

## Ersatz von fossilen Rohstoffen – Materialien für eine nachhaltige Lebens- und Wirtschaftsweise

### TEILSERIE 2:

## Rohstoffbasis für Biopolymere

### Hintergrund

Biopolymere sind, strenggenommen, Polymere, die in der Natur natürlich vorkommen. Dazu gehören Proteine, die aus Aminosäuren aufgebaut werden, Nukleinsäuren wie DNA und RNA, die aus Nukleotiden aufgebaut sind, und auch Polysaccharide wie Zellulose und Stärke, die beide Polymere der Glucose darstellen, sowie Xanthan, Carrageen, Alginat, etc. Ein weiteres wichtiges Biopolymer stellt das im Holz enthaltene Lignin dar, welches eine der häufigsten organischen Verbindungen der Erde ist. Auch Polymere organischer Säuren kommen natürlicherweise in Zellen vor (z.B. Polyhydroxyalkanoate, kurz PHA).

Ein Biopolymer setzt sich in aller Regel aus mehreren Hundert (einfache Proteine) bis Millionen (Chromosomale DNA) Monomereinheiten zusammen, wobei Proteine aus 20 und DNA aus vier Grundmonomeren aufgebaut sind.

Die Rohstoffbasis für die Biosynthese in Zellen ist die Verwertung von organischen Stoffen (z.B. Glucose) oder anorganischen Stoffen (z.B. Kohlendioxid). Welche Rohstoffquelle nutzbar ist, hängt vom jeweiligen Organismus ab: Bakterien, die PHAs einlagern, nutzen bevorzugt organische Stoffe, wohingegen Pflanzen Kohlendioxid zum Aufbau von Cellulose oder Stärke (z.B. Kartoffel, Weizen) mittels Photosynthese nutzen.

Der Begriff Biopolymer wird im industriellen Kontext weitergehend verstanden: Die Polymerisation der einzelnen Monomere muss nicht in einer Zelle stattgefunden haben, sondern kann auch chemisch umgesetzt worden sein. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist Polylactid (PLA), das aus Lactid hergestellt wird. Lactid wird wiederum aus von Bakterien synthetisierter Milchsäure (Laktat) gewonnen. Zur Unterscheidung spricht man hier von „biobasierten“ Polymeren im Gegensatz zu den oben genannten „biogenen“ Polymeren.

Zur Herstellung des Grundmaterials von Biopolymeren im industriellen Kontext werden die Synthesefähigkeiten von biologischen Zellen genutzt, um entweder das entstehende Biopolymer direkt zu verarbeiten (z.B. PHA) oder um ein Monomer zu gewinnen, das mittels weiterer Schritte in das Ziel-Biopolymer überführt wird (z.B. PLA).

Unabhängig davon, ob ein biobasiertes oder biogenes Polymer aus tierischer oder pflanzlicher Biomasse gewonnen wird, kommt der umweltfreundlichen Produktion der Biopolymere, die als Ausgangsstoffe für zahlreiche biobasierte Anwendungen genutzt werden und Materialien auf Basis fossiler Rohstoffe ersetzen, im Sinne einer nachhaltig gestalteten Bioökonomie eine bedeutende Rolle zu.

## Problembeschreibung und Lösungsansätze

Wesentlich für den Wandel hin zu einer biobasierten Wirtschaft sind die regionale Rohstoffversorgung und Versorgungssicherheit. Die Versorgung deutscher und bayerischer Unternehmen mit Rohstoffen, Zwischenprodukten und Werkstoffen muss gegen Krisen, wie z.B. Lockdowns wegen Virus-Pandemien, Tankerunglücke und Engpässen bei Transportkapazitäten aus anderen Teilen der Welt gesichert werden.

In der Diskussion um den ökologischen Mehrwert von Biopolymeren (im Vergleich zu petrobasierten Alternativen) spielt die Herkunft der Rohstoffe eine grundlegende Rolle. Bei der Erzeugung von Biomasse fallen durch die Nutzung von Landmaschinen, Düngemitteln und Pestiziden große Mengen an Treibhausgasen an und es werden Flächen zum Anbau der Rohstoffe benötigt. In Bayern wurden 2018 rund 451.000 ha zum Anbau nachwachsender Rohstoffe verwendet, was einem Anteil von etwa 14 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche entspricht.<sup>1</sup> Auch Holz stellt einen wertvollen Rohstoff für lignozellulose-basierte Biopolymere dar, weshalb der nachhaltigen Forstwirtschaft eine ebenso wichtige Bedeutung zukommt.

In der chemischen Industrie sind rund 13 % der insgesamt verarbeiteten Ausgangsmaterialien nachwachsende Rohstoffe<sup>2</sup>. Obwohl das Marktvolumen von biobasierten Kunststoffen und auch der Flächenbedarf zum Anbau der benötigten Rohstoffe sehr gering sind, besteht die stetige Debatte um die Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion. Klar ist: Die Deckung des Lebensmittelbedarfs hat in jedem Fall Vorrang vor der stofflichen und nachfolgend energetischen Nutzung von Biomasse. Doch selbst langfristige Szenarien zeigen, dass bei einer beinahe vollständigen Substitution fossiler Kunststoffe durch solche auf Basis nachwachsender Rohstoffe nur insgesamt 4 – 7 % der global verfügbaren Landwirtschaftsfläche benötigt werden.<sup>3</sup> Daneben bieten auch die im Lebensmittelbereich anfallenden Abfall- und Reststoffe ein enormes Potential für die stoffliche Nutzung (~ 12 Mio. t Biomasse/a in Deutschland).<sup>4</sup>

Damit eine nachhaltige Bioökonomie umgesetzt werden kann, ist die umweltverträgliche Produktion der benötigten Biomasse entscheidend. Regionale Aspekte, wie negative Landnutzungseffekte (indirekte Landnutzungsänderung und Abholzung) oder lokale Aspekte, wie der zunehmende Maisanbau oder die übermäßige Nutzung von Agrarchemikalien, z.B. dem hohen Pestizideinsatz im Raps, wurden in der Vergangenheit stark kritisiert. Bestrebungen für eine Steigerung der Agrarproduktion bei gleichzeitiger Verringerung der Umweltbelastungen müssen weiter vorangetrieben werden.

Daneben kann auch Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) als Rohstoffquelle für neuen Kohlenstoff verwendet werden. Mit „Carbon Capture and Utilisation (CCU)“-Technologien kann CO<sub>2</sub> aus Rauchga-

sen oder direkt aus der Atmosphäre wieder nutzbar gemacht und der Kohlenstoffkreislauf geschlossen werden. Der Einsatz von CO<sub>2</sub> als Bestandteil von Materialien und Energieträgern trägt dabei zur Reduzierung des Bedarfs an fossilem und biobasiertem Kohlenstoff bei.

Ein großer Vorteil der Biopolymere ist, dass sie aus den verschiedensten organischen Materialien gewonnen werden können. Biomasse kann vielseitig genutzt werden und besonders Rest- und Nebenströme sind im Sinne der Kaskadennutzung und Ressourcenschonung geeignet, in einen stofflichen Verwertungspfad überführt zu werden, bevor sie aufgrund mangelnder Alternativen verbrannt oder vergärt werden. Welcher Reststrom bzw. Abfall für welchen Anwendungszweck genutzt werden kann oder tatsächlich genutzt wird, hängt einerseits von den technisch-technologischen Möglichkeiten ab und andererseits von der Wirtschaftlichkeit. Als Beispiel hierfür sei das verbleibende Zellmaterial der Rohr- und der Rübenzuckerindustrie angeführt. In der Rohrzuckerindustrie ist es üblich, die Bagasse (entzuckerter Zuckerrohrstängel) als Brennstoff im Kesselhaus zur Herstellung der benötigten Prozesswärme und zur Stromerzeugung zu nutzen, während in der Rübenzuckerindustrie üblicherweise verschiedene Futter-

*Biomasse kann vielseitig genutzt werden und besonders Rest- und Nebenströme sind im Sinne der Kaskadennutzung und Ressourcenschonung geeignet, in einen stofflichen Verwertungspfad überführt zu werden, bevor sie aufgrund mangelnder Alternativen verbrannt oder vergärt werden.*

mittel aus dem entzuckerten Zuckerrübenzellmaterial hergestellt werden. Fallen die Futtermittelpreise oder steigen die Energiepreise weiter, kann es auch für die Rübenzuckerindustrie wirtschaftlich sinnvoll werden, das Zellmaterial ebenfalls im Kesselhaus zu nutzen oder die Rübenfasern werden als Zellstoffersatz genutzt. Dem Futtermittelmarkt würden diese Nebenprodukte in diesen Fällen aber so entzogen werden. Weitere Beispiele für andere Neben- und sogar Abfallströme, bei denen Biopolymere zum Einsatz kommen, sind Gärreste aus Biogasanlagen, Rohglycerin aus der Biodieselherstellung, Holzhydrolysat, Bioabfälle, kommunaler Grünschnitt oder Stroh. Oftmals ist der Marktpreis für Rest- und Abfallstoffe sehr gering oder es fallen sogar Kosten für die Entsorgung an. Eine wertsteigernde

Nutzung kann daher durchaus wirtschaftlich interessant sein. Damit ein möglicher Transport auch unter nachhaltigen Aspekten noch sinnvoll ist, sollte der Reststrom hochkonzentriert sein oder die Verwertung am Standort der Entstehung sein.

Restströme oder gar Abfallströme werden in Bioraffinerien durch möglichst vollständige Verwertung der pflanzlichen Rohstoffe allerdings bestmöglich vermieden. Aus dieser Logik heraus ist der Anfall an geeignet einsetzbaren Rest- und Abfallströmen sehr begrenzt bzw. bedarf einer klaren Definition,

1 Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2020): Bayerischer Agrarbericht 2020, unter <https://www.agrarbericht.bayern.de/landwirtschaft-laendliche-entwicklung/nachwachsende-rohstoffe.html> [04.11.2021].

2 Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2020): Bayerischer Agrarbericht 2020, unter <https://www.agrarbericht.bayern.de/landwirtschaft-laendliche-entwicklung/stoffliche-nutzung.html> [04.11.2021].

3 Endres, H.-J. et al. (2011): Marktchancen, Flächenbedarf und zukünftige Entwicklungen, Kunststoffe, 09/2011, 105-110.

4 Schmidt, T., Schneider, F., Leverenz, D., Hafner, G. (2019): Lebensmittelabfälle in Deutschland – Baseline 2015, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Report 71

um werthaltige Nebenströme oder Nebenprodukte nicht mit Rest- oder Abfallströmen zu vertauschen.

Trotz der Erneuerbarkeit von Biomasse ist das Gesamtvolumen der pro Jahr erzeugten Biomasse begrenzt. Es werden daher bei einer effizienten Verarbeitung von Biomasse idealerweise alle Materialströme zur Herstellung von Lebensmitteln, Futtermitteln, Chemikalien, Materialien oder Energieträgern genutzt. Biomasse besteht aus verschiedenen Materialklassen, hauptsächlich aus Kohlenhydraten, Proteinen, Fetten und Lignin. Darüber hinaus besteht jede Klasse nicht aus einer einzigen molekularen Komponente, sondern aus einer Vielfalt (z.B. verschiedene Proteine, die aus verschiedenen Aminosäuren gebildet werden). Dies bedeutet, dass jede Produktionsstätte auf der Basis von Biomasse mit verschiedenen Molekularklassen und Komponenten zu tun hat und darüber hinaus nicht auf ein einzelnes Produkt ausgerichtet ist, sondern auf Produktvarianten, die z.B. von den verfügbaren Rohstoffen, Prozesstechnologien, Marktbedürfnissen usw. abhängen. In dieser Hinsicht kann eine Produktionsstätte auf der Basis von Biomasse mit einer petrochemischen (Verbund-)Raffinerie verglichen werden, in der Öl in verschiedene Fraktionen aufgeteilt wird, die zu verschiedenen chemischen Produkten weiterverarbeitet werden. Diese Analogie der integrierten Verarbeitung hat zu dem Begriff „Bioraffinerie“ geführt, wo Biomasse als Rohstoff zur Herstellung verschiedener Produkte verwendet wird. In der wissenschaftlichen Literatur, in Roadmaps oder Positionspapieren werden für Bioraffinerien unterschiedliche Definitionen beschrieben. Allen gemeinsam ist, dass sie ein integratives Konzept zur Nutzung von Biomasse aus verschiedenen Quellen zur Erzeugung einer Reihe von unterschiedlichen Produkten vorschlagen, wobei die umfassende Nutzung der eingesetzten nachwachsenden Rohstoffe maximiert wird.<sup>5</sup>

Bio- und petrochemische Raffinerien unterscheiden sich jedoch deutlich, z.B. hinsichtlich der Rohstoffe, der Materialverarbeitung und teilweise der Produkte. Mitunter sind Lebensmittel und Futtermittel sehr wichtige Produkte oder Nebenprodukte einer Bioraffinerie, während normalerweise keines dieser beiden Produkte an einem petrochemischen Produktionsstandort gewonnen werden kann. Ein weiterer wichtiger Unterschied besteht darin, dass Biomasse aus chemischer Sicht häufig überfunktionalisiert ist, während es fossilen Rohstoffen an Funktionalität mangelt. Konkret bedeutet dies, dass die biogenen Rohstoffe neben Kohlenstoff und Wasserstoff zusätzlich größere Mengen an Sauerstoff als Heteroatome enthalten. Um das gleiche Produkt herzustellen, geht daher bei Biomasse als Ausgangsmaterial durch die Entfernung der Heteroatome Masse verloren, während bei der Nutzung fossiler Rohstoffe durch die Einführung von Heteroatomen Masse gewonnen wird (z.B. kann aus 1 t Cellulose nur ca. 300 kg PE hergestellt werden, wohingegen dafür nur 300 kg petrochemisches Ethylen benötigt werden). Bei der Betrachtung desselben Produkts führt dies zu einem klaren wirtschaftlichen Vorteil für die Verarbeitung fossiler Rohstoffe, solange Nachhaltigkeitsaspekte, wie beispielsweise Klimafolgekosten durch die Emission von CO<sub>2</sub>, nicht berücksichtigt werden.

## Handlungsempfehlungen

### 1. Förderung der nachhaltigen Biomasseproduktion

Zur nachhaltigen und effizienten Bereitstellung von Rohstoffen für die Herstellung von Biopolymeren gilt es einerseits, Kohlenstoff, so gut es geht, im Nutzungskreislauf zu halten und damit den Bedarf an neuem Kohlenstoff – ob aus fossilen oder biobasierten Quellen – zu verringern.

Die Forschung an Technologien und Prozessen zur Nutzung von CO<sub>2</sub> sollte dazu weiter vorangetrieben werden.

Der steigende Bedarf an Rohstoffen fordert eine nachhaltige Intensivierung der Land- und Forstwirtschaft. Die Stilllegung von Waldflächen sollte dabei nur begrenzt erfolgen. Rohstoffherzeuger müssen explizit unterstützt werden, z.B. im Rahmen von Förderprogrammen zur nachhaltigen Bewirtschaftung land- und forstwirtschaftlicher Flächen und zur stofflichen Nutzung von Biomasse. In der Vergangenheit zeigte sich beispielsweise, dass durch die „Vermaisung“ der Agrar-

*Zur nachhaltigen und effizienten Bereitstellung von Rohstoffen für die Herstellung von Biopolymeren gilt es einerseits, Kohlenstoff, so gut es geht, im Nutzungskreislauf zu halten und damit den Bedarf an neuem Kohlenstoff – ob aus fossilen oder biobasierten Quellen – zu verringern.*

landschaft zur Biogas-Substratgewinnung die Erzeugung biobasierter Energie auch negative Auswirkungen auf die Umwelt haben kann. Im Gegensatz dazu wird Biomasse im Sinne der nachhaltigen Bioökonomie vielseitig und effizient genutzt. Alternative Kulturen, die insbesondere die Biodiversität fördern, und einjährige lignozellulose-haltige Pflanzen sollten für eine bunte Bioökonomielandschaft in Bayern vermehrt angebaut werden. Ebenso wichtig

ist es, den Rohstoffherzeugern ihre grundlegende Rolle bei der Transformation zu einer nachhaltigen Bioökonomie durch die Produktion regionaler, klimafreundlicher und umweltverträglicher Rohstoffe näherzubringen. Mit der Entwicklung von Verfahren, die gemischte Stoffströme hin zu wenigen Produkten ermöglichen, kann auch aus großer Biodiversität stammende Biomasse sinnvoll umgewandelt werden.

### 2. Etablierung von Zertifizierungen für nachhaltige Biomasse

Einheitliche Zertifizierungen, wie z.B. FSC, PEFC oder ISCC+-Zertifikate,<sup>6</sup> liefern eindeutige Hinweise zur Umweltverträglichkeit der Waldbewirtschaftung und den Produktionsbedingungen und sollten vermehrt eingeführt werden. Die Kennzeichnung nachhaltig produzierter Biomasse sowie daran anschließender Verarbeitungsprozesse bis hin zu Entsorgungsoptionen erleichtert allen Akteuren entlang des Produktlebenszyklus eine Einstufung zum ökologischen Mehrwert eines biobasierten Produkts. Strengere Kriterien zu Herkunft, Anbau und Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe tragen zur Einsparung von Düngemitteln und Pestiziden bei, können Auskunfts zum Wasserverbrauch, der Bodenbewirtschaftung oder

<sup>5</sup> Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2014): Roadmap Bioraffinerien. S. 5.

<sup>6</sup> Weitere Informationen unter: <https://www.fsc-deutschland.de/de-de>, <https://pefc.de/>, <https://www.iscc-system.org/>

dem Ausstoß (fossiler) CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Anbau und der Produktion geben. So kann bereits vor dem eigentlichen Produktionsprozess in der Bioraffinerie der Einsatz nachhaltig hergestellter Biomasse sichergestellt werden. Dadurch wird die Intention, dass die Herstellung der Biopolymere tatsächlich nachhaltiger ist als bei petrobasierten Pendanten weiter vorangetrieben und auch für Endverbraucher\*innen werden bisher schwer nachvollziehbare Produktionsketten transparenter, wodurch die öffentliche Wahrnehmung nachwachsender Rohstoffe verbessert werden kann.

### 3. Sicherung der Rohstoffverfügbarkeit bei steigendem Rohstoffbedarf

Der Bedarf an biobasierten Rohstoffen zur Herstellung diverser Zwischenprodukte und Materialien wird auch in Zukunft weiter ansteigen. Der damit einhergehenden Steigerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen muss jedoch zwingend entgegengewirkt werden. Zur Reduktion des primären Rohstoffbedarfs müssen bestehende Prozesse zur Wiederverwendung und dem Recycling optimiert und neue Wege etabliert werden. Auch hier ist die Verwendung bereits im Kreislauf befindlichen Kohlenstoffs zu nennen, wie die Nutzung von CO<sub>2</sub>.

Damit die Versorgung mit Biomasse zur Herstellung von Biopolymeren in Bayern gesichert werden kann, sollte vermehrt auf regional produzierte Rohstoffe gesetzt und die Biomasse im Sinne der Kaskadennutzung möglichst effizient verarbeitet werden. Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe, die in heimischer Land- und Forstwirtschaft erzeugt und in Bayern verarbeitet werden, fördert den Aufbau zusammenhängender Wertschöpfungskreisläufe. Die Sicherung der Rohstoffversorgung kann besonders durch zuverlässige Lieferketten gestärkt werden, in denen alle Akteure von den vielseitigen Absatzkanälen für Biomasse in der bayerischen Bioökonomie profitieren.

### 4. Vorzug der stofflichen Nutzung von Abfall- und Reststoffen

Organische Nebenprodukte, die derzeit in eine thermische Verwertung gehen, sollten im Sinne der Kaskadennutzung zukünftig weitestgehend stofflich genutzt werden, soweit sie nicht anderweitig, z.B. als Futter- oder Düngemittel, verwendet werden. Die energetische Verwertung von Biomasse sollte in jedem Fall erst erfolgen, wenn eine stoffliche Nutzung nicht mehr in Frage kommt.

Lebensmittel-, Forst- sowie Landwirtschaft-gekoppelte Abfallströme fallen in großen Mengen an und können prinzipiell „sortenrein“ gesammelt werden, wodurch die stoffliche Nutzung in Bioraffinerien erleichtert wird.

### 5. Wettbewerbsausgleich durch Bepreisung externalisierter Kosten

Um langfristig das Marktvolumen der biobasierten Chemikalien zu erhöhen, ist die wirtschaftliche Attraktivität der Rohstoffe maßgeblich. Derzeit sind Biopolymere oft schlechter verfügbar und häufig teurer als vergleichbare fossile Polymere, weil letztere externalisierte Umweltkosten nicht einpreisen und Herstellungsprozesse über lange Jahre erprobt sind. Dies unterstreicht die Bedeutung von kürzlich diskutierten Instrumenten wie der CO<sub>2</sub>-Bepreisung, die schrittweise zu einer Veränderung dieser Diskrepanz führen und biobasierte Produkte und damit auch Biopolymere letztendlich wettbewerbsfähig gegenüber Produkten aus fossilen Rohstoffen machen könnte. Um Kompetenzen zu bündeln und die Fortschrittsgeschwindigkeit der Biopolymer-Forschung zu heben, empfiehlt sich außerdem die Schaffung von Bioraffinerie-Verbundstandorten in Bayern. Darüber hinaus müssen politische Rahmenbedingungen geschaffen werden, um die Etablierung bioökonomischer Produktionsprozesse im Binnenmarkt zu ermöglichen. Ein Abwandern industrieller Prozesse ins EU-Ausland zur Umgehung der CO<sub>2</sub>-Bepreisung durch einen wirksamen Schutz an den EU-Außengrenzen (z.B. Carbon border adjustment mechanism) muss verhindert werden.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Kunz, S., Wach, W., Kraus, W. (2002): Biorefinery Zeitze of the Südzucker Group – Status Quo and Future Perspectives, Chem. Ing. Tech. 2020, 92, No. 11, 1752–1763.

