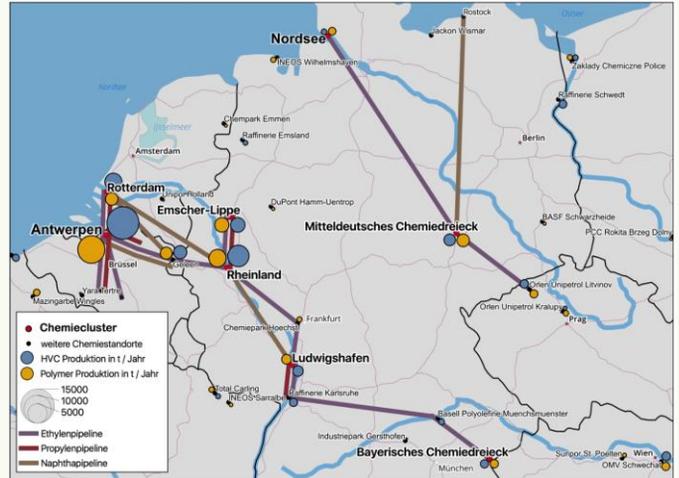
Die Herstellung von Kunststoffen basiert derzeit überwiegend auf Erdöl und Erdgas. Auch die Energieversorgung für die Kunststoffproduktion erfolgt zum größten Teil aus fossilen Energieträgern. Die Kunststoffindustrie steht daher vor der großen Herausforderung, sowohl die Rohstoff- als auch die Energiebasis zu transformieren, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Vor diesem Hintergrund war es das Ziel des Projektes „Green Feedstocks for a Sustainable Chemistry (GreenFeed)“, Wege für den Übergang der fossil dominierten Kunststoffindustrie hin zu einem zirkulären und klimaneutralen System auf Basis erneuerbarer Rohstoffe und Energieträger aufzuzeigen. Das Untersuchungsgebiet im Projekt GreenFeed umfasste die Industrieregion zwischen Antwerpen, Rotterdam und Rhein-Ruhr sowie weitere deutsche Chemieregionen wie das Nordsee-Cluster, das Bayerische und das Mitteldeutsche Chemiedreieck.

Für den Prozess der Defossilisierung der Kunststoffindustrie in diesen Chemieregionen wurden folgende Technologieoptionen im Projekt betrachtet:

- ≙ Mechanisches und chemisches Recycling
- ≙ Biopolymerproduktion
- ≙ Erneuerbarer Wasserstoff
- ≙ Abscheidung von Kohlenstoffdioxid und dessen Nutzung (CCU) oder Speicherung (CCS)

Dabei müssen die Produktionsketten dieser betrachteten Technologieoptionen nicht vollständig im Untersuchungsgebiet angesiedelt sein. Rohstoffe und Zwischenprodukte können auch importiert werden.

Die Produktionsketten wurden mit definierten Kennzahlen technisch, ökonomisch und ökologisch beschrieben und in das vom Wuppertal Institut entwickelte Modell EDM-i integriert. Zudem wurden speziell für die Technologieoptionen der Biopolymerproduktion die deutschen und europäischen Biomasseverfügbarkeiten ermittelt und ebenfalls in das Modell implementiert. Weitere Bestandteile des Modells sind bestehende Produktionskapazitäten und -strukturen, die abgeschätzte zukünftige Kunststoffnachfrage und sonstige Rahmenbedingungen der Kunststoffindustrie. Unter der Zielsetzung der Klimaneutralität bis 2050 und der Erfüllung der Kunststoffnachfrage wird im Modell das künftige Kunststoffproduktionssystem so optimiert, d. h. nur die Produktionsketten eingesetzt und so räumlich verteilt, dass die Gesamtkosten über den betrachteten Zeitraum minimiert werden. Aus den Ergebnissen dieser Modellierung und durchgeführter Stakeholder-Workshops wurden robuste Technologien, mögliche Game Changer sowie Empfehlungen für unterstützende Rahmenbedingungen auf dem Weg zur Defossilisierung in einer Roadmap dargestellt. Die Beschreibung sowie die technische, ökonomische und ökologische Bewertung der Produktionsketten der betrachteten Technologien werden zudem in Fokusheften veröffentlicht.



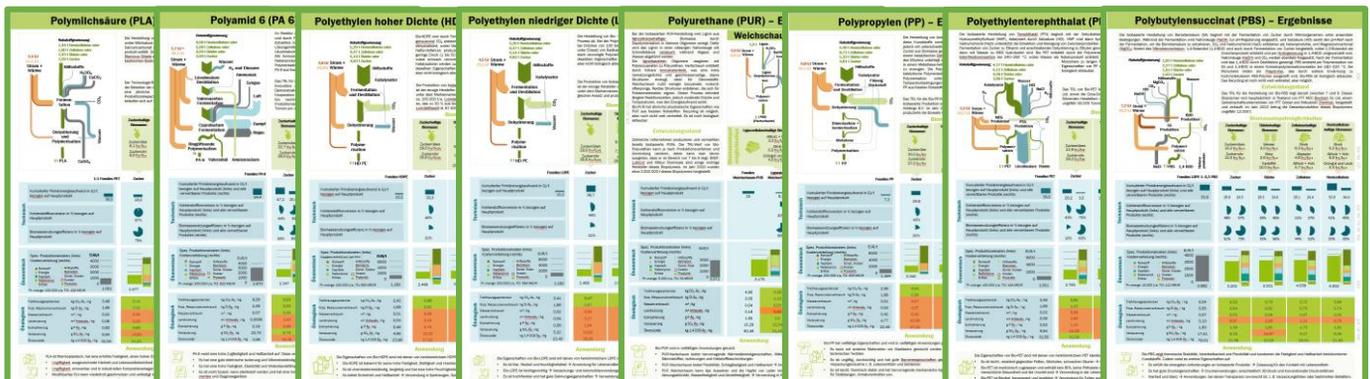
[1,2]

Fokusheft „Marktrelevante Biopolymere. Technologie, Ökonomie & Nachhaltigkeit im Fokus“

Dieses Fokusheft umfasst eine Einführung in das GreenFeed-Projekt, die Darstellung der Biomasseverfügbarkeit für die Biopolymerproduktion, eine Beschreibung der verwendeten Bilanzierungs- und Bewertungsmethoden, die Technologiesteckbriefe der betrachteten Biopolymere mit Kurzbeschreibung, Entwicklungsstand, typischen Anwendungen, technischen, ökonomischen und ökologischen Bewertungskennzahlen sowie eine qualitative Interpretation der Bewertungsergebnisse und abschließend ein Fazit. Die einzelnen Technologiesteckbriefe der betrachteten Biopolymere sind unten als eine Art Vorschau dargestellt.

Der Fokus der Biopolymerbetrachtung liegt auf der Transformation der Rohstoffquellen, nicht der Energieversorgung.

[1]



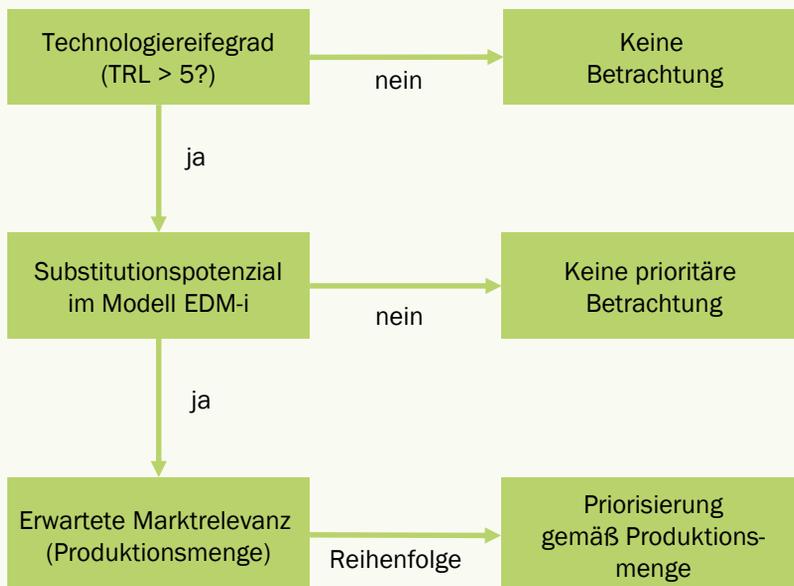
Hintergrund und Zielsetzung

Ausgewählte Biopolymere

Viele wichtige Polymere können mittlerweile auf biobasiertem Weg hergestellt werden. Dabei ist die effiziente Herstellung von Monomeren (Vorprodukte der Polymere) aus Biomasse ein wichtiger Schlüssel. Aus Monomeren, die nicht aus fossilen Rohstoffen gewonnen werden, wie beispielsweise Milchsäure, lassen sich innovative Polymerprodukte wie Polymilchsäure (PLA) herstellen. Diese Polymere weisen zwar eine andere chemische Zusammensetzung auf, können jedoch aufgrund ihrer strukturellen Eigenschaften für ähnliche Anwendungen wie herkömmliche Polymere genutzt werden, etwa in der Verpackungsindustrie, und somit fossile Polymere ersetzen. Alternativ können bereits heute verwendete und petrochemisch erzeugte Monomere wie Ethylen, Propylen oder Terephthalsäure durch biobasierte Monomere substituiert und somit die bestehenden Polymerisationsanlagen für die Herstellung der sogenannten Drop-In-Polymere Bio-Polyethylen, Bio-Propylen oder Bio-Polyethylenterephthalat genutzt werden. Damit kann ein Rohstoffwechsel bei etablierten Produkten erfolgen.

Innerhalb des GreenFeed-Projektes erfolgte die Auswahl der zu bewertenden Biopolymere anhand von drei Kriterien: der Technologiereifegrad (TRL), die Möglichkeit, die im Modell EDM-i enthaltenen petrochemisch erzeugten Polymere zu ersetzen, sowie die erwartete globale Produktionskapazität für 2027. Aus dem so erzeugten Ranking wurden sieben Biopolymere (mit jeweils mehr als 1 kt/a Produktion) ausgewählt.

Auswahlmatrix



Biopolymer-Ranking

Biopolymer	TRL	Polymer- substitut	Produktion 2027 in Mio. t
<u>Polymilchsäure (PLA)</u>	8-9	PET, PS, PP	2,4
<u>Polyamid (PA)</u>	5-7	PA	1,2
<u>Polyethylen (PE)</u>	7-9	PE	0,7
<u>Polyurethan (PUR)</u>	7-9	PUR	0,4
<u>Polypropylen (PP)</u>	7-9	PP	0,4
<u>Polyethylenterephthelat (PET)</u>	7-9	PET	0,1
<u>Polybutylensuccinat (PBS)</u>	7-9	PP, PE	0,002
Polymethylmethacrylat (PMMA)	5-9	PMMA	0,0
Polyvinylchlorid (PVC)	7-9	PVC	0,0
Epoxidharze (ER)	9	kein	1,5

Biomasseverfügbarkeit

Die im Rahmen des Projektes entwickelten Szenarien zur Biomasseverfügbarkeit für die Chemieindustrie beinhalten den Status Quo sowie Zukunftsszenarien für die Jahre 2030 und 2050. Als Rohstoffquellen sind nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo), Holz sowie biogene Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle berücksichtigt. Im Allgemeinen handelt es sich bei den Biomasseverfügbarkeits-Szenarien um an Nachhaltigkeits- sowie Restriktionsaspekte angelegte Szenarien, welche im Folgenden für Rohstoffquellen in Deutschland sowie der EU beschrieben werden. Es werden drei Verfügbarkeits-Szenarien unterschieden: gering, mittel, groß. Diese ergeben sich je aus den definierten Ausprägungen der folgend genannten einbezogenen Einflussfaktoren. Die Erhebung relevanter Daten basiert zunächst auf der Auswertung von Datenveröffentlichungen, Publikationen und Literatur zu den genannten Rohstoffquellen.

Der Status Quo für NawaRo in Deutschland ist mithilfe derzeitiger Industriepflanzenverwendungen der Chemie (13 % der eingesetzten Rohstoffe sind biogen in 2020) sowie entsprechender Flächenbedarfe beschrieben. Darauf aufbauend werden in Anlehnung an folgende Einflussfaktoren zukünftige Szenarien für die Industriepflanzenbereitstellung in der Chemieindustrie formuliert:

- (1) politische Zielsetzungen der EU-Kommission zu erneuerbaren Kohlenstoffen
- (2) politische Zielsetzungen in Deutschland in Bezug auf Flächeneinsparungen durch eine Verbrauchsreduktion von konventionellen Biokraftstoffen
- (3) mögliche Flächenverbrauchseinsparungen durch einen zukünftigen Ernährungswandel in Deutschland; zukünftige Importmengen werden entweder gemäß den derzeitigen Einsatzstoffmengen (absolut) oder Einsatzstoffanteilen (relativ) von Importen fortgeschrieben

Die Biomasseverfügbarkeit von (Derb-)Holz für die Chemieindustrie in Deutschland basiert auf der Verschneidung von Daten für das perspektivische Holz-Potenzial (Rohholzpotenziale abzüglich Totholz) mit zukünftigen Bedarfen für anderweitige stoffliche (z. B. klassische Holzverarbeitende Industrie) und energetische (Privathaushalte und Biomasseanlagen) Nutzungen. Zur Abschätzung von zukünftigen konkurrierenden Holzbedarfen werden derzeitige Nutzungen mit den entsprechenden Bedarfsszenarien kombiniert:

- (1) Förderszenario
- (2) Referenzszenario
- (3) Restriktionsszenario.

Das Potenzial an Holz bildet dabei einige Nachhaltigkeitsanforderungen ab, jedoch können bislang nicht alle perspektivisch relevanten Nachhaltigkeitsanforderungen (z. B. Biodiversitäts- & Land use, Land Use Change and Forestry (LULUCF)-Anforderungen) in Gänze dargelegt werden.

Das Potenzial von biogenen Abfällen und Reststoffen in Deutschland basiert auf Daten der DBFZ-Ressourcendatenbank. Zukünftige Potenziale sind anhand maßgeblicher Entwicklungstrends (z. B. Entwicklung Tierzahlen) quantifiziert. Anschließende Verfügbarkeits-Szenarien von biogenen Abfällen und Reststoffen für die Chemie orientieren sich an:

- (1) Nachhaltigkeitsrestriktionen und Mobilisierungsannahmen
- (2) Nutzungskonkurrenzen
- (3) perspektivischen Kaskadenfaktoren durch eine erhöhte stoffliche Nutzung von Biomasse sowie
- (4) Annahmen zu Importen.

Für die Bezugsebene der anderen EU-Länder dient eine einheitliche Datengrundlage (ENSPRESO) zur Beschreibung der europäischen Potenziale. Auch hier werden Annahmen zu perspektivischen Nutzungskonkurrenzen für insbesondere energetische Verwendungen (Strom, Wärme und Verkehr) berücksichtigt, um auf ein verbleibendes Delta der Biomasseverfügbarkeit in EU-Ländern (ohne Deutschland) für die Chemie zu schließen. Ergänzt werden diese Mengen szenarioabhängig von weiteren Importen in die EU.

Die jeweiligen Biomasseverfügbarkeits-Szenarien für die Chemieindustrie sind auf der folgenden Seite in einer Kurzcharakteristik zunächst für Industriepflanzen (NaWaRos), Derbholz, Rest-/Abfallstoffe sowie Nebenprodukte sowie EU-Ebene getrennt zusammengestellt. Für die zusammenfassenden Darstellungen der Biomasseverfügbarkeiten auf Seite 10 werden diese je in den Szenariostufen gering, mittel, hoch aufaddiert. Die Biomasseverfügbarkeiten sind zunächst in Tonnen dargestellt. In einem weiteren Schritt wurden diese Mengen zudem gemäß der jeweiligen Rohstoffcharakteristika der Einzelbiomassen in Inhaltsstoff-Potenziale (Zucker, Stärke, Zellulose, Hemicellulose, Lignin) zusammengefasst und in das Modell EDM-i übergeben. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit werden die Biomasseverfügbarkeits-Szenarien auf der nächsten Seite jedoch nur in Tonnen und nicht in Inhaltsstoffen dargestellt.

[3-8]

[9-16]

[15,17-22]

[23-28]

Biomasseverfügbarkeit

Stoffliche Einsatzmengen in der chemischen Industrie in Deutschland (2020, 2030 und 2050) – geschätzt nach Herkunft

Flächenverfügbarkeits-Szenarien und Verfügbarkeits-Szenarien Industripflanzen (NaWaRo) aufgrund Zielsetzungen bzw. Flächenverbrauchs-einsparungen, Deutschland	2020		2030						2050					
	Status Quo		Niedrig		Mittel		Hoch		Niedrig		Mittel		Hoch	
	Status Quo (Ø 2015-2019)		Status Quo (Ø 2015-2019) Fortschreibung		Ziel (20 % EE-Kohlenstoff in 2030, 13 % biogen in 2020)		Status Quo + Flächeneinsparung Reduktion (-50 %) konv. Biokraftstoffe (stofflich 50 %, Chemie 50 %) + Reduktion (-10 %) weniger Fleisch (stofflich 50 %, 50 % in Chemie)		Ziel (20 % EE-Kohlenstoff in 2030, derzeit 13 % biogen)		Status Quo + Flächeneinsparung Reduktion (-100 %) konv. Biokraftstoffe (stofflich 50 %, Chemie 50 %) + Reduktion (-10 %) weniger Fleisch (stofflich 50 %, 50 % in Chemie)		Status Quo + Flächeneinsparung Reduktion (-100 %) konv. Biokraftstoffe (stofflich 75 %, davon Chemie 75 %) + Reduktion (-46 %) weniger Fleisch (stofflich 50 %, 50 % in Chemie)	
	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import
Flächenverfügbarkeit Industripflanzen im Inland (Mio. ha)	0,3	-	0,3	-	0,4	-	0,6	-	0,4	-	0,7	-	1,5	-
Industripflanzen (Mio. t)	1,0	1,5	1,0	1,5	1,6	1,5	2,0	2,8	1,6	1,5	2,4	1,7	5,4	7,6
Verfügbarkeits-Szenarien Derbholz, Deutschland	2020 (2025)		2030						2050					
	Status Quo		Niedrig		Mittel		Hoch		Niedrig		Mittel		Hoch	
	Status Quo (Verbrauch UPM, Leuna)		Zukünftiges Angebot [WEHAM, Naturschutzszenario] abzgl. zukünftige Nachfrage (Derbholznutzung Status Quo) [Einschlagsrückrechnung]* Förderszenario Nutzung 2030 [Glasenapp]		wie 2030 Niedrig* Referenzszenario Nutzung 2030 [Glasenapp]		wie 2030 Niedrig* Restriktionsszenario Nutzung 2030 [Glasenapp]		wie 2030 Niedrig* Förderszenario Nutzung 2050 [Glasenapp]		wie 2030 Niedrig* Referenzszenario Nutzung 2050 [Glasenapp]		wie 2030 Niedrig* Restriktionsszenario Nutzung 2050 [Glasenapp]	
	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import
In Mio. tTM	0,3	-	0*	-	0*	-	1,5	-	0*	-	0*	-	0,6	-
Verfügbarkeits-Szenarien biogener Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte, Deutschland	2020		2030						2050					
	Status Quo		Niedrig		Mittel		Hoch		Niedrig		Mittel		Hoch	
	-		Mobilisierbares Potenzial=10 %, davon 10 % Mobilisierung für Chemie; Anteil energetisch/stofflich genutztes Potenzial für Chemie=0 %; Importfaktor feste Biomasse=0 %		Mobilisierbares Potenzial=15 %, davon 15 % Mobilisierung für Chemie; Anteil energetisch/stofflich genutztes Potenzial für Chemie=1 %; Importfaktor feste Biomasse=0 %		Mobilisierbares Potenzial=20 %, davon 20 % Mobilisierung für Chemie; Anteil energetisch/stofflich genutztes Potenzial für Chemie=2 %; Importfaktor feste Biomasse=100 %		Mobilisierbares Potenzial=30 %, davon 55 % stofflich, davon 20 % für Chemie; Verhältnis stoffl./energ. Nutzung: 55/38 %; Kaskadenfaktor=5 %; Anteil energetisch/stofflich genutztes Potenzial für Chemie=2 %; Importfaktor feste Biomasse=50 %		Nicht mobilisierbares Potenzial=+30 %; Mobilisierbares Potenzial=45 %, davon 60 % stofflich, davon 40 % für Chemie; Verhältnis stoffl./energ. Nutzung: 60/33 %; Kaskadenfaktor=10 %; Anteil energetisch/stofflich genutztes Potenzial für Chemie=4 %; Importfaktor feste Biomasse=0 %		Mobilisierbares Potenzial=60 %, davon 65 % stofflich, davon 60 % für Chemie; Verhältnis stoffl./energ. Nutzung: 65/28 %; Kaskadenfaktor=15 %; Anteil energetisch/stofflich genutztes Potenzial für Chemie=8 %; Importfaktor feste Biomasse=100 %	
	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import
In Mio. tTM	0,2**	-	0,3	-	1,5	-	2,9	1	2,7	0,5	5	-	14,7	4,6
Verfügbarkeits-Szenarien Biomasse, EU (ohne Deutschland)	2020		2030						2050					
	Status Quo		Niedrig		Mittel		Hoch		Niedrig		Mittel		Hoch	
	-		Biomassepotenzial - niedriges Szenario EU ohne Deutschland [Ruiz et al./Enspresso] abzgl. energetische Bedarfe EU [EU KOM]; Importe basierend auf [Cefic]		Biomassepotenzial - mittleres Szenario EU ohne Deutschland [Ruiz et al./Enspresso] abzgl. energetische Bedarfe EU [EU KOM]; Importe basierend auf [Cefic]		Biomassepotenzial - hohes Szenario EU ohne Deutschland [Ruiz et al./Enspresso] abzgl. energetische Bedarfe EU [EU KOM]; Importe basierend auf [Cefic]		Biomassepotenzial - niedriges Szenario EU ohne Deutschland [Ruiz et al./Enspresso] abzgl. energetische Bedarfe EU [EU KOM]; Importe basierend auf [Cefic]		Biomassepotenzial - mittleres Szenario EU ohne Deutschland [Ruiz et al./Enspresso] abzgl. energetische Bedarfe EU [EU KOM]; Importe basierend auf [Cefic]		Biomassepotenzial - hohes Szenario EU ohne Deutschland [Ruiz et al./Enspresso] abzgl. energetische Bedarfe EU [EU KOM]; Importe basierend auf [Cefic]	
	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import
In Mio. tTM	-	-	190,9	98,6	322,8	134,1	736,6	183,4	95	100,7	129	191,3	484,6	278,5

* gemäß Methodik stehen für den Chemiesektor in zwei Szenarien (Nachfrage-Szenarien „Förderung“ und „Referenz“) keine Potenziale zur Verfügung, da hier die genutzten Mengen die zur Verfügung stehenden Holzpotenziale übersteigen; Importe von Holz werden in den Szenarien nicht berücksichtigt.

** Herkunft von tierischen Fetten in Datenquelle nicht genau spezifiziert, hier Herkunft dem Inland zugeordnet.

[3-8]

[9-16]

[15, 17-22]

[23-28]

[30-33, 96]

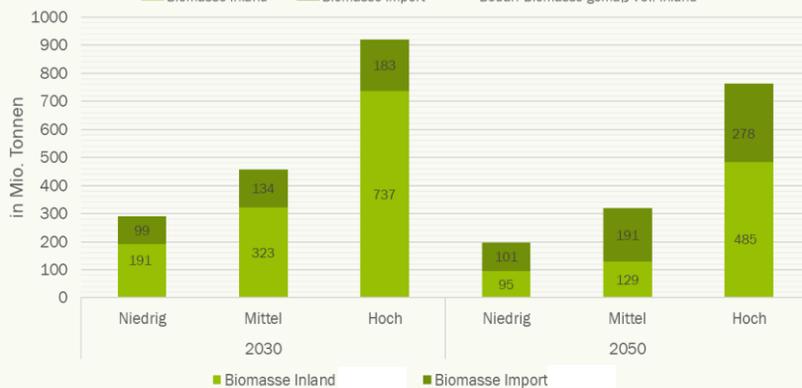
Biomasseverfügbarkeit

Die Biomasseverfügbarkeitsszenarien (grüne Balken) für Deutschland stellen zunächst den derzeitigen Biomasseverbrauch im Status Quo dar. Dabei sind bereits jene Mengen berücksichtigt, welche erst 2025 als Verbrauch durch die Bioraffinerie in Leuna zu den anderweitigen Verbräuchen hinzukommen. Für die Jahre 2030 und 2050 ergeben sich je nach Szenariobeschreibung für die jeweiligen Rohstoffquellen Bandbreiten der Biomasseverfügbarkeit, inklusive Importen insgesamt 2,9 bis 10,2 Mio. Tonnen in 2030 und 6,2 bis 32,9 Mio. Tonnen in 2050. Nur in den hohen Biomasseverfügbarkeitsszenarien können inländische Biomassemengen den Bedarf (blaue Linie) gemäß Verband der Chemischen Industrie (VCI) abdecken. In den anderen Szenarien (niedrig und mittel) müssten die Importanteile noch höher liegen als bereits angenommen, um den Bedarf zu decken. Hieran zeigt sich analog zu Wasserstoff, dass auch bezüglich biogenem Kohlenstoff perspektivisch weiterhin eine Importabhängigkeit in Deutschland bestehen könnte. Die Biomasseverfügbarkeitsszenarien für die EU (ohne DE) bewegen sich in Bandbreiten von 290 bis 920 Mio. Tonnen in 2030 und 196 bis 763 Mio. Tonnen in 2050. Die Importanteile liegen dabei über alle Jahre und Szenarien hinweg bei 20 bis 60 %.

Szenarien der Biomasseverfügbarkeit und des Bedarfs in Deutschland



Szenarien der Biomasseverfügbarkeit in der EU



Fazit

Insgesamt weisen die oben beschriebenen Biomasseverfügbarkeiten erhebliche Bandbreiten auf, welche dahingehend die großen Unsicherheiten der Daten für zukünftige Potenziale und Verfügbarkeiten widerspiegeln. Es bestehen zudem bereits jetzt hohe Nutzungsgrade bei relevanten Stoffströmen, sodass die Frage der Umlenkung von bestehenden Nutzungen an Relevanz gewinnt. Dabei spielt auch die Debatte über bestehende Flächennutzungen und -verbräuche eine wesentliche Rolle. Insbesondere bei ambitionierter Umsetzung des Kaskadenprinzips (gemäß REDII-Revision*) sind langfristig höhere stoffliche Nutzungsmengen aufgrund einer zunehmenden Einschränkung der energetischen Nutzung von holzartiger Biomasse denkbar.

Es wird zudem sehr klar, dass sektorenübergreifende Optimierungs- und Mobilisierungsstrategien einzelner Rohstoffe erforderlich sind. Die Importmengen gilt es perspektivisch insbesondere hinsichtlich der Bedarfe und Nachhaltigkeitsauswirkungen in den Herkunftsländern zu prüfen. Die nationalen Biomassepotenziale müssen hingegen noch stärker auf die Erfüllung perspektivischer Nachhaltigkeitsanforderungen (z. B. zu Biodiversität und Senkenleistungen (LULUCF)) angepasst werden. Die Chemieindustrie bietet jedoch insbesondere aufgrund einer erhöhten stofflichen Biomassenutzung das Potenzial für höhere Nutzungskaskaden bei einer hohen Wertschöpfung, was Vorteile gegenüber anderen Nutzungssektoren ermöglicht. Dafür ist jedoch auch ein Ausgleich der regulatorischen Schiefelage zwischen energetischen und stofflichen Biomasseanwendungen erforderlich. Die derzeitigen Regularien, z. B. die Quotenregelungen der REDII-Revision fördern verstärkt die energetische Biomassenutzung.

* RED = Renewable Energy Directive; REDII-Revision: Richtlinie (EU) 2018/2001 mit Änderungen, Richtlinie (EU) 2023/2413

Bilanzgrenzen und Bewertungsrahmen

Massen- und Energiebilanzierung

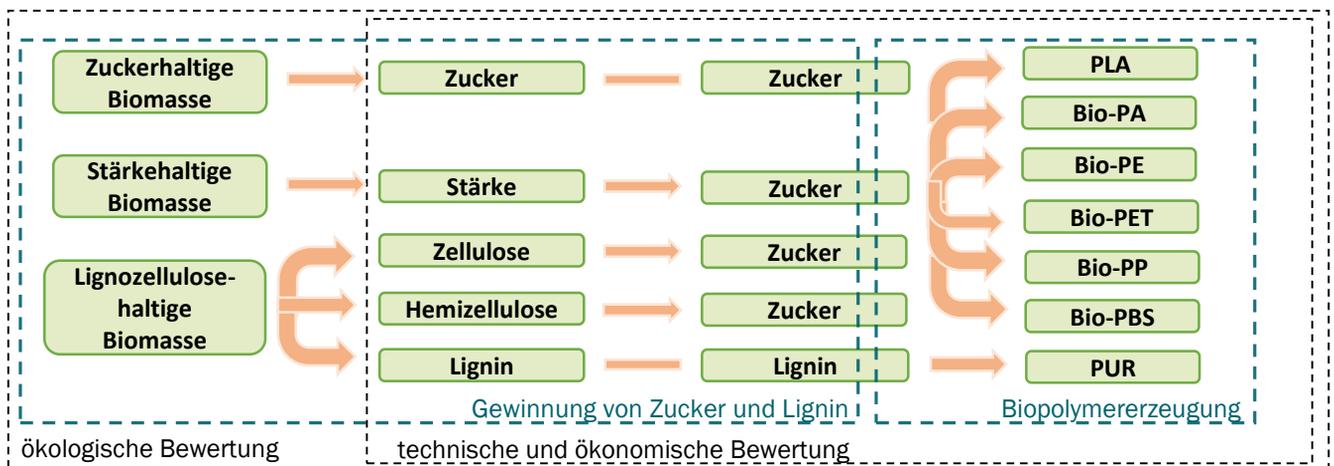
Die Erhebung der Massen- und Energiebilanzen erfolgte auf Basis einer Literaturrecherche. Soweit in der Literatur verfügbar, wurden Daten aus tatsächlichen Produktionsprozessen verwendet. Bei innovativen Prozessen basieren die Bilanzen auf Modellierungen und Annahmen. Wenn in den Literaturangaben die Wärmerückgewinnung als gängige Praxis berücksichtigt wurde, wurde dies auch in unseren Bilanzierungen übernommen. Gleiches gilt für Prozesswasserrezirkulation. Die Bilanzen wurden nicht als Blackbox der gesamten Produktionsanlage, sondern auf Ebene der einzelnen Konversionsprozesse und Verarbeitungsschritte erstellt. Die Rückmeldungen der Stakeholder im Rahmen der Stakeholder-Workshops dienten unter anderem dazu, die Qualität und Praxishöhe der Ergebnisse zusätzlich abzusichern.

Aus Gründen der Vereinheitlichung und Modularisierung sind die Bilanzierungen in zwei Abschnitte aufgeteilt: Der erste Abschnitt beinhaltet die Gewinnung der Zwischenprodukte Zucker und Lignin aus Biomasse, der zweite die Polymererzeugung aus den Zwischenprodukten Zucker und Lignin. Zucker kann aus zucker-, stärke- sowie lignozellulosehaltiger Biomasse gewonnen werden. Lignin wird aus lignozellulosehaltiger Biomasse extrahiert. Während Zucker der Ausgangsstoff für die Biopolymere PLA, PA, PE, PP, PET und PBS ist, stellt Lignin in unserer Betrachtung nur den Ausgangsstoff für das Biopolymer PUR dar. Die modularen Massen- und Energiebilanzen sind je mit einem Sankey-Diagramm veranschaulicht. Eine detaillierte Erläuterung aller errechneten Kenngrößen ist auf der Seite [Bilanzierungs- und Bewertungsmethoden](#) zu finden.

Bewertungsrahmen

Die Massen- und Energiebilanzen stellen die Grundlage für die technische, ökonomische und ökologische Bewertung dar. Diese Bewertung erfolgt anhand von Bewertungskriterien, welche in Abstimmung mit dem Projektkonsortium und relevanten Stakeholdern in einem Online-Workshop festgelegt wurden. Diese sind auf der Seite [Bilanzierungs- und Bewertungsmethoden](#) beschrieben.

Diese technischen, ökonomischen und ökologischen Bewertungskriterien werden zum einen für die Gewinnung von Zucker und Lignin separat angewendet, um die verschiedenen Bereitstellungsverfahren einzeln vergleichen zu können. Zum anderen werden sie für die Bewertung der gesamten Biopolymerproduktionsketten genutzt. Die Systemgrenzen der technischen und ökonomischen Bewertung unterscheiden sich jedoch von denen der ökologischen Bewertung. Die ökologischen Bewertungskriterien beziehen sich auf die gesamte Prozesskette von der Gewinnung der Zwischenprodukte bis zum erzeugten Biopolymer, wobei je ein beispielhafter Anwendungsfall für die Biomassen (z. B. Zuckerrüben für zuckerhaltige Biomasse, Mais für stärkehaltige Biomasse, Rest- und Altholz für zellulose- und hemizellulosehaltige Biomasse) definiert wurde. Für die technische Bewertung der Biopolymererzeugung ist es sinnvoller, die Systemgrenze nicht bei einer spezifischen Biomasse wie Zuckerrübe oder Mais, sondern abstrakt bei den Inhaltsstoffen der Biomassen anzusetzen: Zucker, Stärke, Zellulose, Hemizellulose und Lignin. So ist die Analyse universeller und unabhängig von spezifischen Biomassearten. Diese Systemgrenze wurde auch für die ökonomische Bewertung verwendet, wobei die Rohstoffkosten auch die vorgelagerten Prozessschritte zur Gewinnung der Zwischenprodukte (Zucker, Lignin) beinhalten.

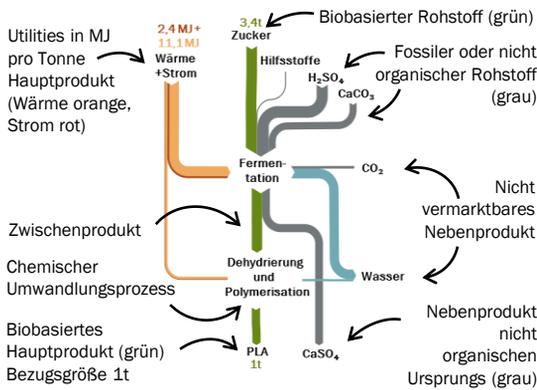


Technologiesteckbriefe

Für die Gewinnung der Zwischenprodukte Zucker und Lignin sowie für jedes ausgewählte Biopolymer sind Technologiesteckbriefe erstellt worden. Diese enthalten das jeweilige Sankey-Diagramm sowie die Ergebnisse der technischen, ökonomischen und ökologischen Bewertung. Darüber hinaus enthalten die Polymersteckbriefe eine Kurzbeschreibung der Polymerproduktion, den Entwicklungsstand, die Biomasseinputmöglichkeiten und typische Anwendungen. Die Steckbriefe sind je um eine qualitative Auswertung der Bewertungsergebnisse ergänzt.

Bilanzierungs- und Bewertungsmethoden

Darstellungsweise der Sankey-Diagramme in den Steckbriefen, mit Angabe von Massen- und Energieströmen je Tonne des Hauptproduktes



In einigen Fällen können Polymere über verschiedene Pfade hergestellt werden. In diesem Abschnitt wird das vorgestellte Polymer und der gewählte Pfad beschrieben. Außerdem werden der Technologiereifegrad (TRL) sowie typische existierende Produktionsanlagengrößen aufgeführt.

Biomasseinputmöglichkeiten

In diesem Abschnitt wird eine Auswahl von Biomassen vorgestellt, die für die Herstellung des Polymers in Frage kommen. Dabei werden zum einen die Inhaltsstoffe aufgezählt: Lignin, Zucker, Stärke, Zellulose, Hemizellulose. Außerdem werden hier auch Beispiele an Biomassen, aus denen diese Inhaltsstoffe gewonnen werden können, vorgestellt: z. B. Zuckerrübe, Mais, Holz, Grünschnitt. Für diese Beispiele an Biomassen wurden durchschnittliche Mengen angegeben, die für das jeweilige Polymer benötigt werden würden.



KEA für Produktion des fossilen Vergleichsproduktes → Hemizellulose

Technisch

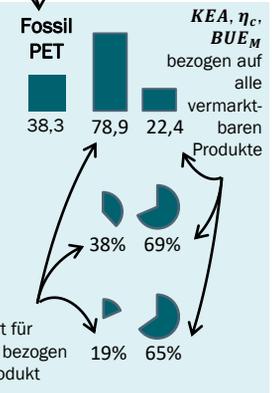
Der **kumulierte Primärenergieaufwand KEA** ist das Verhältnis des Energiebedarfs (Brennstoff, elektrische (el) und thermische (th) Energie) des Prozesses zum Hauptprodukt oder zur Gesamtmasse der Produkte. Die **Kohlenstoffkonversion η_c** ist eine wesentliche Bewertungsgröße für die Analyse der Massenbilanz und die Wiederfindung des Kohlenstoffs aus den Ausgangsstoffen in den Produkten. Im Gegensatz zu reinen Massenbilanzen enthält die η_c eine qualitative Aussage der tatsächlichen Kohlenstoffverwertung. Die **massenbezogene Biomassenutzungseffizienz BUE_M** ist das spezifische Verhältnis der nutzbaren Biomasse in den Produktströmen bezogen auf Input-Biomasse. Je näher das Verhältnis an 100 % liegt, desto effizienter ist die BUE und desto weniger Abfall fällt an.

$$KEA = \frac{E_{el} * \eta_{el} + E_{th} * \eta_{th}}{m_j + \sum m_k}$$

$$\eta_c = \frac{c_{c,i} * \dot{m}_i}{c_{c,j} * \dot{m}_j + \sum c_{c,k} * \dot{m}_k}$$

$$BUE_M = \frac{m_i}{m_j + \sum m_k}$$

- E** Energiebedarf in GJ
- η** Umwandlungseffizienz
- c_c** Kohlenstoffgehalt
- \dot{m}** Massenstrom
- el** elektrisch
- th** thermisch
- j** Hauptprodukt
- k** Nebenprodukt
- i** Inputbiomasse

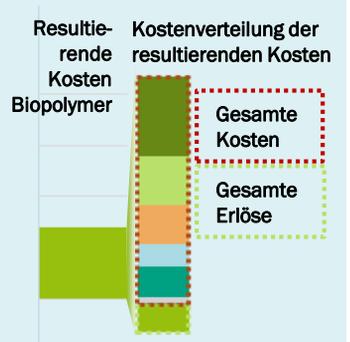


Berechneter Wert für KEA, η_c , BUE_M bezogen auf das Hauptprodukt

Ökonomisch

Gestehungskosten als Bewertungskriterium für die Biopolymere
Die Berechnung der spezifischen Produktgestehungskosten (GK_s) erfolgte gemäß VDI-Richtlinie 6025. Diese Kosten sind mit am Markt verfügbaren Preisen nicht vergleichbar. Für einige Biopolymere sind sie als zukünftig zu betrachten, da die Anlagen z.T. noch nicht real hochskaliert sind. Es werden kapital-, verbrauchs-, betriebsgebundene und sonstige Kosten sowie Erlöse) über einen definierten Betrachtungszeitraum berücksichtigt. Kapitalgebundene Kosten (KK) berücksichtigen alle Investitionen in Anlagen und Gebäude, welche über 20 Jahren abgeschrieben werden. Zusätzlich enthalten sind indirekte Kosten im Zusammenhang mit der Anlagen- und Gebäudeerrichtung. Verbrauchsgebundene Kosten (VK) beinhalten alle Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe. Betriebsgebundene Kosten (BK) enthalten die Personalkosten sowie die Wartungs- und Instandhaltungskosten. In den sonstigen Kosten werden Versicherungs- und Verwaltungskosten berücksichtigt. Den so anfallenden jährlichen Kosten werden die Erlöse (E) aus dem Verkauf von Nebenprodukten gegenübergestellt.

Rahmenbedingungen:
Basisjahr: 2022
Basis für Rohstoffe (dunkelgrün): Beinhaltet immer die Vorkette zu Zucker/Lignin, diese wird nicht gesondert dargestellt, sondern bei Gewinnung von Zucker und Lignin erläutert.



$$GK_s = \frac{KK + VK + BK - E}{Pr.-menge}$$

Pr.-menge: produzierte Menge Polymer, TCI: Total Capital Investment

Ökologisch

Ökobilanzierung unter Berücksichtigung verschiedener Umweltauswirkungen
Die ökologische Bewertung erfolgte nach der in den DIN-Normen 14040/14044 und 16760 standardisierten Methode der Ökobilanzierung. Als Bewertungskriterien wurden nebenstehende Umweltwirkungskategorien ausgewählt, die für die Nutzung und Konversion von Biomasse zu Biopolymeren relevant sind. Das Treibhauspotenzial (GWP) wurde mit der IPCC 2021-Methode und die weiteren Umweltwirkungen mit der ReCiPe 2016-Methode bewertet. Biogenes Kohlendioxid wird nach ISO 14067 bewertet, d. h. ein GWP von -1 für 1 kg CO_2 bei Entnahme aus der Atmosphäre und +1 für 1 kg CO_2 bei Freisetzung in die Atmosphäre am Lebenswegende. Da die Systemgrenze beim produzierten Biopolymer endet, wird das darin gebundene Kohlendioxid dem Polymer mit -1 kg CO_2 -Äq. pro kg CO_2 angerechnet. Bei Mehrproduktsystemen werden die Umweltwirkungen gemäß des C-Gehalts der Produkte diesen anteilig zugerechnet. Die Emissionsfaktoren der in den Polymerprozessketten eingesetzten Massen und Energien wurden der Ecoinvent-Datenbank entnommen.

Umweltwirkungskategorie	Einheit
Treibhausgaspotenzial	kg CO_2 Äq. /kg
Verbrauch fossiler Ressourcen	kg Öl Äq. /kg
Wasserverbrauch	m ³ /kg
Landnutzung	m ² Anbauäq. /kg
Süßwasser-Eutrophierung	g P Äq. /kg
Terrestrische Versauerung	g SO_2 Äq. /kg
Terrestrische Ökotoxizität	kg 1,4 DCB Äq. /kg

Äq.=Äquivalente, P=Phosphor, SO_2 = Schwefeldioxid, DCB=Dichlorbenzol

Die Umweltwirkungen der Biopolymere werden denen des fossilen Pendanten bzw. den petrochemisch erzeugten Polymeren, die potenziell ersetzt werden, gegenübergestellt. Grün markierte Werte liegen unter und orange markierte Werte über denen des entsprechenden fossilen Polymeren.

[27, 48, 49]

[34-36]

Literaturquellen

[37-40]

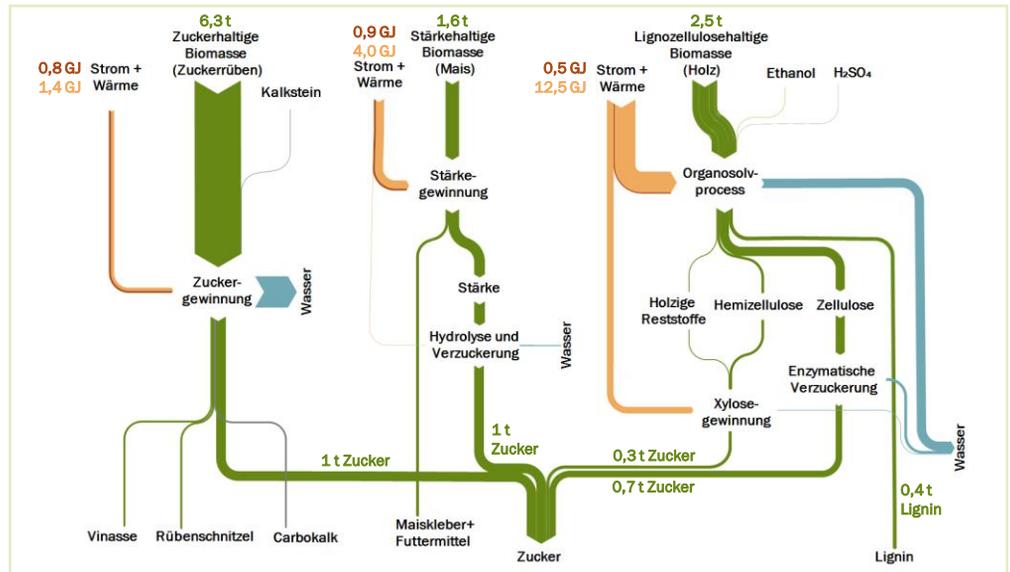
[41-47]

Gewinnung von Zucker und Lignin – Ergebnisse

Technisch: Die Bilanzgrenze für die Gewinnung von Zucker und Lignin wurde von der geernteten Biomasse bis zum verwertbaren Zwischenprodukt, also Zucker und Lignin, definiert. In diesem Steckbrief wird beispielhaft eine spezifische Biomasse (Zuckerrübe, Mais, Holz) betrachtet, um den Prozess darzustellen.

Ökonomisch: Die Bereitstellung von Zucker und Stärke wird in Marktpreisen dargestellt. Bei Stärke wird noch die Verzuckerung bilanziert. Bei den lignozellulosebasierten Organosolv-Verfahren und der weiteren Aufspaltung der darin enthaltenen Zucker wird der Prozess bilanziert und somit können die Kostenwerte für die Rohstoffe ermittelt werden.

Ökologisch: Die Bilanzgrenze umfasst den Anbau, die Ernte und die Zuckergewinnung bei zucker- und stärkehaltigen Biomassen sowie die Sammlung und Bereitstellung von Rest- und Abfallholz, den Lignozellulose-Aufschluss, die Extraktion von Hemizellulose, Zellulose und Lignin sowie die Verzuckerung von Hemizellulose und Zellulose zu Zucker bei lignozellulosehaltigen Biomassen. Es wurde je eine Beispielbiomasse gewählt (Zuckerrüben, Mais(stärke), Mix aus Rest- und Altholz).



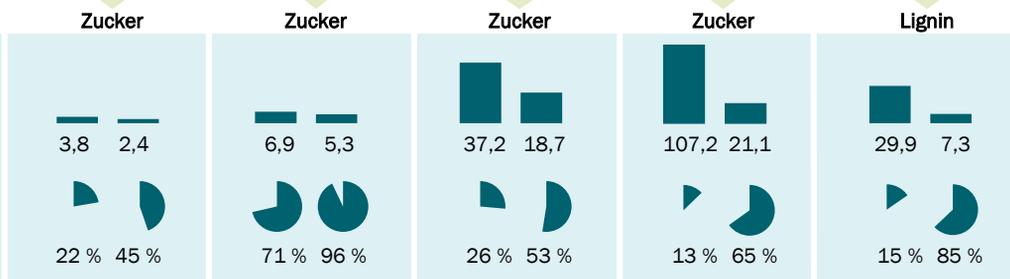
Biomasseinputmöglichkeiten

Zuckerhaltige Biomasse:	Stärkehaltige Biomasse:	Zellulosehaltige Biomasse:	Hemizellulosehaltige Biomasse:	Ligninhaltige Biomasse:
Zuckerrüben 6,3 t/t _{Zucker}	Weizen 1,8 t/t _{Zucker}	Stroh 3,9 t/t _{Zucker}	Stroh 3,2 t/t _{Zucker}	Altholz + Holz 6,3 t/t _{Lignin}
Zuckerrohr 7,7 t/t _{Zucker}	Mais 1,6 t/t _{Zucker}	Altpapier 3,0 t/t _{Zucker}	Altholz + Holz 7,8 t/t _{Zucker}	Stroh 5,6 t/t _{Lignin}
	Kartoffel 6,2 t/t _{Zucker}	Altholz + Holz 3,8 t/t _{Zucker}	Grüngut + Laub 3,3 t/t	Grüngut + Laub 4,5 t/t _{Lignin}

Technisch

Kumulierter Primärenergieaufwand in GJ/t bezogen auf das Hauptprodukt (links) und alle verwertbaren Produkte (rechts)

Biomassenutzungseffizienz in %

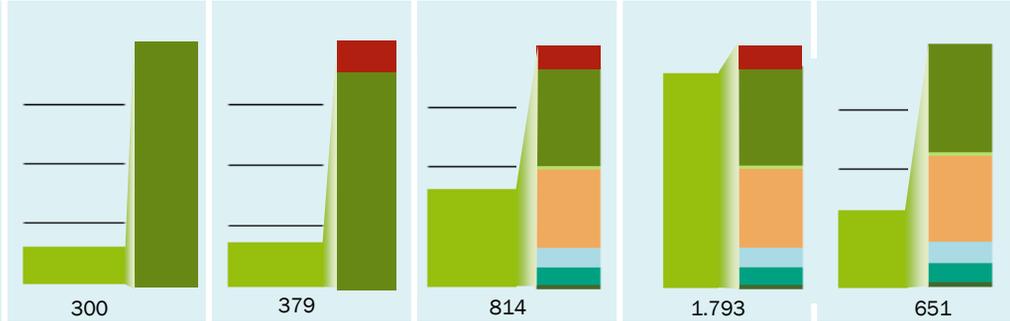


Ökonomisch

Spez. Rohstoffbereitstellungskosten, Kostenverteilung (rechts), Zucker und Stärke (orientiert an Marktpreis 2022)

EUR/t

- Marktpreis/Rohstoff
- Hilfsstoffe
- Energie
- Kapitalk.
- Nebenprod.
- Verzuckerung
- Betriebsk.
- Sonst. Kosten
- Produktk.



Ökologisch

- Treibhausgaspotenzial kg CO₂ Äq./kg
- Foss. Ressourcenverbr. kg Öl Äq./kg
- Wasserverbrauch m³/kg
- Landnutzung m² Anbauäq./kg
- Eutrophierung g P Äq./kg
- Versauerung g SO₂ Äq./kg
- Ökotoxizität kg 1,4 DCB Äq./kg

Treibhausgaspotenzial	0,31	0,73	0,68	0,62	1,54
Foss. Ressourcenverbr.	0,06	0,12	0,22	0,21	0,63
Wasserverbrauch	0,01	0,03	0,04	0,004	0,01
Landnutzung	0,67	2,27	0,78	0,46	1,94
Eutrophierung	0,06	0,38	0,31	0,36	0,64
Versauerung	2,5	15,09	3,25	0,87	2,97
Ökotoxizität	5,00	6,61	10,33	4,90	19,04

[27, 48/49, 60]

[47, 50, 51]

[51-55]

[44, 45, 47]

Gewinnung von Zucker und Lignin – Bewertung

Entwicklungsstand

Für die Gewinnung von Zucker und Lignin wurden die etablierten Verfahren der direkten Zuckergewinnung aus zuckerhaltiger Biomasse und die Gewinnung von Zucker aus Stärke ausgewählt. Beide werden seit langem in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Für die Zuckergewinnung aus lignozellulosehaltigen Biomassen wurde das Organosolv-Verfahren betrachtet, das im Labor- und Pilotmaßstab validiert wurde und dessen TRL auf 3 bis 6 geschätzt wird. Es führt zu Lignin, Zellulosefasern, Hemizellulose-Hydrolysat (HH) und reinem festen Lignin. Daher eignet es sich auch für die ligninbasierten Pfade, da das mit diesem Verfahren gewonnene Lignin im Vergleich zu anderen im Markt befindlichen Ligninarten eine deutlich höhere Qualität und Reinheit aufweist.

Technisch

Im Vergleich zu den anderen vorgestellten Biomassen hat die Zuckergewinnung aus Zuckerrübe den geringsten Energiebedarf. Dennoch erfordert der Prozess Wärme und Strom, insbesondere für die Eindampfung und Kristallisation der Zuckerlösung. Bei der Zuckergewinnung aus Zuckerrüben können Nebenprodukte wie Vinasse und Rübenschrot Potenzial für weitere Nutzung bieten, beispielsweise als Futtermittel oder in der Biogasproduktion, was die Biomassenutzungseffizienz verbessert. Die großen Abwassermengen, die noch Biomassebestandteile enthalten, führen jedoch insgesamt zu einer geringen Biomassenutzungseffizienz im Vergleich zu den anderen Biomassenutzungspfaden. Bei der Zuckergewinnung aus Mais entsteht als Nebenprodukt Maiskleber, der in Futtermitteln genutzt werden kann. Der Prozess benötigt moderate Mengen an Energie, vor allem für die enzymatische Hydrolyse der Stärke und die Trocknung der Endprodukte. Insgesamt ist die Stärkeausbeute und dadurch auch Zuckerausbeute von Mais sehr hoch, was sich positiv auf die Biomassekonversionseffizienz auswirkt. Die Holzverwertung zu Zucker und Lignin hat den höchsten Energiebedarf. Für den Organosolv-Aufschluss, bei dem Zellulose, Lignin und Hemicellulose voneinander getrennt werden, werden bereits Wärme und Strom in erheblichen Mengen benötigt. Die anschließende Aufbereitung der Hemizellulosezucker erfordert weiteren Energieeinsatz. Da die Xyloseausbeute gering ist, ist vor allem die Zuckergewinnung über den Hemizellulose-Pfad spezifisch gesehen sehr energieintensiv. Gleichzeitig verschlechtert sich trotz der vielen Nebenprodukte die massebezogene Biomassenutzungseffizienz, da mit den großen Wassermengen auch Biomassereste abgeschieden werden.

Ökonomisch

Zucker und Stärke werden derzeit als Commodities gehandelt, sodass eine gesonderte Bilanzierung ab Biomasse nicht zielführend ist. Allerdings unterliegen die Rohstoffpreise starken Schwankungen. Daher wurde mit Mittelwerten aus den Jahren 2020–2023 gerechnet. Für Zucker wurde so ein Marktpreis von 300 EUR/t zugrunde gelegt. Als Referenzfall, insbesondere im Vergleich zu anderen Rohstoffen als Holz, erscheint dieser Mittelwert jedoch als notwendige und sinnvolle Vergleichsgröße. Bei der berechneten Stärkeverzuckerung wird die Kostenverteilung durch die Rohstoffkosten bestimmt, da die kalkulierte Verzuckerung weniger als 10 % der Kosten ausmacht. Die Kosten für die Rohstoffherstellung aus den drei Organosolv-Pfaden über Zellulose, Hemizellulose und Lignin haben ihren größten Kostenanteil im eigentlichen Holzaufschlussprozess. Daher werden in diesem Bilanzfall die Kosten entsprechend ihrer Anteile am Prozessaufwand zugeordnet und verteilt. Daraus ergeben sich die unterschiedlichen Kosten für die drei Zwischenprodukte. Neben dem Holzpreis ergeben sich wesentliche Kosten aus dem Energieaufwand innerhalb des Prozesses, kleinere Kostenanteile sind Kapital- und Betriebskosten.

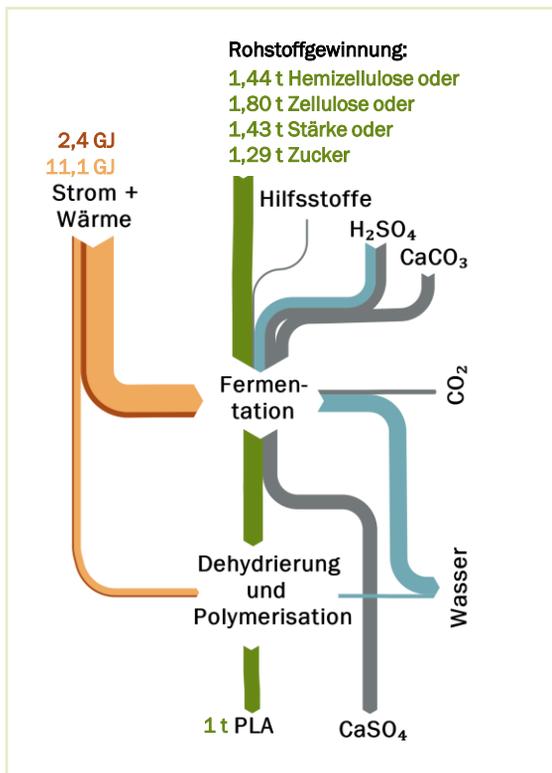
Ökologisch

Im Vergleich der Zuckergewinnung schneidet je nach Umweltwirkungskategorie entweder die Zuckergewinnung aus Zuckerrübe oder die aus Hemizellulose von Rest- und Altholz am besten ab. Der Zuckerrübenanbau ist zwar mit höheren Umweltwirkungen verbunden als die Bereitstellung von Rest- und Altholz, letzteres muss jedoch erst über den aufwendigen Organosolv-Prozess aufgeschlossen werden und zudem schließt sich die Verzuckerung zu Hemizellulose an. Der Organosolv-Prozess wird ebenso für die Gewinnung von Zellulose und Lignin angewendet. Die Umweltlasten werden aber gemäß des C-Gehaltes und der anfallenden Massen zu größeren Teilen auf Zellulose und Lignin als auf Hemizellulose verteilt. Die Extraktion von Lignin ist dann mit mehr Umweltlasten verbunden als die Gewinnung von Zucker aus der Zellulose. Insgesamt schneidet die Ligningewinnung in den meisten Umweltwirkungskategorien schlechter als die Zuckergewinnung ab. Die Zuckergewinnung aus Mais liegt im Mittelfeld der Umweltwirkungen. Der Anbau von Mais ist mit höheren Umweltlasten im Vergleich zum Anbau der Zuckerrübe verbunden. Dem schließt sich zusätzlich die Stärkeproduktion und die Zuckergewinnung an.

Zusammenfassung

Es wird deutlich, dass unter den betrachteten Möglichkeiten die Zuckergewinnung aus zuckerhaltiger Biomasse technisch, ökonomisch und ökologisch am besten abschneidet, da sie der direkteste und am wenigsten aufwendige Weg ist. Alle anderen Möglichkeiten sind bedingt durch Holzaufschluss (Organosolv-Verfahren) und/oder Verzuckerungsverfahren aufwendiger.

Polymilchsäure (PLA) – Ergebnisse



Die Herstellung von PLA beginnt mit der Fermentation von Zucker durch Hefen, wobei Milchsäure entsteht. Zur Neutralisation werden Schwefelsäure (H_2SO_4) und Calciumcarbonat ($CaCO_3$) eingesetzt, wodurch Calciumsulfat ($CaSO_4$) als Nebenprodukt anfällt. Die Milchsäure wird anschließend zu Lactid zyklisiert, welches mit Zinnoktaten als Katalysator bei 180-200°C polymerisiert wird. PLA ist unter bestimmten Bedingungen biologisch abbaubar und recycelbar.

Entwicklungsstand

Der Technologiereifegrad (TRL) von PLA liegt im Bereich von 8-9. Nature Works, der Betreiber der weltweit größten PLA-Produktionsanlage in den USA, verfügt über eine jährliche Produktionskapazität von rund 150.000 Tonnen. Die Produktionskapazitäten von Futero in Asien und Total Corbion in Thailand belaufen sich auf 100.000 bzw. 75.000 Tonnen pro Jahr.

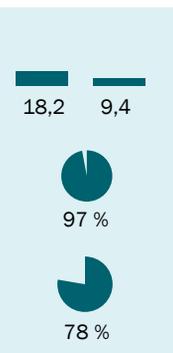
Biomasseinputmöglichkeiten

Zuckerhaltige Biomasse:	Stärkehaltige Biomasse:	Zellulosehaltige Biomasse:	Hemizellulosehaltige Biomasse:
Zuckerrübe 8,1 t _{TM} /t _{PLA}	Weizen 2,3 t _{TM} /t _{PLA}	Stroh 5,0 t _{TM} /t _{PLA}	Stroh 4,1 t _{TM} /t _{PLA}
Zuckerrohr 9,9 t _{TM} /t _{PLA}	Mais 2,0 t _{TM} /t _{PLA}	Altpapier 3,8 t _{TM} /t _{PLA}	Altholz + Holz 10,1 t _{TM} /t _{PLA}
	Kartoffel 7,9 t _{TM} /t _{PLA}	Altholz + Holz 4,9 t _{TM} /t _{PLA}	Grüngut + Laub 4,3 t _{TM} /t _{PLA}

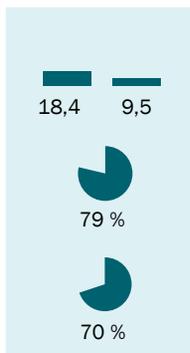
1:1 Fossil-basiertes PET

Technisch	1:1 Fossil-basiertes PET
Kumulierter Primärenergieaufwand in GJ/t bezogen auf Hauptprodukt (links) und alle verwertbaren Produkte (rechts)	39,5
Kohlenstoffkonversion in % bezogen auf Hauptprodukt	
Biomassennutzungseffizienz in % bezogen auf Hauptprodukt	

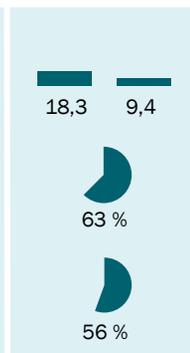
Zucker



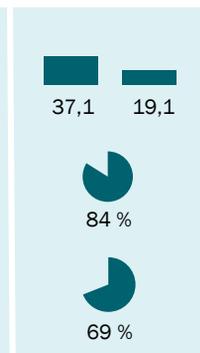
Stärke



Zellulose



Hemizellulose

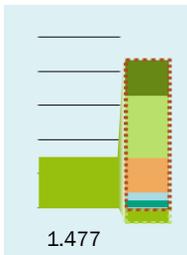


Ökonomisch

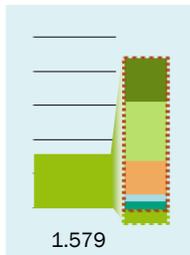
Spez. Produktionskosten (links), Kostenverteilung (rechts)	EUR/t
Rohstoff	4000
Energie	3000
Kapitalk.	2000
Nebenprod.	1000
Erlöse	0
Hilfsstoffe	
Betriebsk.	
Sonst. Kosten	
Kosten	
Produktk.	

Pr.-menge: 100.000 t/a, TCI: 128 MEUR 1.001

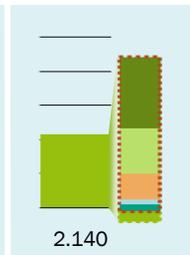
Zucker



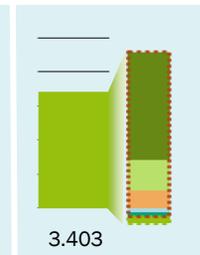
Stärke



Zellulose



Hemizellulose



Ökologisch

Treibhausgaspotenzial	kg CO ₂ Äq. /kg	3,48
Foss. Ressourcenverbrauch	kg Öl Äq. /kg	1,68
Wasserverbrauch	m ³ / kg	0,02
Landnutzung	m ² Anbauäq. /kg	0,06
Eutrophierung	g P Äq. /kg	0,83
Versauerung	g SO ₂ Äq. /kg	9,94
Ökotoxizität	kg 1,4 DCB Äq. /kg	32,55

0,14	0,68	0,61	0,53
0,42	0,50	0,63	0,61
0,04	0,07	0,08	0,03
2,23	4,29	2,38	1,97
0,63	1,04	0,95	1,03
13,83	30,05	14,79	11,72
21,21	23,28	28,08	21,07

Anwendung



PLA ist thermoplastisch, hat eine erhöhte Festigkeit, einen hohen Elastizitätsmodul sowie weitere Eigenschaften:

- Ungiftigkeit, ausgezeichnete Klarheit und Lebensmittelechtheit → Verwendung für Lebensmittelverpackungen und Behälter
- Ungiftig und biokompatibel → Anwendungen in der Medizin, z. B. chirurgische Nähte, Implantate
- Modifiziertes PLA kann wiederholt geschmolzen und verfestigt werden → Anwendung in 3D-Druckverfahren

Polymilchsäure (PLA) – Bewertung

Entwicklungsstand

Polymilchsäure (PLA), mit einem TRL von 8-9, ist ein kommerziell verfügbares Biopolymer, das derzeit eine der höchsten Absatzmengen aller Biopolymere aufweist. Es wird hauptsächlich für Verpackungen, 3D-Druck, Textilien und in der Biomedizin verwendet. Nachteilig ist seine relativ geringe Hitzebeständigkeit, weshalb sich die Forschung und Entwicklung auf die Verbesserung der Hitzebeständigkeit und der mechanischen Festigkeit konzentriert. Bislang kann PLA nicht im Gemisch, sondern nur einzeln recycelt werden. Es ist in industriellen Kompostieranlagen abbaubar.

Technisch

Für den Prozess der biobasierten PLA-Herstellung werden verhältnismäßig wenige Verarbeitungsschritte benötigt und eine hohe Zuckerausbeute ($1,6 \frac{t_{\text{Zucker}}}{t_{\text{PLA}}}$) erzielt. Im Vergleich (1:1 Substitution) zu den hohen Primärenergieanforderungen für die Produktion des fossil-basierten PET ($40 \text{ GJ}/t_{\text{PET}}$), das durch PLA ersetzt werden kann, sind alle Wege der PLA-Produktion, unabhängig von der verwendeten Biomasse, im Hinblick auf den Energieverbrauch vorteilhafter. Auch im Vergleich zu den anderen Biopolymerherstellungen erfordert die Herstellung von PLA aus Biomasse generell wenig Wärme und Strom. Lediglich die Umwandlung von Hemizellulose führt zu einem insgesamt etwas höheren Primärenergieaufwand ($37 \text{ GJ}/t_{\text{PET}}$). Für die Milchsäurefermentation werden Hilfsstoffe – CaCO_3 und H_2SO_4 – benötigt, die jedoch laut Forschungsansätzen zukünftig durch alternative Materialien ersetzt werden könnten. Durch die Verwendung von Carbokalk als pH-Puffer entsteht nicht-biogenes CO_2 . Der Prozess zur Herstellung von PLA zeichnet sich außerdem durch eine gute Biomasse- und Kohlenstoffverwertung aus ($> 50 \%$). Bei der enzymatischen Verzuckerung der Zellulose zu Zucker geht verhältnismäßig am meisten Kohlenstoff und Biomasse in das Abwasser über und führt dadurch zu geringeren Konversionseffizienzen.

Ökonomisch

Die Wirtschaftlichkeit von PLA hängt stark von den Kosten der eingesetzten Rohstoffe (Zucker, Mais) und den weiteren Produktionskosten ab. PLA hat eine hohe Rohstoffausbeute, wodurch der Anteil der Rohstoffkosten im Vergleich zu anderen Biopolymeren geringer ist. Einen ebensolchen Einfluss auf die Produktionskosten haben jedoch hohe Kosten für Energie (Wärme) und Hilfsstoffe (CaCO_3 , Mikroorganismen, H_2SO_4). Die Erlöse durch die Nebenprodukte (v. a. CaSO_4) ist vergleichsweise gering. Insgesamt sind die Kosten im Vergleich zu Kunststoffen aus der Petrochemie nur geringfügig höher, dies zeigt sich auch in den hohen Marktanteilen bei biogenen Kunststoffen.

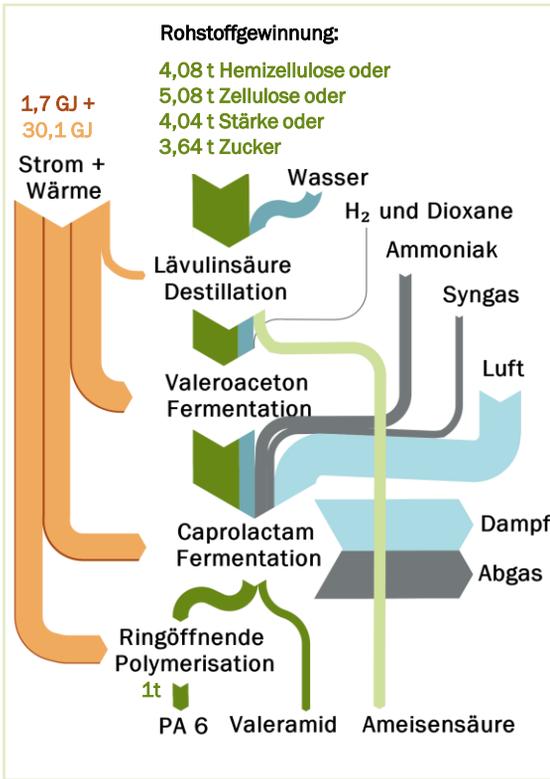
Ökologisch

Im Vergleich zum angenommenen fossilen Äquivalent PET (1:1 Substitution) können durch den Einsatz von PLA deutlich THG-Emissionen und fossile Ressourcen eingespart sowie das Ökotoxizitätspotenzial reduziert werden. Die höchsten Einsparungen sind beim Treibhauspotenzial mit 80 % (stärkebasiertes PLA) bis 96 % (zuckerrübenbasiertes PLA) zu erwarten. Die Einsparungen beim Verbrauch fossiler Ressourcen liegen bei 62 % bis 75 % und bei der Ökotoxizität bei 14 % bis 35 %. Der Wasserverbrauch liegt nur beim zuckerrübenbasierten PLA niedriger als beim fossilen Pendant. Die mit der Erzeugung von PLA verbundene Landnutzung sowie das Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial sind jedoch höher als bei petrochemisch erzeugtem PET. Hauptverursacher der THG-Emissionen sind die Energieversorgung in der PLA-Herstellung, die Rohstoffbereitstellung sowie der Einsatz von CaCO_3 , das sowohl bei der Erzeugung als auch beim Einsatz im Prozess (hier wird CO_2 frei) zum Treibhausgaspotenzial beiträgt.

Zusammenfassung

PLA hat derzeit unter den Biopolymeren einen der höchsten Marktumsätze und kann petrochemisch erzeugte Kunststoffe in Bereichen wie Verpackungen, Textilien, medizinischen Anwendungen und 3D-Druck ersetzen. Verbesserungsbedarf liegt in der Wärmeformbeständigkeit und der mechanischen Festigkeit. Seine Herstellung zeichnet sich durch sehr gute Biomasse- und Kohlenstoffverwertung und durch einen relativ niedrigen Energiebedarf aus. Die Kosten sind im Vergleich zu fossilen Kunststoffen nur geringfügig höher. Ersetzt PLA fossiles PET 1:1, kann mit hohen THG-Einsparungen, einem deutlich geringeren Verbrauch fossiler Ressourcen und einer Reduktion der Ökotoxizität gerechnet werden.

Polyamid 6 (PA 6) – Ergebnisse



Glucose oder Fructose wird durch saure Hydrolyse in Lävulinsäure umgewandelt. Lävulinsäure wird durch eine zweistufige katalytische Hydrierung zu Valerolacton und Ameisensäure als Nebenprodukt abgedampft. Mit Ammoniak und Syngas wird durch Fermentation Caprolactam erzeugt. Nebenprodukte wie Valeramid werden abgetrennt. Caprolactam wird durch Polymerisation zu PA 6 verarbeitet. Bio-PA 6 hat die gleichen Eigenschaften wie PA 6 aus fossilen Rohstoffen, ist recycelbar, aber nicht biologisch abbaubar.

Entwicklungsstand

Das TRL für die Produktion von PA 6 liegt derzeit zwischen 4 und 6. Genomatic und Aquafil haben erfolgreich die ersten Produktionsläufe im Demonstrationsmaßstab für Bio-PA 6 abgeschlossen. Sie haben eine Kooperation aufgebaut, um zukünftig ein kommerzielles Niveau von über 30.000 Tonnen nachhaltigem Nylon pro Jahr zu erreichen. Die aktuellen Produktionskapazitäten liegen zwischen einigen Tonnen und mehreren zehn Tonnen pro Jahr.

Biomasseinputmöglichkeiten

Zuckerhaltige Biomasse:	Stärkehaltige Biomasse:	Zellulosehaltige Biomasse:	Hemizellulosehaltige Biomasse:
Zuckerrüben 22,7 t _{TM} /t _{PA6}	Weizen 6,6 t _{TM} /t _{PA6}	Stroh 14,1 t _{TM} /t _{PA6}	Stroh 11,7 t _{TM} /t _{PA6}
Zuckerrohr 28,0 t _{TM} /t _{PA6}	Mais 5,8 t _{TM} /t _{PA6}	Altpapier 10,8 t _{TM} /t _{PA6}	Altholz + Holz 28,4 t _{TM} /t _{PA6}
	Kartoffel 22,4 t _{TM} /t _{PA6}	Altholz + Holz 13,8 t _{TM} /t _{PA6}	Grüngut + Laub 12,2 t _{TM} /t _{PA6}

Fossilbasiertes PA 6

Technisch

Kumulierter Primärenergieaufwand in GJ/t bezogen auf Hauptprodukt (links) und alle verwertbaren Produkte (rechts)	54,4
Kohlenstoffkonversion in % bezogen auf Hauptprodukt (links) und alle verwertbaren Produkte (rechts)	
Biomassennutzungseffizienz in % bezogen auf Hauptprodukt (links) und alle verwertbaren Produkte (rechts)	

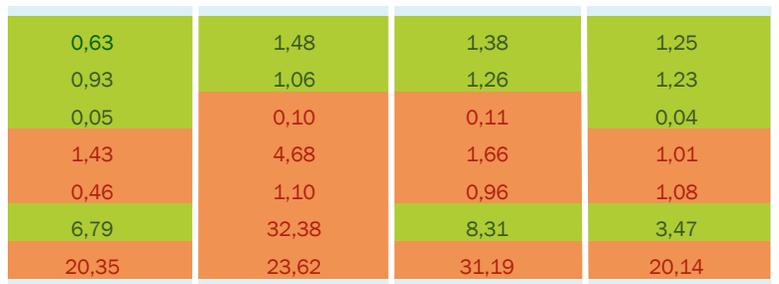
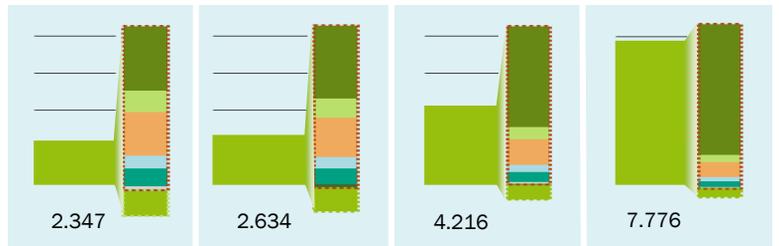
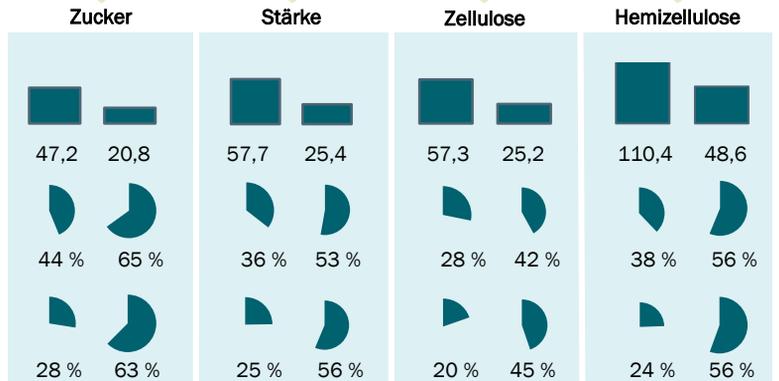
Ökonomisch

Spez. Produktionskosten (links) Kostenverteilung (rechts)

<ul style="list-style-type: none"> Rohstoff Energie Kapitalk. Nebenprod. Erlöse 	<ul style="list-style-type: none"> Hilfsstoffe Betriebsk. Sonst. Kosten Kosten Produktk. 	EUR/t
Pr.-menge: 200.000 t/a, TCI: 822 MEUR		2.970

Ökologisch

Treibhausgaspotenzial	kg CO ₂ Äq. /kg	9,28
Foss. Ressourcenverbrauch	kg Öl Äq. /kg	2,48
Wasserverbrauch	m ³ /kg	0,07
Landnutzung	m ² Anbauäq. /kg	0,0006
Eutrophierung	g P Äq. /kg	0,19
Versauerung	g SO ₂ Äq. /kg	23,70
Ökotoxizität	kg 1,4 DCB Äq. /kg	0,95



Anwendung



PA 6 weist eine hohe Zugfestigkeit und Haltbarkeit auf. Diese und weitere Eigenschaften führen zu folgenden Anwendungen:

- Es hat eine gute elektrische Isolierung und Wärmebeständigkeit. → Verwendung in Steckern, Kabelisolierungen und Gehäusen
- Es hat eine hohe Festigkeit, Elastizität und Widerstandsfähigkeit. → Verwendung in technischen Geweben, Teppichen und Textilien
- Es ist nicht toxisch, kann sterilisiert werden und hat eine hohe mechanische Festigkeit. → Anwendung in chirurgischen Instrumenten und Diagnosegeräten

Polyamid 6 (PA 6) – Bewertung

Entwicklungsstand

Die Herstellung von PA 6 befindet sich auf einem TRL zwischen 5 und 7. Die ersten Tonnen werden in Demonstrationsanlagen produziert. Aufgrund der guten Eigenschaften wie hohe Elastizität, thermische Stabilität, mechanische Festigkeit, Haltbarkeit, chemische Beständigkeit und elektrische Isolierung, die dieses Biopolymer bieten kann, sind weitere Produktionskapazitäten in Planung.

Technisch

Der Zuckerbedarf für die Produktion von PA 6 beträgt etwa $3,4 t_{\text{Zucker}}/t_{\text{PA 6}}$. Dies erfordert entsprechend hohe Mengen an zucker-, stärke-, hemizellulose- oder zellulosehaltiger Biomasse. Für die Produktion von Caprolactam werden verschiedene Hilfsstoffe benötigt, darunter auch Syngas. Aktuell stammt dieses jedoch nicht aus erneuerbaren Quellen, was die Nachhaltigkeit des Prozesses beeinträchtigt. Die Emissionen von Abgasen und die Entstehung von Abwasser verschlechtern die Kohlenstoff- und Konversionseffizienz des Prozesses. Trotz der genannten Herausforderungen entstehen im Produktionsprozess Nebenprodukte wie Valeramid und Ameisensäure. Diese tragen zur Verbesserung der Prozessbilanz bei, da sie vermarktet werden können.

Die Umwandlung von Rohstoffen in Caprolactam erfolgt über mehrere Verfahrensschritte, die im Vergleich zu anderen Polymerproduktionen einen hohen Wärmebedarf erfordern (ca. $21 \text{ GJ}_{\text{th}}/t_{\text{PA 6}}$). Die ringöffnende Polymerisation von Caprolactam benötigt ebenfalls viel Wärme (ca. $10 \text{ GJ}_{\text{th}}/t_{\text{PA 6}}$), wobei dieser Schritt auch bei der Herstellung des fossilen Referenzpolymers PA 6 einen erheblichen Energieaufwand erfordert. Deshalb schneidet insgesamt biobasiertes PA 6 aus energietechnischer Sicht nicht unbedingt schlechter ab. Zuckerbasiertes PA 6 hat sogar einen geringeren Primärenergiebedarf bezogen auf das Hauptprodukt als das fossile Pendant.

Ökonomisch

Der wichtigste wirtschaftliche Faktor bei der Produktion von PA 6 ist die Mitnutzung eines Teils der petrochemischen Route (Polymerisation). Nur so führt dies zu einem rentablen Prozess, sodass die Biopolymere zu Preisen verkauft werden können, die mit denen ihrer fossilen Gegenstücke vergleichbar sind. Vor allem die Bereitstellung von Zucker aus biogenen Rohstoffen (mind. 39 %) sowie die hohen Energiekosten (mind. 26 %) haben einen großen Einfluss. Die günstigeren Kosten für biobasiertes PA6 verglichen mit der fossilen Referenz liegen einerseits an dem Rückgriff auf das Jahr 2022, in welchem die Kosten für fossilbasiertes PA6 in Europa sehr hoch waren, andererseits an den in Europa, verglichen z. B. mit Asien, generell höheren petrochemischen Produktionskosten für PA 6.

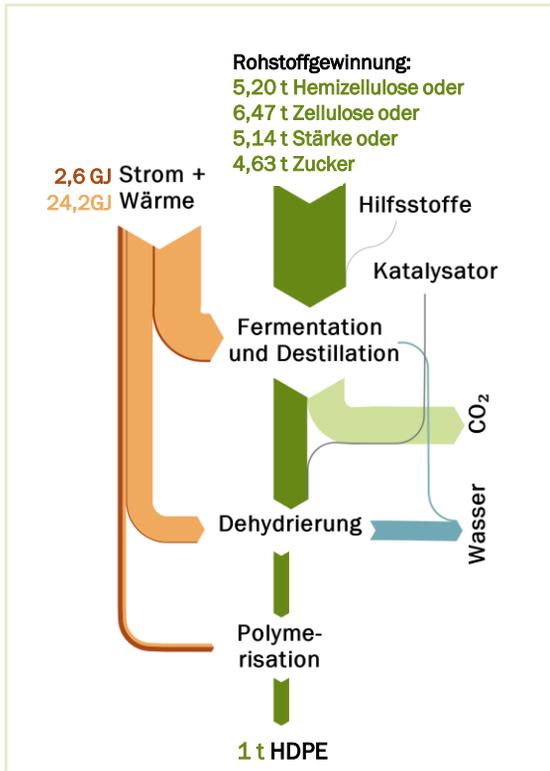
Ökologisch

Die Substitution von petrochemisch hergestelltem PA 6 durch biobasiertes PA 6 ist mit erheblichen Einsparungen bei den Treibhausgasemissionen (84 bis 93 % je nach Biomasse) und beim Verbrauch fossiler Ressourcen (49 bis 62 %) verbunden. PA 6 auf der Basis von Zuckerrüben, Hemizellulose und Zellulose hat zudem ein geringeres Versauerungspotenzial als sein fossiles Pendant. Die mit der Herstellung von biobasiertem PA 6 verbundene Landnutzung sowie das Ökotoxizitäts- und Eutrophierungspotenzial sind jedoch höher als bei fossilem PA 6. Hauptverursacher der THG-Emissionen sind die Prozesswärmeerzeugung bei der PA 6-Herstellung, die Rohstoffbereitstellung sowie der Einsatz von Ammoniak bei der Fermentation zu Caprolactam und von H_2 bei der Fermentation zu Valeroaceton.

Zusammenfassung

Die ersten Tonnen biobasiertes PA 6 werden in Demonstrationsanlagen produziert. Die kommerzielle Produktion ist in Planung. Für den biobasierten Pfad benötigen die Fermentation zu Caprolactam und die Polymerisation viel Wärme. Letztere wird analog auch für die Polymerisation von fossilem PA 6 benötigt. Wird die bestehende Polymerisationsroute von fossilem PA 6 von der biobasierten Route mitgenutzt, könnte biobasiertes PA 6 zu vergleichbaren Preisen wie das fossile Pendant verkauft werden. Eine Substitution von fossilem PA 6 durch biobasiertes PA 6 würde bei allen betrachteten Biomasserohstoffen zu einer deutlichen Einsparung von THG-Emissionen und fossilen Ressourcen führen.

Polyethylen hoher Dichte (HDPE) – Ergebnisse



Bio-HDPE wird durch Fermentation von Zucker zu Ethanol hergestellt, wobei fast genau so viel CO₂ entsteht wie Ethanol. Das Ethanol wird katalytisch zu Ethenylen dehydriert, wobei Wasser entsteht. HDPE wird industriell nach dem Ziegler-Natta-Verfahren produziert. Kennzeichnend sind bei diesem Verfahren der im Vergleich zur LDPE-Herstellung geringe Druck (1 bis 50 bar) und die niedrige Temperatur (20 °C bis 150 °C), wobei schwach verzweigte Polymerketten mit hoher Dichte entstehen. Als Katalysatoren werden zum Beispiel Titanhalogenide verwendet. Bio-HDPE besitzt dieselben Eigenschaften wie HDPE aus fossilen Rohstoffen. Es ist recycelbar, aber nicht biologisch abbaubar.

Entwicklungsstand

Die Produktion von Bio-HDPE weist ein TRL von 7 bis 9 auf. Seit 2010 ist der einzige Hersteller von 100 % biobasiertem PE die Braskem S.A., die ihr PE unter dem Markennamen „*Im green*™“ vertreibt. Die Produktionsmenge beträgt ca. 200.000 t/a. LyondellBasell kündigte die Produktion von biobasiertem HDPE an, das zu 30 % aus biobasiertem Material besteht. 2022 wurden davon rd. 67.500 t hergestellt, allerdings auf Basis von hydrierten Pflanzenölen (HVO).

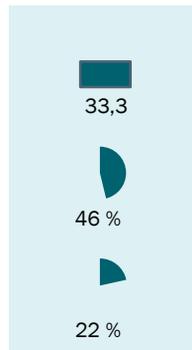
Biomasseinputmöglichkeiten

Zuckerhaltige Biomasse:	Stärkehaltige Biomasse:	Zellulosehaltige Biomasse:	Hemizellulosehaltige Biomasse:
Zuckerrüben 29,0 t _{TM} /t _{HDPE} Zuckerrohr 35,6 t _{TM} /t _{HDPE}	Weizen 8,4 t _{TM} /t _{HDPE} Mais 7,3 t _{TM} /t _{HDPE} Kartoffel 28,6 t _{TM} /t _{HDPE}	Stroh 18,0 t _{TM} /t _{HDPE} Altpapier 13,8 t _{TM} /t _{HDPE} Altholz + Holz 17,5 t _{TM} /t _{HDPE}	Stroh 14,9 t _{TM} /t _{HDPE} Altholz + Holz 36,2 t _{TM} /t _{HDPE} Grüngut + Laub 15,5 t _{TM} /t _{HDPE}

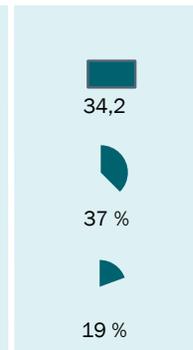
Fossil-basiertes HDPE

Technisch	Werte
Kumulierter Primärenergieaufwand in GJ/t bezogen auf Hauptprodukt	10,2
Kohlenstoffkonversion in % bezogen auf Hauptprodukt	
Biomassennutzungseffizienz in % bezogen auf Hauptprodukt	

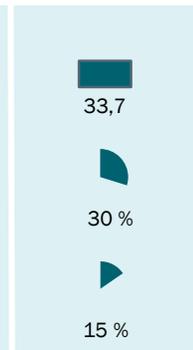
Zucker



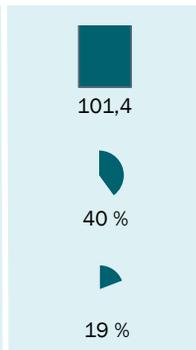
Stärke



Zellulose

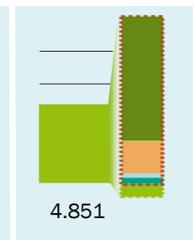
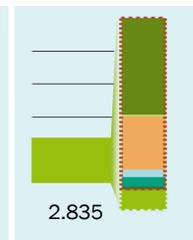
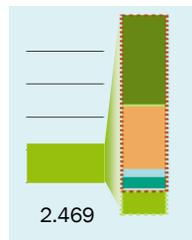


Hemizellulose



Ökonomisch

Spez. Produktionskosten (links)	Kostenverteilung (rechts)	EUR/t
Rohstoff	Hilfsstoffe	6000
Energie	Betriebsk.	4000
Kapitalk.	Sonst. Kosten	2000
Nebenprod. Erlöse	Kosten	0
Produktk.		0
Pr.-menge: 200.000 t/a, TCI: 560 MEUR		1.182



Ökologisch

Treibhausgaspotenzial	kg CO ₂ Äq. /kg	2,42
Foss. Ressourcenverbrauch	kg Öl Äq. / kg	1,68
Wasserverbrauch	m ³ /kg	0,01
Landnutzung	m ² Anbauäq. /kg	0,04
Eutrophierung	g P Äq. /kg	0,46
Versauerung	g SO ₂ Äq. /kg	4,96
Ökotoxizität	kg 1,4 DCB Äq. /kg	23,98

-0,66	1,29	1,04	0,76
0,62	0,91	1,38	1,31
0,06	0,16	0,20	0,02
3,16	10,56	3,69	2,21
0,75	2,22	1,90	2,16
13,32	71,64	16,80	5,76
27,62	35,08	52,32	27,13

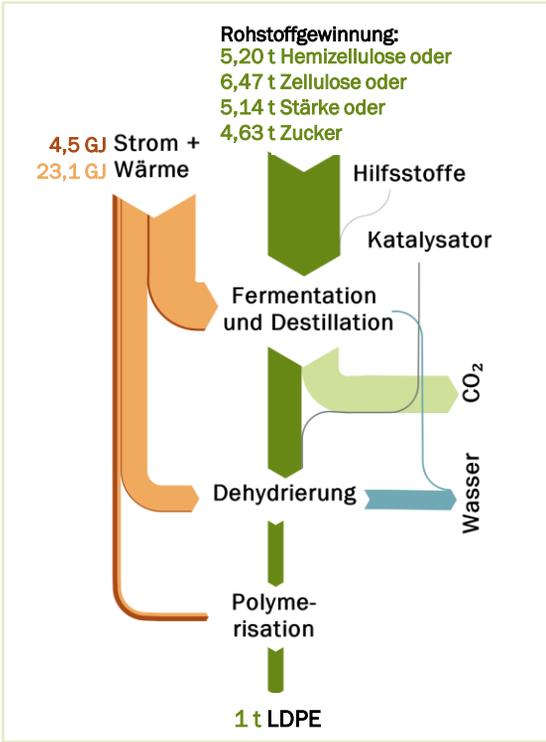
Anwendung



Die Eigenschaften von Bio-HDPE sind mit denen von herkömmlichem HDPE identisch:

- Bio-HDPE ist bekannt für seine hohe Festigkeit, Steifigkeit und chemische Beständigkeit.
- Es ist chemikalienbeständig, langlebig und hat eine hohe Feuchtigkeitsbarriere. → Anwendung als Verpackungsmaterial
- Es bietet Sicherheit und Haltbarkeit. → Verwendung in Spielzeugen, Spielplatzgeräten, Rohrleitungen, Gartenmöbeln usw.

Polyethylen niedriger Dichte (LDPE) – Ergebnisse



Die Herstellung von Bio-LDPE läuft bis zum Monomer Ethylen gleich dem HDPE-Prozess ab. Bei der Polymerisierung unterscheiden sich die Prozesse. LDPE wird bei Drücken von 100 bis 300 bar und Temperaturen von 100 °C bis 300 °C unter Einsatz von Radikalstartern aus dem Monomer Ethylen polymerisiert, wobei stark verzweigte Polymerketten mit geringer Dichte entstehen. Bio-LDPE besitzt dieselben Eigenschaften wie LDPE aus fossilen Rohstoffen. Es ist recycelbar, aber nicht biologisch abbaubar.

Entwicklungsstand

Die Produktion von Bio-LDPE weist ein TRL von 7 bis 9 auf. Seit 2010 ist der einzige Hersteller von 100 % biobasiertem PE die Braskem S.A., die ihr PE unter dem Markennamen „*Im green™*“ vertreibt. Die Borealis AG produzierte im Jahr 2022 rund 2.000 t biobasiertes LDPE, allerdings mit einem Verfahren, das auf hydrierten Pflanzenölen (HVO) basiert.

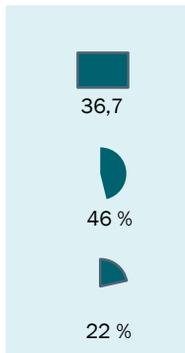
Biomasseinputmöglichkeiten

Zuckerhaltige Biomasse:	Stärkehaltige Biomasse:	Zellulosehaltige Biomasse:	Hemizellulosehaltige Biomasse:
Zuckerrüben 29,0 t _{TM} /t _{LDPE}	Weizen 8,4 t _{TM} /t _{LDPE} Mais 7,3 t _{TM} /t _{LDPE} Kartoffel 28,6 t _{TM} /t _{LDPE}	Stroh 18,0 t _{TM} /t _{LDPE} Altpapier 13,8 t _{TM} /t _{LDPE} Altholz + Holz 17,5 t _{TM} /t _{LDPE}	Stroh 14,9 t _{TM} /t _{LDPE} Altholz + Holz 36,2 t _{TM} /t _{LDPE} Grüngut + Laub 15,5 t _{TM} /t _{LDPE}

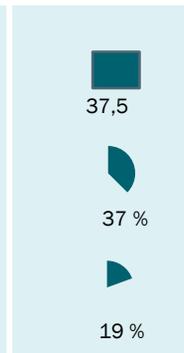
Fossil-basiertes LDPE

Technisch	Werte
Kumulierter Primärenergieaufwand in GJ/t bezogen auf Hauptprodukt	10,2
Kohlenstoffkonversion in % bezogen auf Hauptprodukt	
Biomassennutzungseffizienz in % bezogen auf Hauptprodukt	

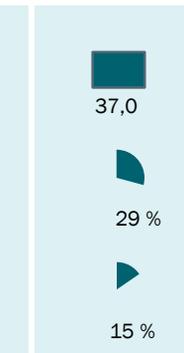
Zucker



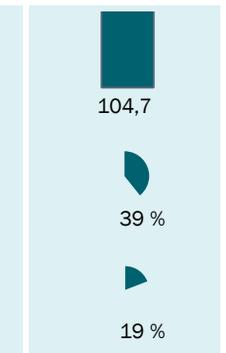
Stärke



Zellulose



Hemizellulose

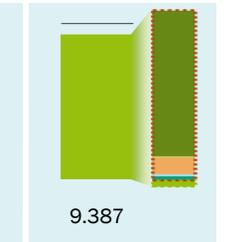
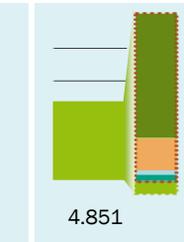


Ökonomisch

Spez. Produktionskosten (links)
 Kostenverteilung (rechts) EUR/t

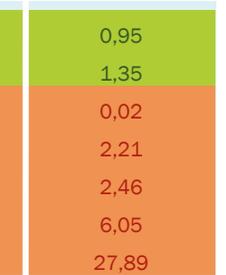
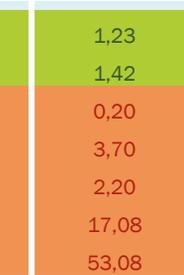
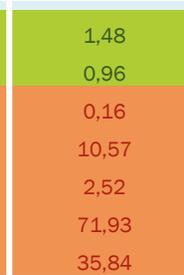
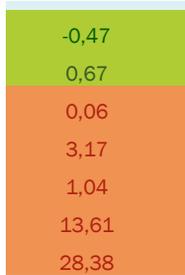
■ Rohstoff	■ Hilfsstoffe	6000
■ Energie	■ Betriebsk.	4000
■ Kapitalk.	■ Sonst. Kosten	2000
■ Nebenprod.	■ Kosten	0
■ Erlöse	■ Produktk.	

Pr.-menge: 200.000 t/a, TCI: 560 MEUR **1.182**



Ökologisch

Treibhausgaspotenzial	kg CO ₂ Äq. /kg	2,41
Foss. Ressourcenverbrauch	kg Öl Äq. /kg	1,66
Wasserverbrauch	m ³ /kg	0,02
Landnutzung	m ² Anbauäq. /kg	0,04
Eutrophierung	g P Äq. /kg	0,58
Versauerung	g SO ₂ Äq. /kg	5,22
Ökotoxizität	kg 1,4 DCB Äq. /kg	23,40



Anwendung



Die Eigenschaften von Bio-LDPE sind mit denen von herkömmlichem LDPE identisch:

- Es ist klar, flexibel und feuchtigkeitsfest. → Anwendung für Lebensmittelverpackungen und weitere flexible Verpackungen
- Bio-LDPE ist leichtgewichtig. → Verpackungs- und Automobilanwendungen
- Es ist hochflexibel und hat gute Dehnungseigenschaften. → Verwendung für Folien und Beutel

Polyethylen (HDPE und LDPE) – Bewertung

Entwicklungsstand

Der technologische Reifegrad von biobasiertem HDPE und LDPE wird im Allgemeinen mit 7 bis 9 angegeben und hängt von der Produktionsmethode und der jeweiligen Anwendung ab. Beide Polymere werden bereits kommerziell produziert. Da die biobasierten Polyethylene chemisch identisch zu den petrochemisch erzeugten Polyethylenen sind, können sie diese in identischen Anwendungen ersetzen.

Technisch

Die Fermentation von Zucker zu Ethanol ist ein energieintensiver Prozess (ca. $15 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{PE}}$), bei dem neben der Ethanolproduktion auch eine gleiche Menge an CO_2 entsteht. Der Fermenter benötigt dabei für eine lange Zeit eine relativ hohe Temperatur, was den Wärmebedarf bei allen ethanolbasierten Prozessen erheblich ausmacht. Ein weiterer energieintensiver Schritt ist die Dehydrierung von Ethanol zu Ethylen. Dabei wird zirka die Hälfte der Inputmasse in Form von Wasser und nicht umgewandeltem Ethanol aus dem Prozess entfernt, was die Biomassennutzungseffizienz der Umwandlung reduziert. Insgesamt ist die Konversion von Zucker zu Polyethylen (PE) relativ gering: Etwa 4,6 Tonnen Zucker sind nötig, um 1 Tonne PE zu produzieren, oder entsprechend 5,1 t Stärke oder 6,5 t Zellulose oder 5,2 t Hemizellulose. Das CO_2 , das während der Fermentation entsteht, ist jedoch sehr rein und eignet sich daher gut für die Aufbereitung und Nutzung, beispielsweise in der Getränkeindustrie für die Herstellung von Kohlensäure. Würden 20 % des während der Fermentation entstehenden CO_2 abgeschieden und genutzt, würde sich beim zuckerbasierten Pfad die Kohlenstoffkonversion um ca. 10 % und die Biomassekonversion um 9 % verbessern.

Der Unterschied in der Polymerisierung von Ethylen zu LDPE oder HDPE liegt vor allem in den spezifischen Prozessbedingungen und den unterschiedlichen Energiemengen, die genutzt werden. Bei der Herstellung von LDPE wird Ethylen in einem Hochdruckverfahren polymerisiert. Elektrische Kompressoren und Heizsysteme übernehmen diese Aufgabe, was den hohen Strombedarf bedingt. Im Gegensatz dazu wird HDPE über ein Niederdruckverfahren polymerisiert. LDPE ist energiesparender und schneller herstellbar. HDPE ist hingegen hochwertiger, stabiler und besitzt eine bessere Wärmebeständigkeit.

Ökonomisch

Die für dieses Produkt benötigten relativ großen Zuckermengen (mind. 50 % der Kosten) sowie die für die Verzuckerung benötigte Energie (bis zu 35 % der Kosten) führen zu einer starken Abhängigkeit der Produktionskosten von den Rohstoffkosten. Im Vergleich zur fossilen Referenz fallen die Kosten insbesondere dadurch mindestens doppelt so hoch aus. Eine Möglichkeit, Erlöse zu erzielen, würde ein Verkauf des entstehenden Kohlendioxids ebnen. Unter der Annahme von moderaten Erlösen von 150 €/t und der vollständigen Abscheidung des CO_2 ergäben sich damit Erlöse in Höhe von rund 15 % der Kosten beim Zuckerrohstoff oder 4 % der Kosten beim Rohstoff Hemizellulose.

Ökologisch

Biobasiertes HDPE und LDPE führen bei Substitution ihrer fossilen PE-Pendants zu Einsparungen von THG-Emissionen (je nach Biomasse zwischen 39 % und 127 %) und von fossilen Ressourcen. In den anderen Wirkungskategorien käme es zu höheren Belastungen. Dies liegt vor allem am hohen Rohstoffbedarf für den Herstellungsprozess und daran, dass alle Umweltwirkungen nur dem einen PE-Hauptprodukt zugeordnet werden. Die Hauptverursacher der THG-Emissionen sind somit die Rohstoffbereitstellung und zu einem geringeren Anteil die Energieversorgung. Die negativen THG-Werte von HDPE und LDPE aus Zuckerrüben bedeuten, dass mehr atmosphärisches CO_2 in Form von Kohlenstoff im PE-Polymer gebunden ist und damit gutgeschrieben wird, als im PE-Herstellungsprozess freigesetzt wird. Würden zusätzlich 20 % des während der Fermentation entstehenden CO_2 abgeschieden und genutzt, könnte es dem Herstellungsprozess zudem gutgeschrieben werden. Der höhere Energiebedarf für die CO_2 -Abtrennung führt zu zusätzlichen THG-Emissionen. Letztere sind deutlich geringer als die Höhe der Gutschrift, so dass der PE-Herstellungsprozess mit CO_2 -Abscheidung zu deutlich höheren THG-Einsparungen (je nach Biomasse zwischen 54 % und 143 %) führt.

Zusammenfassung

Biobasiertes Polyethylen (HDPE und LDPE) wird derzeit bereits kommerziell produziert und vermarktet. Es ist chemisch identisch zu petrochemisch erzeugtem PE und kann in den gleichen Anwendungen genutzt werden. Der Herstellungsprozess ist durch einen hohen Energie- und Biomassebedarf gekennzeichnet. Ohne die Abscheidung und Nutzung des bei der Fermentation entstehenden Kohlenstoffdioxids sind die Biomassennutzungseffizienz und die Kohlenstoffkonversion relativ gering. Die Gestehungskosten sind mindestens doppelt so hoch wie die der fossilen Pendants. Die THG-Einsparungen weisen je nach Biomasserohstoff eine große Spannweite zwischen 39 % und 127 % auf. Die Abscheidung und Nutzung des CO_2 -Nebenstroms würde die technischen, ökonomischen und THG-Kennwerte verbessern.

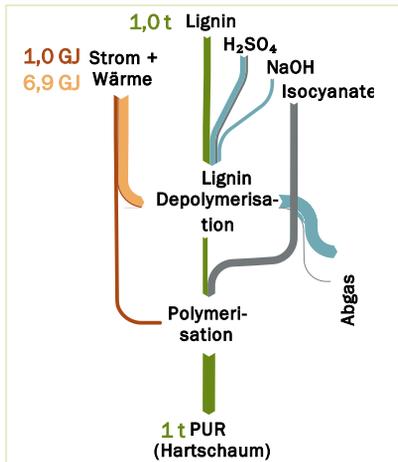
Polyurethane (PUR) – Ergebnisse

Bei der biobasierten PUR-Herstellung wird Lignin aus lignozellulosehaltiger Biomasse durch Depolymerisation in kleinere Oligomere zerlegt. Dafür wird das Lignin in einer basenkatalysierten Depolymerisation (BSD) in einer starken Base in seine Ether- und Esterbindungen gespalten.

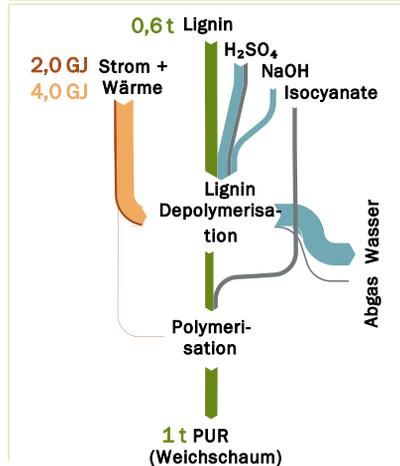
Die ligninbasierten Oligomere reagieren mit Polyisocyanaten zu Polyurethan. Hartschaum entsteht durch höhere Isocyanatanteile, was eine hohe Vernetzungsdichte und geschlossenzellige, starre Strukturen erzeugt, ideal für Dämmstoffe. Weichschaum nutzt weniger Isocyanate, wodurch offenporige, flexible Strukturen entstehen, die sich für Polstermaterialien eignen. Dieser Prozess erfordert längere Reaktionszeiten, jedoch moderate Drücke und Temperaturen, was den Energieaufwand senkt.

Bio-PUR hat ähnliche physikalische Eigenschaften wie PUR aus fossilen Rohstoffen. Recycling ist möglich, aber noch nicht weit verbreitet. Es ist nicht biologisch abbaubar.

Weichschaum

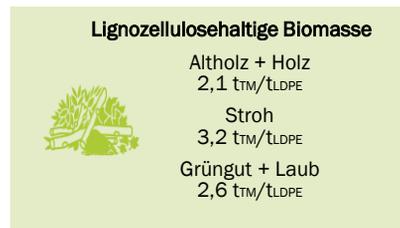


Hartschaum



Entwicklungsstand

Zahlreiche Unternehmen produzieren und vermarkten bereits biobasierte PURs. Der TRL-Wert von Bio-Polyurethan kann je nach Produktionsverfahren und Anwendung variieren. Man kann davon ausgehen, dass er im Bereich von 7 bis 9 liegt. BASF, Lubrizol und Mitsui Chemicals sind einige wichtige Hersteller dieses Biopolymers. Konkrete Produktionsmengen sind nicht veröffentlicht.



Technisch

Kumulierter Primärenergieaufwand in GJ/t bezogen auf Hauptprodukt

Kohlenstoffkonversion in % bezogen auf Hauptprodukt

Biomassenutzungseffizienz in % bezogen auf Hauptprodukt

Fossilbasiertes Weichschaum-PUR Ligninbasiertes Weichschaum-PUR Fossilbasiertes Hartschaum-PUR Ligninbasiertes Hartschaum-PUR

15

9,3

16,7

10,2

53 %

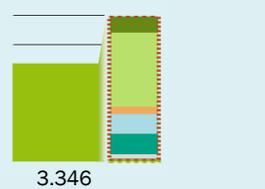
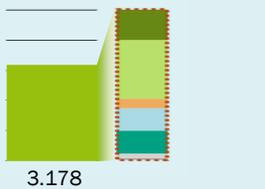
53 %

68 %

68 %

Ökonomisch

Spez. Produktionskosten (links) EUR/t
Kostenverteilung (rechts)



Ökologisch

Treibhausgaspotenzial	kg CO ₂ Äq. /kg	4,95	-0,08	4,61	1,02
foss. Ressourcenverbrauch	kg Öl Äq. /kg	2,05	1,13	2,15	1,73
Wasserverbrauch	m ³ /kg	0,04	0,03	0,06	0,04
Landnutzung	m ² Anbauäq. /kg	0,19	0,69	0,29	0,44
Eutrophierung	g P Äq. /kg	1,85	1,0	1,67	1,39
Versauerung	g SO ₂ Äq. /kg	15,29	12,04	18,37	15,94
Ökotoxizität	kg 1,4 DCB Äq. /kg	60,49	31,43	53,12	40,88

Anwendung

Bio-PUR wird in vielfältigen Anwendungen genutzt:

- PUR-Hartschaum bietet hervorragende Wärmedämmeigenschaften, Witterungsbeständigkeit und Haltbarkeit. → Verwendung in Dämmstoffen, Isolierungen und Klebstoffbeschichtungen
- PUR-Weichschaum bietet Flexibilität, Schlagfestigkeit und Haltbarkeit. → Anwendung für Polstermöbel, Matratzen, Sportschuhe, etc.
- PUR-Weichschaum kann das Aussehen und die Haptik von Leder imitieren und bietet gleichzeitig Vorteile wie verbesserte Atmungsaktivität, Wasserfestigkeit und Abriebfestigkeit. → Verwendung in Kunstleder und beschichteten Stoffen



Polyurethane (PUR) – Bewertung

Entwicklungsstand

Der technologische Reifegrad von ligninbasiertem Polyurethan kann im Bereich von 7 bis 9 angenommen werden. Zahlreiche Unternehmen produzieren und vermarkten bereits biobasierte PURs. Sie sind allerdings nicht chemisch identisch zu petrochemisch erzeugten PURs. Bisher gibt es noch kein kommerzielles Verfahren, um die in der Herstellung benötigten Isocyanate auf Basis erneuerbarer Rohstoffe zu erzeugen.

Technisch

Biobasierter PUR-Weich- und Hartschaum zeigt im Vergleich zu seinem fossilen Äquivalent einen geringeren Energiebedarf. Zwar erfordert die Depolymerisation des Lignins einen gewissen Energieaufwand, jedoch bleibt dieser im Vergleich zu fossilem PUR sowie den meisten anderen biobasierten Polymeren moderat.

Der Depolymerisationsschritt führt jedoch zu Verlusten an Biomasse (33 %). Diese Verluste schmälern die Effizienz des Prozesses, indem ein Teil der ursprünglichen Biomasse im Verlauf der Umwandlung verloren geht und über das Abwasser abgeführt wird.

Der Unterschied zwischen PUR-Hartschaum und PUR-Weichschaum im Energiebedarf und Materialeinsatz ist auch auf die unterschiedliche Menge an benötigten Oligomeren im Polymerisationsschritt zurückzuführen. Für PUR-Hartschaum sind höhere Mengen an Isocyanaten und Oligomeren erforderlich, um die gewünschte Dichte und Stabilität zu erzielen. Dieser Schaumtyp ist stromintensiver, da die Polymerisation eine präzisere Kontrolle der Struktur erfordert. Im PUR-Weichschaum hingegen wird weniger Isocyanat benötigt, dafür aber mehr Lignin als biobasierter Rohstoff. Weichschaum erfordert außerdem mehr Wärme, da diese maßgeblich zur Erreichung der Flexibilität beiträgt, die Weichschaum charakterisiert.

Ökonomisch

Die Kosten der Herstellung von biobasiertem PUR sind vergleichbar mit denen fossiler PURs. Innerhalb der biogenen Kunststoffe ist dies somit eine kostengünstige Option als Ersatz eines fossilen Polymers. Jedoch ist auf die enorme Kostenrelevanz der Isocyanate hinzuweisen, welche 28–36 % der Gesamtkosten ausmachen und einen wesentlichen Einfluss auf jegliche Art von PUR (auch die fossilbasierten) haben. Auch der Hilfsstoff NaOH macht mit 9–12 % einen Teil der Produktionskosten aus. Die Hilfsstoffkosten sind insgesamt bei diesem Polymer kostenbestimmend und übertreffen andere Kostenparameter, etwa die Kapitalkosten (14–15 %), um ein Vielfaches.

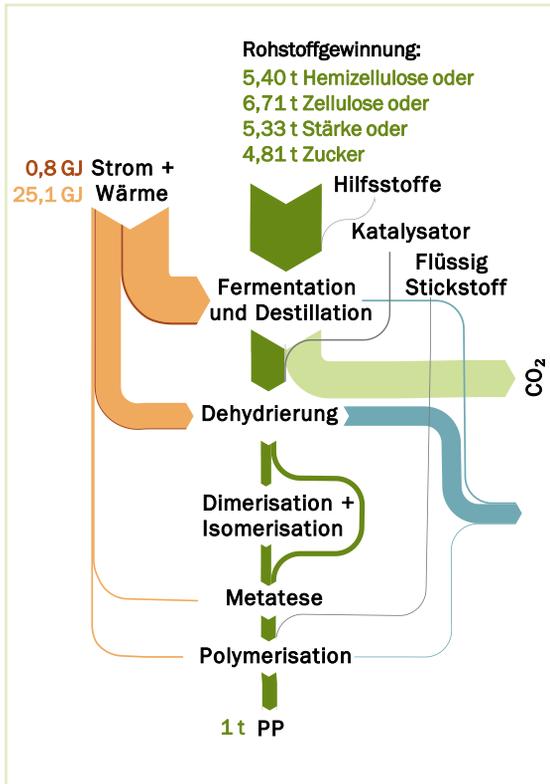
Ökologisch

Sowohl PUR-Weichschaum als auch PUR-Hartschaum schneiden im Vergleich zu ihren fossilen Pendanten in allen Umweltwirkungen mit Ausnahme der Landnutzung besser ab. Dabei verursacht PUR-Weichschaum im Vergleich zu PUR-Hartschaum geringere Belastungen in den betrachteten Umweltwirkungen. Die größten Einsparungen sind bei beiden PUR-Formen beim Treibhauspotenzial zu erwarten (102 % bei PUR-Weichschaum, 78 % bei PUR-Hartschaum). Der negative THG-Wert für PUR-Weichschaum bedeutet, dass mehr atmosphärisches CO₂ in Form von Kohlenstoff im ligninbasierten Polymer gebunden ist und damit gutgeschrieben wird, als im PUR-Herstellungprozess freigesetzt wird. Im gesamten Herstellungsprozess verursachen die eingesetzten Isocyanate die meisten THG-Emissionen, wobei im PUR-Hartschaum mehr Isocyanate eingesetzt werden als im PUR-Weichschaum. Bei der Herstellung von PUR-Weichschaum wird zwar mehr Wärme benötigt, diese verursacht jedoch nicht so viel THG-Emissionen wie der Mehrbedarf an Isocyanaten im PUR-Hartschaum. Zudem wirken Isocyanate toxisch. Da sie ebenso in den fossilen Pendanten eingesetzt werden, erscheint in den Umweltwirkungen kein Unterschied.

Zusammenfassung

Biobasierter PUR-Weich- und Hartschaum wird bereits kommerziell produziert und vermarktet. Im Vergleich zu den petrochemisch erzeugten PURs benötigt die Herstellung der biobasierten PURs deutlich weniger Energie, die Umweltbelastungen sind bis auf die Landnutzung geringer und die Kosten liegen auf einem ähnlichen Niveau. Die im Herstellungsprozess eingesetzten Isocyanate (sowohl im petrochemischen als auch im biobasierten Prozess) verursachen hohe Kosten, THG-Emissionen und eine hohe Ökotoxizität. Bisher gibt es jedoch noch kein kommerzielles Verfahren, um Isocyanate auf Basis erneuerbarer Rohstoffe zu erzeugen. Im Vergleich der bewerteten Kriterien schneidet PUR-Weichschaum besser ab als PUR-Hartschaum.

Polypropylen (PP) – Ergebnisse



Die Herstellung von biobasiertem PP ähnelt der Produktion von LDPE und HDPE. Diese Kunststoffe werden durch Weiterverarbeitung von Ethylen hergestellt, jedoch mit unterschiedlichen Prozessschritten und Katalysatoren. Zunächst wird Zucker aus Biomasse gewonnen und durch Fermentation in Ethanol und dann in einem katalytischen Dehydratisierungsprozess zu Ethylen umgewandelt. Ein Teil des Ethylens unterliegt einer Dimerisation und Isomerisation zu Buten, bevor es in einem Metathese-Verfahren mit dem restlichen Ethylen reagiert, um Propylen zu erzeugen. Die Polymerisation von Propylen zu PP erfolgt dann durch katalytische Polymerisation. Diese Katalysatoren ermöglichen eine kontrollierte Polymerisation bei Drücken von 30 bis 50 bar und Temperaturbedingungen von 70 bis 80 °C. Bio-PP besitzt dieselben Eigenschaften wie PP aus fossilen Rohstoffen. Es ist recycelbar, aber nicht biologisch abbaubar.

Entwicklungsstand

Das TRL für die Bio-PP liegt zwischen 7 und 9. Die erste kommerzielle biobasierte Produktion erfolgte in Wesseling durch LyondellBasell. 2022 wurden 67.500 t produziert. Im selben Jahr produzierte die Borealis AG in Belgien ebenfalls 67.500t. Beide Hersteller nutzen jedoch HVO-basierte Produktionsverfahren.

Biomasseinputmöglichkeiten

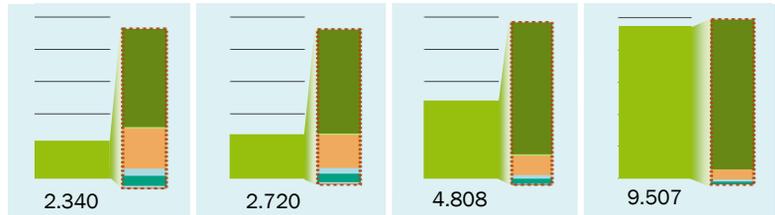
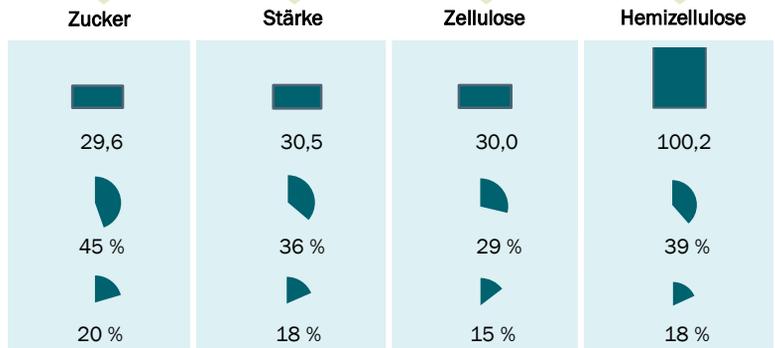
Zuckerhaltige Biomasse:	Stärkehaltige Biomasse:	Zellulosehaltige Biomasse:	Hemizellulosehaltige Biomasse:
Zuckerrübe 30,0 t _{TM} /t _{PP} Zuckerrohr 37,0 t _{TM} /t _{PP}	Weizen 8,7 t _{TM} /t _{PP} Mais 7,6 t _{TM} /t _{PP} Kartoffel 29,6 t _{TM} /t _{PP}	Stroh 18,7 t _{TM} /t _{PP} Altpapier 14,3 t _{TM} /t _{PP} Altholz + Holz 18,2 t _{TM} /t _{PP}	Stroh 15,4 t _{TM} /t _{PP} Altholz + Holz 37,5 t _{TM} /t _{PP} Grüngut + Laub 16,1 t _{TM} /t _{PP}

Fossilbasiertes PP

Technisch	
Kumulierter Primärenergieaufwand in GJ/t bezogen auf Hauptprodukt	7,3
Kohlenstoffkonversion in % bezogen auf Hauptprodukt	
Biomassennutzungseffizienz in % bezogen auf Hauptprodukt	

Ökonomisch	
Spez. Produktionskosten (links) EUR/t	1.164
Kostenverteilung (rechts)	
<ul style="list-style-type: none"> Rohstoff Energie Kapitalk. Nebenprod. Erlöse 	<ul style="list-style-type: none"> Hilfsstoffe Betriebsk. Sonst. Kosten Kosten Produktk.
Pr.-menge: 200.000 t/a, TCI: 409 MEUR	

Ökologisch		
Treibhausgaspotenzial	kg CO ₂ Äq. /kg	2,36
Foss. Ressourcenverbrauch	kg Öl Äq. /kg	1,68
Wasserverbrauch	m ³ /kg	0,01
Landnutzung	m ² Anbauäq. /kg	0,03
Eutrophierung	g P Äq. /kg	0,42
Versauerung	g SO ₂ Äq. /kg	4,77
Ökotoxizität	kg 1,4 DCB Äq. /kg	22,45



-0,91	1,12	0,84	0,60
0,56	0,86	1,33	1,28
0,07	0,16	0,20	0,02
3,27	10,95	3,79	2,29
0,43	1,96	1,62	1,91
12,59	73,07	16,14	4,78
27,12	34,86	52,41	26,84

Anwendung

Bio-PP hat vielfältige Eigenschaften und wird in vielfältigen Anwendungen genutzt:



- Es kann mit anderen Materialien wie Glasfasern gemischt werden. → Anwendungen für Spritzguss, Verpackungsfolien und technische Textilien
- Es ist ungiftig, durchsichtig und hat gute Barriereigenschaften gegen Feuchtigkeit und einige Gase. → Verwendung in der Verpackungsindustrie, z. B. bei Lebensmitteln und Getränken
- Es ist leicht, thermisch stabil und hat hervorragende mechanische Eigenschaften. → Anwendung in der Automobilindustrie, z. B. für Stoßstangen, Armaturenbretter usw.

Polypropylen (PP) – Bewertung

Entwicklungsstand

Das TRL für Bio-PP-Produktionstechnologien liegt im Allgemeinen rohstoff- und verfahrensabhängig zwischen 7 und 9. Es wird bereits kommerziell hergestellt und vermarktet.

Technisch

Die Fermentation von Zucker zu Ethanol und die anschließende Dehydrierung zu Ethylen erfordern viel Wärme ($23 \text{ GJ}_{\text{th}}/\text{t}_{\text{PP}}$). Diese energieintensiven Prozessschritte tragen wesentlich zum Gesamtenergiebedarf des Prozesses bei. Die nachfolgenden Schritte in der Umwandlung zu PP benötigen zwar innerhalb des Gesamtprozesses verhältnismäßig weniger Energie, führen jedoch durch ihren kombinierten Effekt und die jeweiligen Umwandlungsverluste auch zu Biomasse- und Kohlenstoffverlusten, was die Effizienz des Prozesses mindert. Aufgrund dieser Verluste werden 4,8 Tonnen Zucker benötigt, um eine Tonne PP zu produzieren. Dieser Bedarf an Zucker zieht entsprechend einen hohen Einsatz von zucker-, stärke-, hemizellulose- oder zellulosehaltiger Biomasse nach sich. Das CO_2 , das während der Ethanolfermentation freigesetzt wird, ist allerdings sehr rein und könnte vermarktet werden, beispielsweise in der Getränkeindustrie zur Herstellung von Kohlensäure. Dies bietet eine Möglichkeit, die Bilanz des Prozesses zu verbessern, indem das freigesetzte CO_2 sinnvoll weiterverwendet wird. Würden 20 % des während der Fermentation entstehenden CO_2 abgeschieden und genutzt, würde sich beispielsweise beim stärkebasierten Pfad die Kohlenstoffkonversion um ca. 9 % und die Biomassekonversion um 8 % verbessern.

Ökonomisch

Die ökonomische Bewertung zeigt, dass PP innerhalb eines Bioraffineriekonzepts unter Verwendung von Teilen der fossilen Route (Polymerisation) zu mindestens etwa 2-fachen Kosten, verglichen mit der fossilen Referenz, kommt. Großen Einfluss hat vor allem die Zuckerbereitstellung (62–91 %) aus den biogenen Rohstoffen sowie der, verglichen mit anderen Biopolymeren, sehr hohe Anteil an Energiekosten (6–25 %). Erlöse könnten über den Verkauf des entstehenden CO_2 erzielt werden. Unter der Annahme von moderaten Erlösen von 150 €/t und der vollständigen Abscheidung des CO_2 ergäben sich damit Erlöse in Höhe von rund 380 €/t_{PP}. Dies entspräche dann rund 16 % der Kosten beim Rohstoff Zucker oder 4 % der Kosten beim Rohstoff Hemizellulose.

Ökologisch

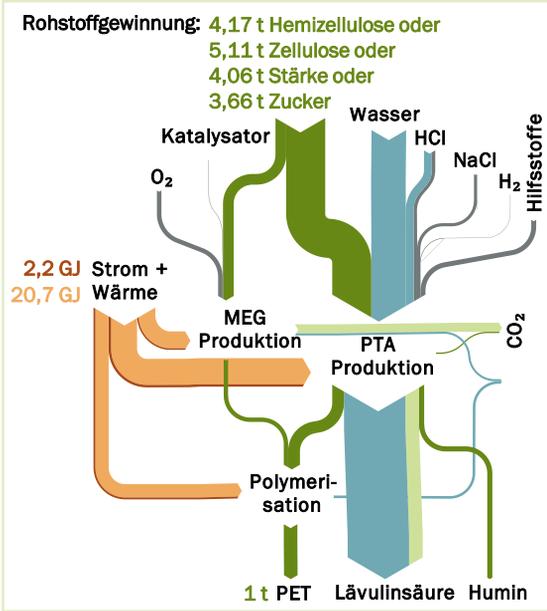
Biobasiertes PP führt bei Substitution des fossilen PP zu einer Einsparung von THG-Emissionen (je nach Biomasse zwischen 53 % und 139 %) und fossilen Ressourcen. In den anderen Wirkungskategorien käme es zu höheren Belastungen. Dies liegt zum einen an dem hohen Rohstoffbedarf im Herstellungsprozess und zum anderen daran, dass alle Umweltwirkungen nur dem einen PP-Hauptprodukt zugeordnet werden. Der Großteil der THG-Emissionen stammt daher aus der Rohstoffbereitstellung und zu einem geringeren Anteil aus der Energieversorgung. Der negative THG-Wert von PP aus Zuckerrüben bedeutet, dass mehr atmosphärisches CO_2 in Form von Kohlenstoff im PP-Polymer gebunden und damit gutgeschrieben wird, als im PE-Herstellungsprozess freigesetzt wird. Das Treibhauspotenzial könnte reduziert werden und läge zwischen 69 % und 155 %, wenn 20 % des bei der Fermentation freigesetzten Kohlenstoffs abgetrennt und genutzt würden. Die Abtrennung erhöht zwar den Energiebedarf, dies führt jedoch nur zu vergleichsweise geringen THG-Emissionen.

Zusammenfassung

Biobasiertes PP wird bereits kommerziell produziert und vermarktet. Der Herstellungsprozess ist durch einen relativ hohen Energie- und Biomassebedarf und folglich durch relativ hohe Kosten und Umweltbelastungen, verglichen mit fossilem PP, gekennzeichnet. Würden 20 % des CO_2 aus der Fermentation abgeschieden, würden sich entsprechend auch die Biomassennutzungseffizienz, die Kohlenstoffkonversion, die Erlöse und die THG-Einsparung erhöhen.

Polyethylenterephthalat (PET) – Ergebnisse

Biobasiertes PET wird aus biobasiertem Monoethylglykol (MEG) und biobasiertem Terephthalat (PTA) hergestellt. Die biobasierte Herstellung von PTA beginnt mit der Dehydratisierung von Zucker zu 5-Hydroxymethylfurfural (HMF), katalysiert durch Salzsäure. HMF wird dann hydriert und oxidiert, um Terephthalsäure zu produzieren. Natriumchlorid unterstützt die Extraktion und Reinigung von Zwischenprodukten. MEG wird biotechnologisch durch die Fermentation von Zucker zu Ethanol und anschließender Dehydrierung zu Ethylen gewonnen. Ethylen reagiert mit Sauerstoff zu Ethylenoxid, das dann mit Wasser zu MEG hydrolysiert wird. Bio-PET entsteht durch die Polymerisation von PTA und MEG. Zuerst reagieren sie in einer Esterifikationsreaktion bei 240–260 °C, wobei Wasser als Nebenprodukt entsteht. In der Polykondensation bei 270–290 °C werden die Monomere zu langen PET-Polymerketten verbunden. Bio-PET besitzt dieselben Eigenschaften wie PP aus fossilen Rohstoffen. Es ist recycelbar, jedoch nicht biologisch abbaubar.



Entwicklungsstand

Das TRL von Bio-PET liegt zwischen 7 und 9. Die Indorama Ventures Public Co. Ltd. sowie die Coca-Cola-Group in Zusammenarbeit mit Virent gehören zu den führenden Herstellern von Bio-PET. Die Gesamtproduktion im Jahr 2022 betrug ungefähr 93.000 Tonnen, wobei die MEG-Produktion 100 % biobasiert ist und PTA weiterhin mit fossilen Rohstoffen erzeugt wird.

Biomasseinputmöglichkeiten

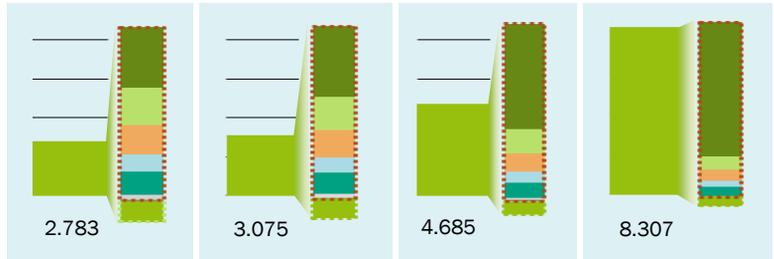
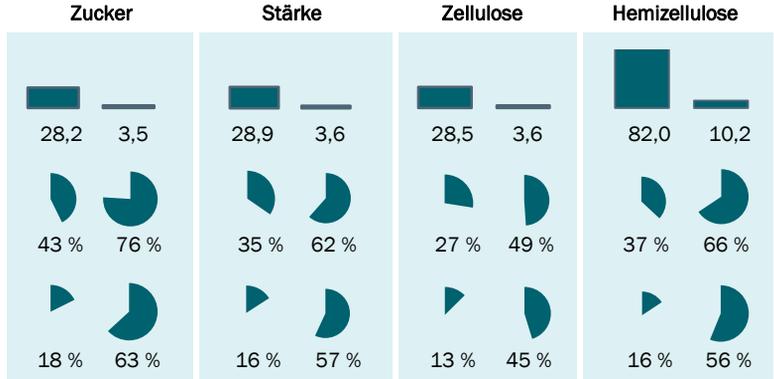
Zuckerhaltige Biomasse:	Stärkehaltige Biomasse:	Zellulosehaltige Biomasse:	Hemizellulosehaltige Biomasse:
Zuckerrüben 22,9 t _{TM} /t _{PET} Zuckerrohr 28,2 t _{TM} /t _{PET}	Weizen 6,7 t _{TM} /t _{PET} Mais 5,8 t _{TM} /t _{PET} Kartoffel 22,6 t _{TM} /t _{PET}	Stroh 14,2 t _{TM} /t _{PET} Altpapier 10,9 t _{TM} /t _{PET} Altholz + Holz 13,9 t _{TM} /t _{PET}	Stroh 11,8 t _{TM} /t _{PET} Altholz + Holz 28,6 t _{TM} /t _{PET} Grüngut + Laub 12,2 t _{TM} /t _{PET}

Fossilbasiertes PET

Technisch	Kumulierter Primärenergieaufwand in GJ/t bezogen auf Hauptprodukt (links) und alle verwertbaren Produkte (rechts)	
		39,5
	Kohlenstoffkonversion in % bezogen auf Hauptprodukt (links) und alle verwertbaren Produkte (rechts)	
Biomassennutzungseffizienz in % bezogen auf Hauptprodukt (links) und alle verwertbaren Produkte (rechts)		

Ökonomisch	Spez. Produktionskosten (links) / Kostenverteilung (rechts) EUR/t	
	<ul style="list-style-type: none"> Rohstoff Energie Kapitalk. Nebenprod. Erlöse 	<ul style="list-style-type: none"> Hilfsstoffe Betriebsk. Sonst. Kosten Kosten Produktk.
Pr.-menge: 100.000 t/a, TCI: 128 MEUR		
1.001		

Ökologisch	Treibhausgaspotenzial	
	kg CO ₂ Äq. / kg	3,48
	Foss. Ressourcenverbrauch	
	kg Öl Äq. / kg	1,68
	Wasserverbrauch	
	m ³ / kg	0,02
	Landnutzung	
m ² Anbauäq. /kg	0,06	
Eutrophierung		
g P Äq. / kg	0,83	
Versauerung		
g SO ₂ Äq. / kg	9,94	
Ökotoxizität		
kg 1,4 DCB Äq. / kg	32,55	



0,82	1,98	1,84	1,67
1,10	1,28	1,55	1,51
0,06	0,12	0,14	0,04
1,90	6,30	2,21	1,33
1,10	1,98	1,79	1,94
12,28	46,98	14,35	7,78
31,59	36,03	46,29	31,30

Anwendung

Die Eigenschaften von Bio-PET sind mit denen von herkömmlichem PET identisch:



- Es ist leicht, resistent gegenüber Fetten, Alkoholen und schwachen Säuren. → Anwendung in Verpackungs- und Automobilindustrie
- Bio-PET ist medizinisch zugelassen und enthält kein BPA, keine Phthalate oder andere Chemikalien, die potenziell schädlich für die menschliche Gesundheit und die Umwelt sind. → Verwendung in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie
- Bio-PET ist flexibel, transparent und langlebig. → Verwendung für Folien/Platten für verschiedene Anwendungen, z. B. zur Isolierung

Polyethylenterephthalat (PET) – Bewertung

Entwicklungsstand

Der technologische Reifegrad von biobasiertem PET wird allgemein mit 7 bis 9 angegeben. Bio-PET ist aber noch nicht in jedem Fall zu 100 % biobasiert. In der Regel erfolgt die MEG-Produktion zu 100 % biobasiert, aber die Produktion von biobasiertem PTA steckt noch in der Skalierungsphase und ist kommerziell noch nicht weit verbreitet.

Technisch

Die Herstellung von biobasiertem PET hat einen hohen Zuckerbedarf und zahlreiche Konversionsschritte, sowohl bei der Produktion von MEG (Monoethylenglykol) als auch in der PET-Konversion selbst. Beide Prozesse sind energieintensiv und benötigen sowohl Wärme als auch Strom. Dennoch wird im Vergleich zur PET-Produktion aus fossilen Rohstoffen weniger Energie benötigt – außer wenn Hemizellulose als Ausgangsstoff verwendet wird.

In der MEG-Herstellung kommen anorganische Hilfsstoffe wie Sauerstoff (O₂) zum Einsatz, während bei der Produktion von PTA (Terephthalsäure) Hilfsstoffe wie HCl, NaCl und weitere verwendet werden. Trotz der energieintensiven Prozesse ermöglicht die Verwertung von Nebenströmen, wie Lävulinsäure und Huminstoffen, sowie die potenzielle Verflüssigung von CO₂ eine relativ gute Biomassekonversion.

Da CO₂ aktuell kaum oder nur in geringem Maße verflüssigt wird, besteht jedoch noch Optimierungspotenzial, um die Kohlenstoffbilanz weiter zu verbessern.

Ökonomisch

PET wird durch die Vielzahl der benötigten Hilfsstoffe, hier vor allem NaCl und Ethylen (max. 21 % der Kosten), die vorgeschaltete Ethanol- und teilweise Zuckerproduktion (mind. 35 %) und den notwendigen Energieaufwand (max. 17 %) in den Kosten beeinflusst. Der Vergleich mit der fossilen Herstellung zeigt, dass PET innerhalb eines Bioraffineriekonzeptes unter Nutzung von Teilen der fossilen Route zu keinem wirtschaftlichen Prozess führen kann und die Biopolymere zu fast dreifach höheren Preisen als die fossilen Referenzen kalkuliert werden.

Ökologisch

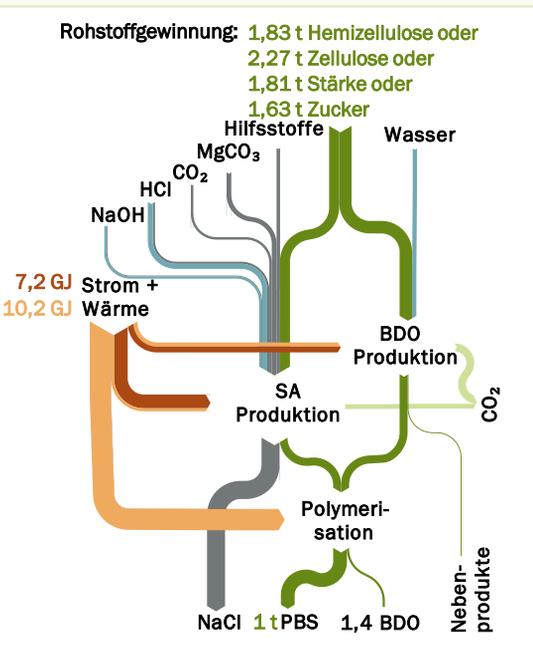
Die Substitution von fossilem PET durch biobasiertes PET ist mit deutlichen THG-Einsparungen (43 bis 76 % je nach Biomasse) und mit einem geringeren Verbrauch fossiler Ressourcen (8 bis 34 %) verbunden. PET auf der Basis von Zuckerrüben und Hemizellulose aus holzartiger Biomasse hat zudem ein geringeres Ökotoxizitätspotenzial als sein fossiles Pendant. Weiterhin besitzt hemizellulosebasiertes PET eine geringeres Versauerungspotenzial als fossiles PET. In den übrigen Umweltwirkungskategorien verursacht biobasiertes PET potenziell höhere Umweltbelastungen. Hauptverursacher der THG-Emissionen sind die Prozesswärmeversorgung in der PET-Herstellung, die Rohstoffbereitstellung sowie der Einsatz von HCl im Produktionsschritt von PTA zu HMF.

Zusammenfassung

PET wird kommerziell noch nicht zu 100 % biobasiert hergestellt. Die Monoethylenglykol (MEG)-Produktion erfolgt 100 % biobasiert, die biobasierte Terephthalsäure (PTA)-Produktion befindet sich in der Skalierungsphase. In kommerzieller Produktion erfolgt die PTA-Produktion noch auf Basis von fossilen Rohstoffen. Die Herstellung von teil-biobasiertem PET erfordert einen hohen Biomasse- und Energieeinsatz, viele Hilfsstoffe und zahlreiche Umwandlungsschritte, sowohl bei der Herstellung von MEG als auch bei der Produktion von PTA. Dennoch wird im Vergleich zur fossilen PET-Produktion weniger Energie benötigt – mit Ausnahme von Hemizellulose als Ausgangsstoff. Trotzdem ist die derzeitige Produktion von teil-biobasiertem PET nicht wirtschaftlich. Es müsste zu einem fast dreifach höheren Preis als das fossile Pendant verkauft werden. Die Substitution von fossilem PET durch biobasiertes PET ist mit deutlichen Treibhausgaseinsparungen (43 bis 76 % je nach Biomasse) und einem geringeren Verbrauch fossiler Ressourcen (8 bis 34 %) verbunden.

Polybutylensuccinat (PBS) – Ergebnisse

Biobasiertes PBS wird aus biobasierter Bernsteinsäure (SA) und biobasiertem 1,4-Butandiol (1,4-BDO) hergestellt. Die SA-Herstellung beginnt mit der Fermentation von Zucker durch Mikroorganismen unter anaeroben Bedingungen. Während der Fermentation wird Natronlauge (NaOH) zur pH-Regulierung eingesetzt, und Salzsäure (HCl) senkt den pH-Wert nach der Fermentation, um die Bernsteinsäure zu extrahieren. CO₂ und Natriumchlorid (NaCl) entstehen als Nebenprodukte, und Magnesiumcarbonat (MgCO₃) fördert das Mikrowachstum. 1,4-BDO wird auch durch Fermentation von Zucker hergestellt, wobei 2,3-BDO als Zwischenprodukt entsteht und per Hydrogenierung in 1,4-BDO umgewandelt wird.



NaOH und CO₂ werden ebenfalls freigesetzt. Nach der Fermentation wird das 1,4-BDO durch Destillation gereinigt. PBS entsteht per Polymerisation von SA und 1,4-BDO in einem Schmelzpolymerisationsreaktor bei 180–220 °C. Die Monomere bilden ein Prepolymer, das durch weitere Erwärmung zu hochmolekularem PBS-Polymer ausgereift wird. Bio-PBS ist biologisch abbaubar. Das Recycling ist noch nicht weit verbreitet, aber möglich.

Entwicklungsstand

Das TRL für die Herstellung von Bio-PBS liegt derzeit zwischen 7 und 9. Dieses Biopolymer wird hauptsächlich in Thailand von PTT MCC Biochem Co. Ltd., einem Gemeinschaftsunternehmen von PTT Global und Mitsubishi Chemical, hergestellt und verkauft. Im Jahr 2022 betrug die Gesamtproduktion dieses Biopolymers ungefähr 12.000 t.

Biomasseinputmöglichkeiten

Zuckerhaltige Biomasse:	Stärkehaltige Biomasse:	Zellulosehaltige Biomasse:	Hemizellulosehaltige Biomasse:
Zuckerrüben 10,2 t _{TM} /t _{PA} 6	Weizen 3,0 t _{TM} /t _{PA} 6	Stroh 6,3 t _{TM} /t _{PA} 6	Stroh 5,2 t _{TM} /t _{PA} 6
Zuckerrohr 12,5 t _{TM} /t _{PA} 6	Mais 2,6 t _{TM} /t _{PA} 6	Altpapier 4,8 t _{TM} /t _{PA} 6	Altholz + Holz 12,7 t _{TM} /t _{PA} 6
	Kartoffel 10,0 t _{TM} /t _{PA} 6	Altholz + Holz 6,2 t _{TM} /t _{PA} 6	Grüngut + Laub 5,4 t _{TM} /t _{PA} 6

Fossilbasiertes LDPE 1: 0,3 PBS

	Zucker	Stärke	Zellulose	Hemizellulose
Technisch				
Kumulierter Primärenergieaufwand in GJ/t bezogen auf Hauptprodukt (links) und alle verwertbaren Produkte (rechts)	29.0 / 24.3	29.3 / 24.6	29.1 / 24.4	52.9 / 44.4
Kohlenstoffkonversion in % bezogen auf Hauptprodukt (links) und alle verwertbaren Produkte (rechts)	48 % / 57 %	39 % / 46 %	31 % / 37 %	41 % / 49 %
Biomassennutzungseffizienz in % bezogen auf Hauptprodukt (links) und alle verwertbaren Produkte (rechts)	61 % / 73 %	55 % / 66 %	44 % / 52 %	55 % / 65 %
Ökonomisch				
Spez. Produktionskosten (links) EUR/t	3.202	3.331	4.039	5.632
Kostenverteilung (rechts)				
Pr.-menge: 10.000 t/a, TCI: 112 MEUR				
Ökologisch				
Treibhausgaspotenzial kg CO ₂ Äq. / kg	0,23	0,79	0,72	0,66
Foss. Ressourcenverbrauch kg Öl Äq. / kg	0,54	0,62	0,75	0,74
Wasserverbrauch m ³ / kg	0,03	0,06	0,07	0,02
Landnutzung m ² Anbauäq. /kg	0,97	3,08	1,11	0,75
Eutrophierung g P Äq. / kg	1,39	1,82	1,72	1,81
Versauerung g SO ₂ Äq. / kg	8,19	24,87	9,17	6,09
Ökotoxizität kg 1,4 DCB Äq. / kg	21,46	23,59	28,43	21,68

Anwendung



Bio-PBS zeigt thermische Stabilität, Verarbeitbarkeit und Flexibilität und kombiniert die Festigkeit und Haltbarkeit herkömmlicher Kunststoffe. Zudem weist es weitere Eigenschaften auf:

- Es erfüllt die strengsten Anforderungen an biobasierte Produkte. → Zulassung für den Kontakt mit Lebensmitteln
- Es hat gute Druckeigenschaften. → Druckanwendungen, einschließlich 3D-Druck und konventionelle Druckverfahren
- Klarheit und Glanz → Anwendungen, bei denen Transparenz erwünscht ist, z. B. Verpackungsfolien oder bestimmte Behälter

Polybutylensuccinat (PBS) – Bewertung

Entwicklungsstand

Das TRL für die Herstellung von Bio-PBS liegt derzeit zwischen 7 und 9 und es wird kommerziell produziert und vermarktet. Dieser Kunststoff hat ähnliche Eigenschaften wie die derzeit am häufigsten verwendeten Massenkunststoffe Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) und kann daher in erster Linie als Ersatz für die petrochemisch hergestellten Polymere PE oder PP verwendet werden, je nach den gewünschten Materialeigenschaften und in unterschiedlichen Substitutionsverhältnissen.

Technisch

Die Herstellung von biobasiertem PBS ist ein komplexer Prozess, der zahlreiche anorganische Hilfsstoffe und mehrere Prozessschritte erfordert, insbesondere bei der Produktion von Bernsteinsäure (Succinic Acid, SA) und 1,4-Butandiol (BDO). Die Konversionseffizienz variiert je nach Ausgangsstoff: Bei zuckerbasierten Verfahren liegt die Effizienz bei etwa 61 %, für stärkebasierte Verfahren bei 55 %, für zellulosebasierte Prozesse bei 44 % und für hemizellulosebasierte Verfahren bei 55 %.

Die Produktion von SA und BDO benötigt relativ viel Strom ($8,6 \text{ GJ}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{PBS}}$ und $3,6 \text{ GJ}_{\text{el}}/\text{t}_{\text{PBS}}$), insbesondere für energieintensive Filtrations- und Zentrifugationsschritte, die für die Reinigung und Aufbereitung notwendig sind. Bei den Fermentationsprozessen, besonders in der BDO-Produktion, entsteht CO_2 als Nebenprodukt. Dieses CO_2 könnte potenziell verflüssigt und weiter vermarktet werden, um die Kohlenstoffbilanz und die wirtschaftliche Rentabilität der Prozesse zu verbessern. Je nach Einsatzbereich und Substitutionsverhältnis (aktuell 0,3 BDO:1 LDPE) kann der Energiebedarf je nach Biomasseinput immer noch unter dem des fossilen Äquivalentes liegen.

Trotz des hohen Energiebedarfs in bestimmten Schritten, insbesondere bei der Verarbeitung von BDO, weist die PBS-Herstellung eine vergleichsweise gute Biomasseverwertung auf. Durch die Nutzung und Verwertung der Nebenströme wird die Effizienz der Prozesse weiter gesteigert.

Ökonomisch

Unter der Annahme einer Substitution von LDPE durch PBS im Verhältnis 1:0,3 fällt der Vergleich mit der fossilen Referenz relativ günstig aus. Bei den Kosten spielt weniger die Bereitstellung des Zuckers aus den biogenen Rohstoffen eine Rolle (mind. 13 %), sondern vielmehr die Vielzahl der notwendigen, teilweise sehr teuren Hilfsstoffe, v. a. MgCO_3 (gesamt max. 23 %), sowie der hohe Anteil an Energiekosten (max. 14 %). Eher untypisch für die untersuchten Biopolymere sind jedoch auch die Kapital- und Betriebskosten (max. 23 bzw. 20 %) ein wesentlicher Kostentreiber. Aufgrund der Vielzahl der Kosteneinflussgrößen ist eine deutliche Kostenreduktion schwierig zu erreichen. Wird jedoch LDPE mit dem günstigen Substitutionsverhältnis ersetzt, ist PBS ein aus Kostengesichtspunkten sehr interessantes Biopolymer.

Ökologisch

Im Fall der Substitution von 1 kg Folie (LDPE) und einem Verhältnis von 0,3 kg PBS zu 1 kg LDPE schneiden zuckerrüben- und holzbasiertes PBS in allen Umweltwirkungen mit Ausnahme der potenziellen Landnutzung besser ab. PBS auf Maisstärkebasis verursacht im Vergleich zu fossilem LDPE bei allen Umweltwirkungen mit Ausnahme der Landnutzung und des Versauerungspotenzials geringere Belastungen. Besonders hohe Einsparungen sind beim Treibhauspotenzial (90 bis 97 % je nach Biomasse) und beim Verbrauch fossiler Ressourcen (86 bis 90 %) zu erwarten. Bei der Substitution von Hartschalen aus fossilem PP ist jedoch bei gleichen Materialeigenschaften ein Substitutionsverhältnis von 1,7 kg PBS für 1 kg PP erforderlich. Diese Substitution würde nur beim Treibhauspotenzial und beim Verbrauch fossiler Ressourcen zu Einsparungen führen. In der gesamten Prozesskette verursachen die Energieversorgung im Herstellungsprozess, die Rohstoffbereitstellung und die eingesetzten Hilfsstoffe, vor allem NaOH und HCl, die höchsten THG-Emissionen.

Zusammenfassung

Bio-PBS wird kommerziell hergestellt und vermarktet. Meist wird fossiles PE oder PP ersetzt. Der Herstellungsprozess ist energieintensiv und benötigt viele Hilfsstoffe. Bei einem Substitutionsverhältnis von 0,3 kg PBS zu 1 kg LDPE liegt der Energiebedarf jedoch unter dem des fossilen Pendantes, die Kosten wären auf ähnlichem Niveau und die Umweltbelastungen sind mit Ausnahme der Landnutzung und teilweise des Versauerungspotenzials geringer als bei fossilem LDPE.

Fazit

Biomasse- verfügbarkeit

Die Bandbreite der Biomasseverfügbarkeiten ist in den Szenarien sehr hoch, auch aufgrund der hohen Unsicherheiten in den Daten zu zukünftigen Potenzialen. Nur im hohen Biomasseverfügbarkeits-Szenario können inländische Biomasse-mengen den künftigen Bedarf gemäß Verband der Chemischen Industrie (VCI) abdecken. In den Verfügbarkeits-szenarien niedrig und mittel wären höhere Importanteile als bereits angenommen nötig. Insgesamt sind sektorenübergreifende Optimierungs- und Mobilisierungsstrategien einzelner Rohstoffe sowie Prüfungen der Nachhaltigkeit importierter Biomassen notwendig. Die bereits hohen Nutzungsgrade vieler Stoffströme könnten Diskussionen über mögliche Umlenkungen bestehender Nutzungen erfordern.

technische Bewertung

Kumulierter Energieaufwand

Der Energiebedarf für die Polymerproduktion ist am geringsten, wenn zuckerhaltige Biomasse verwendet wird, gefolgt von stärke- und zellulosehaltiger Biomasse. Hemizellulosebasierte Polymerproduktionen sind am energieintensivsten. PLA weist den geringsten Energieaufwand unter den betrachteten Polymerproduktionen auf. Die Herstellung von biobasiertem PUR, PET und PA 6 zeigen einen niedrigeren Energiebedarf im Vergleich zum fossilen Referenzpolymer. Ein hoher Wärmebedarf besteht für die Ethanolproduktion und folglich für die biobasierte Polymerproduktion von HDPE, LDPE und PP.

Kohlenstoffkonversionseffizienz

Die höchste Kohlenstoffkonversionseffizienz zeigt sich bei Polymerproduktionen basierend auf zuckerhaltiger Biomasse. In den großen Abwassermengen des Aufschlusses lignozellulosehaltiger Biomasse, der enzymatischen Verzuckerung von Zellulose und der Depolymerisation von Lignin befinden sich oftmals noch Restanteile von Biomasse bzw. organischem Kohlenstoff, die bisher ungenutzt bleiben. Bei vielen Fermentationsprozessen, beispielsweise der Ethanolfermentation, entsteht unvermeidbar CO₂ als Nebenprodukt. Wenn das CO₂ nicht abgeschieden und genutzt wird, verschlechtert dies die Kohlenstoffkonversionseffizienz des Biomasseverwertungsprozesses. Bei Verwertung von Nebenprodukten wie Lävulinsäure & Huminen kann sich die Konversionseffizienz der Prozesse jedoch erheblich verbessern.

Biomassennutzungseffizienz

Umwandlungseffizienzen liegen bei den Konversionsverfahren meistens zwischen 60 und 90 %. Die nicht umgewandelte Biomasse geht folglich durch Abgase oder Abwasser verloren. Die höchsten Verluste ergeben sich bei zellulosebasierten Prozessen und Herstellung von PA 6 durch Freisetzung kohlenstoffhaltiger Abgase und Abwasserströme.

Vorteilhafte Polymere und Rohstoffe

PLA schneidet in allen technischen Kategorien am besten ab, da wenige Prozessschritte benötigt werden (bei jedem Prozessschritt treten Effizienzverluste auf). In der Zuckergewinnung hat die zuckerhaltige Biomasse die höchste Biomassennutzungseffizienz. Für holzartige Biomasse ist es vorteilhaft, wenn beide Bestandteile, Hemizellulose und Zellulose, zu Zucker umgewandelt werden.

Optimierungspotenzial

Großes Optimierungspotenzial besteht dort, wo biogenes CO₂ aus der Fermentation anfällt. Die Kohlenstoffkonversions- und Biomassennutzungseffizienz würden sich deutlich verbessern, wenn dieses CO₂ abgeschieden und beispielsweise für die Getränkeindustrie verwertet werden würde. Die Kohlenstoffeffizienz könnte zudem verbessert werden, wenn größere Mengen an Kohlenstoff aus Abwasser- und Abgasströmen mit vertretbarem Aufwand rückgewonnen werden.

ökonomische Bewertung

Polymervergleich: Bei der ökonomischen Bewertung der Biopolymere im Vergleich zu den fossilen Referenzprodukten ist Bio-PA 6 am günstigsten, gefolgt von den Biopolymeren PUR, PLA und PBS, die alle etwa auf dem Niveau der fossilen Referenz liegen. Biogenes PE und PP mit mindestens den doppelten Kosten und PET mit mindestens den dreifachen Kosten sind dagegen vergleichsweise teurer.

Rohstoffeinfluss: Die Rohstoffkosten haben bei einigen Biopolymeren einen sehr starken Einfluss auf die Gesamtkosten, insbesondere bei PE, PP und PA 6. Diese Polymere sind sehr stark vom Zuckerpreis abhängig und können voraussichtlich nur bei günstigen Markt- und Rahmenbedingungen produziert werden. Bei den anderen betrachteten Biopolymeren ist der Rohstoffeinfluss deutlich geringer und andere Kostenfaktoren deutlich relevanter.

Optimierungspotenziale: Pauschale Optimierungspotenziale können nicht abgeleitet werden, da insbesondere die Kostenzusammensetzungen über alle Biopolymere sehr unterschiedlich sind. Für die energieintensiven PLA, PUR, PBS und PA 6 ist eine integrierte Produktion etwa an einem bestehenden Produktionsstandort für fossile Polymere bzw. Industriestandort von Vorteil. Auch eine zunächst teilweise Umsetzung über Drop-in-Anteile kann einen kostengünstigen Hochlauf der Produktion ermöglichen. Die lokale Verfügbarkeit der Energien und Ressourcen sowie die Optimierung der Rohstoffaufbereitung bilden auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse ebenfalls Optimierungsansätze für die meisten Biopolymerpfade.

Fazit

ökologische Bewertung

Polymervergleich: Alle betrachteten Biopolymere verursachen deutlich geringere Treibhausgasemissionen und verbrauchen weniger fossile Ressourcen als deren fossile Pendanten. Für alle ist die potenzielle Landnutzung größer als bei den petrochemisch erzeugten Pendanten, da die Biomassebereitstellung i. d. R. mit einer höheren Flächeninanspruchnahme verbunden ist als die Gewinnung und Weiterverarbeitung fossiler Rohstoffe.

PUR-Weich- und Hartschaum schneiden im Vergleich zu ihren fossilen Pendanten am besten ab, da in jeder der betrachteten Umweltwirkungen Treibhausgaspotenzial, Verbrauch an Wasser und fossilen Ressourcen sowie beim Eutrophierungs-, Versauerungs- und Ökotoxizitätspotenzial geringere Belastungen verursacht werden. Die potenzielle Landnutzung ist größer.

PBS (im Fall der Substitution von LDPE-Folie) schneidet aufgrund des günstigen Substitutionsverhältnisses mit 0,3 kg PBS für 1 kg LDPE-Folie ebenfalls gut ab. PLA und PA 6 aus Zuckerrüben und Hemizellulose weisen in 3 bis 4 Umweltwirkungskategorien geringere Belastungen auf als die entsprechenden fossilen Polymere. Biobasierte PE-, PP- und PET-Polymere zeigen nur Einsparungen beim Treibhauspotenzial und beim Verbrauch an fossilen Ressourcen, unabhängig von den eingesetzten Biomassen.

Rohstoffeinfluss:

Grundsätzlich schneiden bei den zuckerbasierten Biopolymeren jene auf Basis von Hemizellulose und Zuckerrübe besser ab als jene auf Basis von Maisstärke und Zellulose. Vor allem die zusätzlichen Schritte der Stärke- und Zuckergewinnung aus Mais führt zu den höheren Umweltbelastungen verglichen mit der direkten Zuckernutzung. Auch der Aufschluss lignozellulosehaltiger Biomasse zu Hemizellulose und Zellulose und die weitere Verzuckerung bedeuten höhere Umweltwirkungen. Der größere Teil der Wirkungen des Holzaufschlusses wird gemäß dem Allokationsfaktor basierend auf C-Gehalt und Masse der Teilströme der Zellulose zugeteilt. Der Hemizellulose-Teilstrom trägt eine geringere Umweltlast.

Optimierungspotenzial:

Eine vollständige Umstellung der Energieversorgung von fossilen auf erneuerbare Rohstoffe würde weitere Einsparungen von THG-Emissionen und fossilen Ressourcen bedingen. Zudem sind weitere Umweltentlastungen durch den effizienten Einsatz von umweltfreundlicheren Hilfsstoffs- und Chemikalien-Alternativen möglich.

Allgemeine Aussagen: Ein genereller Vergleich zwischen den Biopolymeren ist nur schwer möglich, da der Polymereinsatz immer anwendungsspezifisch ist. Alle betrachteten Polymere können in ihren spezifischen Anwendungsgebieten die herkömmlich petrochemisch erzeugten Polymere ersetzen. Bei der Wahl des geeigneten Biopolymers ist zwischen den Polymereigenschaften und der technischen, ökonomischen und ökologischen Performance abzuwägen. Darüber hinaus ist das Erwägen anderer Defossilisierungsoptionen der Kunststoffindustrie, wie mechanisches und chemisches Recycling, Einsatz von CO₂-basierten Kunststoffen, etc. erforderlich.

Bewertung der Biopolymere: Die technische Bewertung zeigt PLA als vorteilhaftestes Biopolymer. PET schneidet unter der Voraussetzung, dass alle Nebenströme verwertet werden, ähnlich gut ab. Beim Vergleich der Gestehungskosten wird deutlich, dass sich PA 6, PUR und PLA etwa auf gleicher Höhe mit den Kosten der fossilen Pendanten befinden. Unter Berücksichtigung einiger Umweltwirkungen einer Ökobilanz zeigen sich PUR und PBS als die ökologisch vorteilhaftesten, verglichen mit deren fossilen Pendanten. PLA und PA 6 sind in einigen Umweltwirkungskategorien vorteilhafter als die entsprechenden fossilen Polymere. Das vorteilhafteste Biopolymer, das sowohl technisch, ökonomisch als auch ökologisch gut abschneidet, ist PLA.

Es schneiden diejenigen Biopolymere am besten ab, die direkt Zucker aus zuckerhaltiger Biomasse einsetzen. Der zusätzliche Aufwand zur Extraktion von Zucker aus anderer Biomasse (z. B. stärke- oder lignozellulosehaltige Biomasse) führt zu schlechteren technischen, ökonomischen und ökologischen Kenngrößen.

Optimierungspotenzial: Grundsätzlich liegt das größte Optimierungspotenzial in der effizienten Nutzung von Biomasse und Prozesswärme in der Biopolymerproduktion. Vor dem Hintergrund des Bioraffinerie-Ansatzes sollten alle anfallenden Neben- und Restströme genutzt und die anfallende Wärme in den Produktionsprozess rückgeführt werden. Bei den hier untersuchten Biopolymeren betrifft die verbesserungswürdige Biomassenutzung die Biopolymerpfade, bei denen CO₂ aus der Fermentation anfällt (v. a. ethanolbasierte Polymere wie LDPE, HDPE und PP), dieses aber bisher nicht für weitere Nutzungen abgeschieden wird. Dagegen werden bei der untersuchten PET- und der PA 6-Produktion die anfallenden Nebenströme Lävulinsäure und Humine sowie Valeramid und Ameisensäure bereits valorisiert. Beim Einsatz von Hilfsstoffen können zudem kostengünstigere und/oder umweltfreundlichere Alternativen getestet werden. Die Nutzung von vollständig erneuerbaren Energiequellen kann die THG-Emissionen und den Verbrauch fossiler Ressourcen weiter reduzieren.

Gesamt- bewertung

Literaturverzeichnis

- [1] Scholz, A., Schneider, C., Saurat, M., Theisen, S. "Das petrochemische System in Deutschland und Westeuropa. Regionale Analyse der Polymer-Produktion in Deutschland, den Niederlanden und Belgien. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt GreenFeed – Green Feedstock for a Sustainable Chemistry," Zugriff am: 22. November 2024. [Online.] Verfügbar unter: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8146/file/8146_GreenFeed.pdf.
- [2] P. Skoczinski et al., "Bio-based Building Blocks and Polymers – Global Capacities, Production and Trends 2022-2027," 2023, DOI: [10.52548/CMZD8323](https://doi.org/10.52548/CMZD8323).
- [3] BMUV, "Kurzpapier: Maßnahme zur Verringerung des Anteils von Biokraftstoffen aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen in Folge des Ukraine-Krieges," Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.klimareporter.de/images/dokumente/2023/01/230118-arbeitspapier-eckpunkte-agrokraftstoffe.pdf>.
- [4] Bundesregierung, Hg. Landwirtschaftlicher Flächenverbrauch durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz. Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/186/1918651.pdf>.
- [5] Europäische Kommission, "Sustainable Carbon Cycles," [Online]. Verfügbar unter: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2021-12/com_2021_800_en_0.pdf.
- [6] D. Peters, "ANBAU UND VERWENDUNG NACHWACHSENDER ROHSTOFFE IN DEUTSCHLAND," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22004416.pdf>.
- [7] Statistisches Bundesamt. "Flächenbelegung." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/landwirtschaft-wald/Tabellen/flaechenbelegung.html>.
- [8] WWF, "Klimaschutz, landwirtschaftliche Fläche und natürliche Lebensräume," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Landwirtschaft/kulinarische-kompass-klima.pdf>.
- [9] Europäisches Parlament. "Directive - 2018/2001 - on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)." Zugriff am: 28. November 2024.
- [10] Europäisches Parlament. "Directive - EU - 2023/2413 - EN - Renewable Energy Directive - EUR-Lex." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413&qid=1699364355105>.
- [11] U. Mantau, "Holzeinsatz im Bauwesen - Verwendungsstrukturen nach Gebäuden und Gewerken," [Online]. Verfügbar unter: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn052995.pdf.
- [12] K. Oehmichen, S. Bender, K. Gerber, H. Polley, S. Dunger und K. Dunger, Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung : Szenarienentwicklung, Ergebnisse und Analyse (Thünen-Report 59). Braunschweig: Johann-Heinrich-von-Thünen-Institut, 2018. Zugriff am: 28. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn059875.pdf.
- [13] F. Schier, "Holzmarktmodellierung - Szenarienbasierte Folgenabschätzung verschiedener Rohholzangebotssituationen für den Sektor Forst und Holz," [Online]. Verfügbar unter: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn059786.pdf.
- [14] Thünen-Institut. "Holzeinschlag und Rohholzverwendung." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/holzeinschlag-und-rohholzverwendung>.
- [15] UBA, "Projektionsbericht 2021 für Deutschland," [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/projektionsbericht_2021_uba_website.pdf.
- [16] Universität Hamburg. "Entwicklung von Holzverwendungsszenarien," [Online]. Verfügbar unter: https://www.weham-szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/Glasenapp_Doering_Blanke_Mantau_2017_Entwicklung_von_Holzverwendungsszenarien_WEHAM_Projekt_.pdf.
- [17] BMEL-Statistik. "Ölkuchen und -schrote." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung/versorgungsbilanzen/oelkuchen-und-schrote>.
- [18] A. Brosowski. "Arbeitsgruppe Biomassereststoff-Monitoring (AGBioRestMon) - Akronym: AGBioRestMon." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.fnr.de/projektfoerderung/projektdatenbank-der-fnr/projektverzeichnis-details/?fkz=22019215&mssto=en>.
- [19] A. Brosowski et al., "How to measure the impact of biogenic residues, wastes and by-products: Development of a national resource monitoring based on the example of Germany," Biomass and Bioenergy, Jg. 127, S. 105275, 2019, DOI:[10.1016/j.biombioe.2019.105275](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105275).
- [20] M. Haß et al., Thünen-Baseline (Thünen Report 82). Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 2020. Zugriff am: 28. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn062723.pdf.
- [21] Seeger et al., "Kritische Flächenfragen," [Online]. Verfügbar unter: https://www.ufz.de/export/data/global/272742_DP_2023_1_Seegeretal.pdf.
- [22] Statistisches Bundesamt. "Künftige Bevölkerungsentwicklung in Deutschland." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/_inhalt.html.
- [23] W. Bidlingmaier, "3_3_01-Formel-Heizwert-Brennwert," [Online]. Verfügbar unter: https://www.orbit-online.net/images/orbit-downloads/3_Formula/3_3_Verbrennung/de/3_3_01-Formel-Heizwert-Brennwert.pdf.
- [24] Forschungszentrum für Tierproduktion Dummerstorf-Rostock, DDR-Futterbewertungssystem: Kennzahlen des Futterwertes und Futterbedarfs für Fütterung und Futterplanung, 7. Aufl. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag, 1989.
- [25] R. Moriana, F. Vilaplana und M. Ek, "Forest residues as renewable resources for bio-based polymeric materials and bioenergy: chemical composition, structure and thermal properties," Cellulose, Jg. 22, Nr. 5, S. 3409–3423, 2015. DOI: [10.1007/s10570-015-0738-4](https://doi.org/10.1007/s10570-015-0738-4).
- [26] F. Schäfer, "Kombiverfahren zur Gülleaufbereitung-GülleKOM," in 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00086884.
- [27] Schäfer, F., Pröter, J., Himmelstoss, A., Rocktäschel, B., Pätz, R., Ellmann, R., "Verstärkte energetische Nutzung stickstoffreicher landwirtschaftlicher Abfallstoffe durch biologische Stickstoffreduzierung - Nred (Schlussbericht)," DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, 2023.
- [28] TNO. "Phyllis2 - Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar." Zugriff am: 28. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://phyllis.nl/>.
- [29] R. Geres, A. Kohn, S. C. Lenz, F. Ausfelder, A. Bazzanella und A. Möller, Roadmap Chemie 2050: Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland : eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 2019. Zugriff am: 28. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>.
- [30] Pablo Ruiz, Alessandra Sgobbi, Wouter Nijs, Christian Thiel, Francesco Dalla Longa, Tom Kober, Berien Elbersen, Geerten Hengeveld, "The JRC-EU-TIMES model: Bioenergy potentials for EU and neighbouring countries," 2015, DOI: [10.2790/39014](https://doi.org/10.2790/39014).
- [31] P. Ruiz et al., "ENSPRESO - an open, EU-28 wide, transparent and coherent database of wind, solar and biomass energy potentials," Energy Strategy Reviews, Jg. 26, S. 100379, 2019, DOI: [10.1016/j.esr.2019.100379](https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100379).

Literaturverzeichnis

- [32] Deloitte for Cefic, Hg., "iC2050 Project Report: Shining a light on the EU27 chemical sector's journey toward climate neutrality," Okt. 2021.
- [33] "PRODUCTION OF 100,000 METRIC TONNES PER YEAR OF ETHYLENE GLYCOL FROM METHYLENE OXIDE AND WATER," Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering - Universiti Malaysia Pahang, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.scribd.com/document/527030138/Ethylene-Glycol-Full-Report>.
- [34] NOVA institute for Ecology and Innovations, "The Biomass Utilisation Factor (BUF): nova-Paper #16 on renewable carbon 2022-06," 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://renewable-carbon.eu/publications/product/biomass-utilisation-factor-buf/>.
- [35] Verband Deutscher Ingenieure e.V., "VDI 3780 - Technikbewertung - Begriffe und Grundlage,".
- [36] Verband Deutscher Ingenieure e.V., "Kumulierter Energieaufwand (KEA) – VDI 4600," [Online]. Verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/3_Werkzeuge/a_Basis.Werkzeuge/i_Leitfaden_Ressourceneffizienz/Kumulierter_Energieaufwand_VDI_4600.pdf.
- [37] D. Thrän und D. Pfeiffer, Hg. Methodenhandbuch: Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagaseneffekte (Methoden zur Bestimmung von Technologiekenwerten, Gestehungskosten und Klimagaseneffekten von Vorhaben im Rahmen des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“), 4. Aufl. (Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms "Energetische Biomassenutzung" 4). Leipzig: DBFZ, 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/6_Publikationen/04_Methodenhandbuch_2013_final.pdf.
- [38] R. Turton, J. A. Shaeiwitz, D. Bhattacharyya und W. B. Whiting, Analysis, synthesis, and design of chemical processes (Prentice Hall international series in the physical and chemical engineering sciences). Boston: Prentice Hall, 2018.
- [39] VDI 6025: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen, 6025, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Nov. 2012.
- [40] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus und R. E. West, Plant design and economics for chemical engineers, 5. Aufl. (McGraw-Hill chemical engineering series). Boston: McGraw-Hill, 2004. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.loc.gov/catdir/description/mh031/2002032568.html>.
- [41] Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006, 14040:2006, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- [42] Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006, 14044:2006, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- [43] Biobasierte Produkte – Ökobilanzen; Deutsche Fassung EN 16760:2015, 16760, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Feb. 2016.
- [44] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). "Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report." Zugriff am: 22. November 2024. [Online] Verfügbar: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>.
- [45] M. A. J. Huijbregts et al., "ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level," Report I: Characterization: RIVM Report 2016-0104, 2016.
- [46] Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO 14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14067:2018, 14067, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- [47] ecoinvent Association, ecoinvent version 3.10.
- [48] "Phyllis2 - Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar." Zugriff am: 18. Juli 2024. [Online.] Verfügbar: <https://phyllis.nl/>.
- [49] M. Beyer, Das DDR-Futterbewertungssystem: Kennzahlen des Futterwertes und Futterbedarfs für Fütterung und Futterplanung mit einer Anleitung zu ihrem Gebrauch (Agra-Empfehlungen für die Praxis). Markkleeberg: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 1972.
- [50] R. Nitzsche et al., "Platform and fine chemicals from woody biomass: demonstration and assessment of a novel biorefinery," Biomass Conv. Bioref., Jg. 11, Nr. 6, S. 2369–2385, 2021. DOI: [10.1007/s13399-020-00769-z](https://doi.org/10.1007/s13399-020-00769-z).
- [51] A. Manandhar und A. Shah, "Techno-Economic Analysis of Bio-Based Lactic Acid Production Utilizing Corn Grain as Feedstock," Processes, Jg. 8, Nr. 2, S. 199, 2020. DOI: [10.3390/pr8020199](https://doi.org/10.3390/pr8020199).
- [52] J. Moncada, I. V. Gursel, E. Worrell und A. Ramírez, "Production of 1,3-butadiene and ε-caprolactam from C6 sugars: Techno-economic analysis," Biofuels Bioprod Bioref, Jg. 12, Nr. 4, S. 600–623, 2018. DOI: [10.1002/bbb.1876](https://doi.org/10.1002/bbb.1876).
- [53] NexantECA. "Counting the cost, disappearing caprolactam profit margins." Zugriff am: 12. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.nexanteca.com/blog/202105/counting-cost-disappearing-caprolactam-profit-margins>.
- [54] finanzen.net. "Zuckerpreis aktuell in Euro und Dollar | Zucker | Zuckerkurs | finanzen.net." Zugriff am: 21. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.finanzen.net/rohstoffe/zuckerpreis>.
- [55] M. NEELIS, M. PATEL, K. BLOK, W. HAIJE und P. BACH, "Approximation of theoretical energy-saving potentials for the petrochemical industry using energy balances for 68 key processes☆," Energy, Jg. 32, Nr. 7, S. 1104–1123, 2007, DOI: [10.1016/j.energy.2006.08.005](https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.08.005).
- [56] M. Braune, E. Grasmann, A. Gröngroft, M. Klemm, K. Oehmichen und K. Zech, Hg. Die Biokraftstoffproduktion in Deutschland - Stand der Technik und Optimierungsansätze, 1. Aufl. (DBFZ-Report Nr. 22). Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, 2016.
- [57] A. Manandhar und A. Shah, "Techno-Economic Analysis of Bio-Based Lactic Acid Production Utilizing Corn Grain as Feedstock," Processes, Jg. 8, Nr. 2, S. 199, 2020, DOI: [10.3390/pr8020199](https://doi.org/10.3390/pr8020199).
- [58] A. Manandhar und A. Shah, "Techno-Economic Analysis of the Production of Lactic Acid from Lignocellulosic Biomass," Fermentation, Jg. 9, Nr. 7, S. 641, 2023, DOI: [10.3390/fermentation9070641](https://doi.org/10.3390/fermentation9070641).
- [59] L. Shen, E. Worrell und M. K. Patel, "Comparing life cycle energy and GHG emissions of bio-based PET recycled PET PLA and man-made cellulose," Biofuels, Bioproducts and Biorefining, Jg. 6, Nr. 6, S. 625–639, 2012, DOI: [10.1002/bbb.1368](https://doi.org/10.1002/bbb.1368).
- [60] S. M. Ioannidou et al., "Techno-economic risk assessment, life cycle analysis and life cycle costing for poly(butylene succinate) and poly(lactic acid) production using renewable resources," The Science of the total environment, Early Access. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.150594](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150594).
- [61] G. Geraldo Silva, "Study on synthesis, surface derivatization, processing and techno-economic analysis of a PLA – Nanocellulose composite," [Online]. Verfügbar unter: <https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/185242>.
- [62] Nico Becker, Lisa Mundzeck und Andrea Siebert-Raths, "Biopolymers facts and statistics 2022," 2023, DOI: [10.13140/RG.2.2.24122.06081](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24122.06081).
- [63] T. Horváth, K. Marossy und T. J. Szabó, "Ring-opening polymerization and plasticization of poly(L-lactic)acid by adding of glycerol-dioleate," J Therm Anal Calorim, Jg. 147, Nr. 3, S. 2221–2227, 2022, DOI: [10.1007/s10973-020-10540-1](https://doi.org/10.1007/s10973-020-10540-1).
- [64] "Techno-Economic Analysis of Bio-Based Lactic Acid-Supplementary Info,"
- [65] PharmaCompass.com. "Stannous Octoate | Price | per kg | USD | PharmaCompass.com." Zugriff am: 12. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.pharmacompass.com/price/stannous-octoate>.

Literaturverzeichnis

- [66] Mike, "Polylactic acid (PLA) price index," Business Analytiq, 10 Apr., 2021. <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/polylactic-acid-pla-price-index/> (accessed: Nov. 12 2024).
- [67] "Techno-Economic Analysis of Bio-Based Lactic Acid-Supplementary Info,"
- [68] "Synthesis of Caprolactam from Lysine," WO2005123669A1, USA.
- [69] Mike, "PA6 (Nylon 6) price index," Business Analytiq, 27 Jul., 2020. <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/pa6-price-index/> (accessed: Jun. 19 2024).
- [70] S. R. Nicholson, N. A. Rorrer, A. C. Carpenter, and G. T. Beckham, "Manufacturing energy and greenhouse gas emissions associated with plastics consumption," *Joule*, vol. 5, no. 3, pp. 673–686, 2021, DOI: [10.1016/j.joule.2020.12.027](https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.12.027).
- [71] R. Nitzsche et al., "Platform and fine chemicals from woody biomass: demonstration and assessment of a novel biorefinery," *Biomass Conv. Bioref.*, vol. 11, no. 6, pp. 2369–2385, 2021, DOI: [10.1007/s13399-020-00769-z](https://doi.org/10.1007/s13399-020-00769-z).
- [72] Chemanalyst, US MDI Market Faces Setback as Prices Decline in May 2024. [Online]. Available: <https://www.chemanalyst.com/NewsAndDeals/NewsDetails/us-mdi-market-faces-setback-as-prices-decline-in-may-2024-28170> (accessed: Nov. 12 2024).
- [73] Chemanalyst, Polyurethane (PU) Resin Prices, News, Monitor & Demand. [Online]. Available: <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/polyurethane-pu-resin-1150> (accessed: Nov. 12 2024).
- [74] Statista, Polyethylene terephthalate prices globally 2022 | Statista. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1171088/price-polyethylene-terephthalate-forecast-globally/> (accessed: Jun. 19 2024).
- [75] Ethanol to Ethylene (B1) - processdesign. [Online]. Available: https://processdesign.mccormick.northwestern.edu/index.php/Ethanol_to_Ethylene_%28B1%29 (accessed: Jul. 18 2024).
- [76] K. Meisel et al., Technische und methodische Grundlagen der THG-Bilanzierung von Bioethanol: Handreichung. Leipzig, Dresden: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH; Sächsische Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek Dresden, 2015. [Online]. Available: <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-357054>.
- [77] R. Paschotta, Ethanol. [Online]. Available: <https://www.energie-lexikon.info/ethanol.html> (accessed: Jul. 18 2024).
- [78] J. Vlachopoulos, "AN ASSESSMENT OF ENERGY SAVINGS DERIVED FROM MECHANICAL RECYCLING OF POLYETHYLENE VERSUS NEW FEEDSTOCK," McMaster University, Hamilton, ON, Canada, Hamilton, ON, Canada, 2009. [Online]. Available: http://www.polydynamics.com/GREENHOUSE_GASES_INTERNET_VERSION_WORLD_BANK.pdf.
- [79] K. M. Zech, K. Meisel, A. Brosowski, L. V. Toft, and F. Müller-Langer, "Environmental and economic assessment of the Inbicon lignocellulosic ethanol technology," *Applied Energy*, vol. 171, pp. 347–356, 2016, DOI: [10.1016/j.apenergy.2016.03.057](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.057).
- [80] K. K. Kutemba, "Modelling and sustainability analysis of biorefineries using sugarcane lignocellulose to produce polyethylene, sorbitol, glucaric acid and levulinic acid at existing South African sugar mills," [Online]. Available: <https://scholar.sun.ac.za/server/api/core/bitstreams/b878de6a-30eb-400e-807c-6bca4078f344/content>.
- [81] Trading Economics, Polyethylene. [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/commodity/polyethylene> (accessed: Jun. 19 2024).
- [82] F. B. Guerra, R. M. Cavalcante, and A. F. Young, "Green Propylene and Polypropylene Production from Glycerol: Process Simulation and Economic Evaluation," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 11, no. 7, pp. 2752–2763, 2023, DOI: [10.1021/acssuschemeng.2c005371](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c005371).
- [83] P. G. Machado, A. Walter, and M. Cunha, "Bio-based propylene production in a sugarcane biorefinery: A techno-economic evaluation for Brazilian conditions," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 10, no. 5, pp. 623–633, 2016, DOI: [10.1002/bbb.1674](https://doi.org/10.1002/bbb.1674).
- [84] Ethanol to Ethylene (B1) - processdesign. [Online]. Available: https://processdesign.mccormick.northwestern.edu/index.php/Ethanol_to_Ethylene_%28B1%29 (accessed: Nov. 12 2024).
- [85] Trading Economics, Polypropylene. [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/commodity/polypropylene> (accessed: Jun. 19 2024).
- [86] B. Bruns, A. Di Pretoro, M. Grünwald und J. Riese, "Flexibility analysis for demand-side management in large-scale chemical processes: An ethylene oxide production case study," *Chemical Engineering Science*, Jg. 243, S. 116779, 2021. DOI: [10.1016/j.ces.2021.116779](https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116779).
- [87] P. T. Benavides, J. B. Dunn, J. Han, M. Bidy und J. Markham, "Exploring Comparative Energy and Environmental Benefits of Virgin, Recycled, and Bio-Derived PET Bottles," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, Jg. 6, Nr. 8, S. 9725–9733, 2018, DOI: [10.1021/acssuschemeng.8b00750](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00750).
- [88] C. García-Velásquez und Y. van der Meer, "Mind the Pulp: Environmental and economic assessment of a sugar beet pulp biorefinery for biobased chemical production," *Waste management (New York, N.Y.)*, Early Access. DOI: [10.1016/j.wasman.2022.10.038](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.038).
- [89] G. Theis, T. Adrian, B. Bessling, H. Hasse und F. Vansant, "METHOD FOR PRODUCING HIGHLY PURE MONOETHYLENE GLYCOL," US006605192B1, PCT/EP98/06968.
- [90] H. Firmansyah, Y. Tan und J. Yan, "Power and methanol production from biomass combined with solar and wind energy: analysis and comparison," *Energy Procedia*, Jg. 145, S. 576–581, 2018. DOI: [10.1016/j.egypro.2018.04.084](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.04.084).
- [91] ECHEMI. "Sodium hydroxide Price and Market Analysis - ECHEMI - ECHEMI.com." Zugriff am: 12. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.echemi.com/productsInformation/pd20150901041-caustic-soda-pearls.html>.
- [92] M. E. Haque, N. Tripathi, S. Palanki, Q. Xu und K. D. P. Nigam, "Plant-Wide Modeling and Economic Analysis of Monoethylene Glycol Production," *Processes*, Jg. 10, Nr. 9, S. 1755, 2022. DOI: [10.3390/pr10091755](https://doi.org/10.3390/pr10091755).
- [93] I. A. Escanciano, M. Wojtusik, J. Esteban, M. Ladero und V. E. Santos, "Modeling the Succinic Acid Bioprocess: A Review," *Fermentation*, Jg. 8, Nr. 8, S. 368, 2022. doi: [10.3390/fermentation8080368](https://doi.org/10.3390/fermentation8080368). [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2311-5637/8/8/368/pdf?version=1660547803>.
- [94] J. Ma et al., "Strategies for efficient repetitive production of succinate using metabolically engineered *Escherichia coli*," *Bioprocess Biosyst Eng*, Early Access. DOI: [10.1007/s00449-010-0484-9](https://doi.org/10.1007/s00449-010-0484-9).
- [95] Plastics Europe, <https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/life-cycle-thinking/eco-profiles-set/>.
- [96] Europäische Kommission, "Commission Staff Working Document - Impact Assessment: Accompanying the document: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and social Committee and the Committee of the regions," *Stepping up Europe's 2030 climate ambition - Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people*, Brüssel, Sep. 2020.

Herausgegeben von:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434-112
E-Mail: info@dbfz.de

Geschäftsführung:

Prof. Dr. mont. Michael Nelles (wiss.)
Dr. Christoph Krukenkamp (admin.)

Für den Inhalt des Fokusheftes ist der Herausgebende verantwortlich.

Bilder: Titelblatt: © Sergey Ryzhov -, © chibeleg-, © Robert Poorten - stock.adobe.co, freepik
ISBN: 978-3-949807-18-3
DOI: 10.48480/1s3d-k833

©Copyright: DBFZ 2024

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Fokusheftes darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebenden vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung bei Kopie und die Aufnahme in elektronische Datenbanken.