

# **ZIRKULÄRE BIOÖKONOMIE FÜR DEUTSCHLAND**

Eine Roadmap der Fraunhofer-Gesellschaft zur  
Umsetzung der Bioökonomie in Deutschland

# ZIRKULÄRE BIOÖKONOMIE FÜR DEUTSCHLAND

## Eine Roadmap der Fraunhofer-Gesellschaft zur Umsetzung der Bioökonomie in Deutschland

### **Autoren**

Jens Buller<sup>1</sup>, Robert Daschner<sup>2</sup>, Lena Grimm<sup>3</sup>, Michael Hofer<sup>4</sup>, Bärbel Hüsing<sup>5</sup>, Julia Kraymer<sup>2</sup>, Robert Mieke<sup>6</sup>, Elke Präg<sup>4</sup>, Esther Stahl<sup>2</sup>, Andreas Stäbler<sup>7</sup>, Anna-Katharina Stumpf<sup>8</sup>, Lina Vieres<sup>2</sup>, Bert Volkert<sup>1</sup>, Sven Wydra<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

<sup>3</sup> Fraunhofer-Zentrale

<sup>4</sup> Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB

<sup>5</sup> Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

<sup>6</sup> Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

<sup>7</sup> Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV

<sup>8</sup> Fraunhofer Strategisches Forschungsfeld Bioökonomie

### **Unter Koordination des Fraunhofer Strategischen Forschungsfelds Bioökonomie**

Markus Wolperdinger, Institutsleitung Fraunhofer IGB

Alexander Böker, Institutsleitung Fraunhofer IAP

Andrea Büttner, geschäftsführende Institutsleitung Fraunhofer IVV

### **Mit Beteiligung von**

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie IME

Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut WKI

Berlin, November 2022

## **Kontakt**

Dr. Anna-Katharina Stumpf, Geschäftsstellenleitung Fraunhofer Strategisches Forschungsfeld Bioökonomie, [anna-katharina.stumpf@iap.fraunhofer.de](mailto:anna-katharina.stumpf@iap.fraunhofer.de)

# Inhalt

<b>Management Summary</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Leitbild: Zirkuläre Bioökonomie</b> .....	<b>10</b>
<b>3 Status-Quo und Herausforderungen</b> .....	<b>12</b>
3.1 Biomasse als zentraler Rohstoff für die Bioökonomie.....	12
3.2 Biomasseangebot, -nachfrage und damit einhergehende Herausforderungen .....	14
3.3 Alternative Rohstoffquellen für die Bioökonomie .....	16
<b>4 Anwendungsfelder und Chancen der Bioökonomie</b> .....	<b>18</b>
4.1 Ernährung.....	18
4.1.1 Resilienz der Lebensmittelwertschöpfungsketten.....	19
4.1.2 Globale Ernährungssicherung.....	20
4.1.3 Nachhaltige und gesunde Ernährung .....	23
4.1.4 Reduktion vermeidbarer Lebensmittelabfälle sowie Nutzung von unvermeidbaren Lebensmittelabfällen und -nebenströmen .....	24
4.2 Stoffliche Nutzung von Biomasse und CO <sub>2</sub> – Bioökonomie als Basis für Hightech .....	25
4.2.1 Biobasierte Kunststoffe .....	26
4.2.2 Biowerkstoffe als Baumaterialien am Beispiel Pilzwerkstoffe .....	30
4.2.3 CO <sub>2</sub> als Rohstoff.....	32
4.2.4 Chemierohstoffe und Kraftstoffe durch die thermochemische Umsetzung von Biomasse.....	35
4.3 Exkurs: Die Biologische Transformation .....	37
<b>5 Handlungsempfehlungen</b> .....	<b>38</b>
5.1 Rahmenbedingungen.....	38
5.2 Technologien .....	41
5.3 Translation .....	43
<b>Literatur</b> .....	<b>47</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>54</b>

## Abbildungen

Abb. 1	Konzept der zirkulären Bioökonomie und der dazugehörigen Elemente .....	11
Abb. 2	Biomasse-Stoffströme in der deutschen Bioökonomie (Stand 2015) .....	15
Abb. 3	Der Wertschöpfungskreislauf der Bioökonomie mit Beispielen für die jeweiligen Prozessstufen, Rohstoffe und Produkte.....	26
Abb. 4	Weltmarktanteile Biokunststoffe nach Umsatz aus dem Jahr 2018 sowie Schätzungen für 2023 und 2030 .....	29
Abb. 5	Die Herstellung nachhaltiger CO <sub>2</sub> -basierter Kraftstoffe über das Zwischenprodukt Methanol .....	33
Abb. 6	Übersicht der Handlungsempfehlungen .....	46

## Abkürzungen

B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Customer
Bio-PE	Bio-Polyethylen
BPA	Bisphenol-A
CCU	Carbon Capture and Utilization
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
DAC	Direct Air Capture
DGE e. V.	Deutsche Gesellschaft für Ernährung e. V.
EFSA	Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit
EU	Europäische Union
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FuE	Forschung und Entwicklung
FuEul	Forschung, Entwicklung und Innovation
HyBECCS	Hydrogen Bioenergy with Carbon Capture and Storage
IMAG	Interministerielle Arbeitsgruppe
KI	Künstliche Intelligenz
LCA	Life Cycle Assessment
MHD	Mindesthaltbarkeitsdatum
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PBS	Polybutylensuccinat
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PHB	Polyhydroxybuttersäure
PLA	Polymilchsäure
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
SDGs	Sustainable Development Goals
SNG	Substitute Natural Gas
TCR	Thermo-Katalytisches-Reforming
TRL	Technology Readiness Level

## Management Summary

Wie kann die Umsetzung einer zirkulären Bioökonomie gelingen? Und welche Aktivitäten sind hierfür angezeigt? Diesen Fragen geht die vorliegende Roadmap aus wissenschaftlich-technologischer Sicht auf den Grund. Es zeigt sich, dass es von übergreifender Bedeutung ist, die Gesellschaft als Ganzes davon zu überzeugen, dass eine nachhaltige Wirtschaftsweise zum Wohlergehen von Gesellschaft, Wirtschaft und der Natur unabdingbar ist – und deren Realisierung zeitnah erfolgen muss. Die gesamtgesellschaftliche Bereitschaft Veränderungen zu akzeptieren und mitzutragen hat im gegenwärtigen politischen und wirtschaftlichen Klima deutlich zugenommen: Uns allen wird durch die Vielzahl der globalen Krisen und die damit einhergehenden Einschränkungen in der Rohstoffverfügbarkeit deutlich bewusst, dass bisher anscheinend in ausreichenden Mengen verfügbare Ressourcen schon heute begrenzt sind oder zukünftig nicht mehr zur Verfügung stehen. Deutschland ist stark von den Rohstoffen anderer Länder abhängig. Durch die geopolitischen Ereignisse gerät die Souveränität des Wirtschaftsstandorts Deutschland zunehmend in den politischen und gesellschaftlichen Fokus. In dieser Situation sind kurz-, mittel- und langfristige Lösungen gefordert um die Rohstoffabhängigkeit zu minimieren. Diese Lösungen eröffnen zugleich auch eine Chance, den stetig fortschreitenden Klimawandel in so engen Grenzen wie möglich zu halten.

In diesem Kontext gewinnt die Abkehr von fossilen Rohstoffen und die Notwendigkeit einer nachhaltigeren Wirtschaftsweise zunehmend an Bedeutung. Weltweit definieren daher immer mehr Staaten und Regionen Bioökonomiestrategien, die die konzeptionelle Grundlage für eine gesellschaftliche Veränderung bilden. Zudem zeigt sich die Wirtschaft zunehmend offen für die Transformation, von einer bisher weitgehend linearen, hin zu einer zirkulären und nachhaltigen Wirtschaftsweise. Die Bioökonomie kann auch hier wichtige Impulse geben.

Für den Erfolg einer nachhaltigen zirkulären Bioökonomie sind tiefgreifende gesellschaftliche Veränderungen erforderlich. Diese müssen einhergehen mit einem Umdenken bei der Erzeugung und Nutzung von biogenen Rohstoffen und der Erschließung von alternativen Rohstoffquellen wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid. Die vorliegende Roadmap zeigt eine Reihe von Strategien auf, wie die Transformation gelingen kann. Hierzu zählen beispielsweise:

- Effizienzsteigerung von Prozessen, Kaskadennutzungen und zunehmende Kreislauf-führung durch eine erhöhte Wertschöpfung von biogenen Abfall- und Reststoffen aus der Land- und Forstwirtschaft, aus industrieller Produktion und privaten Haushalten
- Erschließung und Nutzung von CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle
- Transfer von verfügbaren Technologien zur Nutzung von biogenen Rohstoffen und der Erzeugung von nachhaltigen Produkten in den Markt, unter Berücksichtigung des Gesamtsystems inklusive Logistik- und Versorgungsketten, sowie Standortfaktoren
- Wissensbasierte Verbesserung der Erzeugung und Qualität von Anbaubiomasse durch Biotechnologie und Züchtungsforschung
- Ergänzung der Biomasseproduktion auf Agrar-Landflächen durch z. B. Indoor Farming und Erweiterung der Biomasseproduktion über (Wieder)erschließung landwirtschaftlich nicht (mehr) nutzbarer Landflächen
- Steigerung der ökologischen, technischen und gesellschaftlichen Resilienz der Anbau-, Produktions- und Verwertungssysteme von Biomasse im Einklang mit den Zielen des Umwelt-, Klima- und Biodiversitätsschutzes

- Frühzeitige und chancenorientierte Einbindung aller relevanter Stakeholder sowie der Öffentlichkeit zur Steigerung der Akzeptanz in Industrie und Öffentlichkeit als ein zentrales Element für einen erfolgreichen Transformationsprozess

Aufbauend auf diesen Ansätzen stellt die vorliegende Roadmap konkrete Möglichkeiten vor, wie Biomasse und weitere Kohlenstoffquellen in den Bereichen Ernährung und stoffliche Nutzung nachhaltig erschlossen und ressourceneffizient eingesetzt werden können. Sie gibt konkrete Hinweise, wie eine Transformation hin zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise gelingen kann und unterbreitet Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger zur Umsetzung neuer innovativer Verfahren, von welchen Industrie, Gesellschaft und Umwelt gleichermaßen profitieren.

# 1 Einführung

Unsere Gesellschaft steht gegenwärtig vor gewaltigen Herausforderungen: Sie umfassen den Klimawandel, die weltweite Verknappung von Ressourcen durch die stetig wachsende Bevölkerung und deren steigende Konsumbedürfnisse, Pandemien und internationale Konflikte sowie damit einhergehende Auswirkungen auf globale Lieferketten. Diesen Herausforderungen mit adäquaten Lösungen zu begegnen erfordert ein Zusammenwirken von Industrie, Forschung, Politik und Gesellschaft. Es bedarf tiefgreifender Aktivitäten, um die notwendige Transformation unserer Gesellschaft hin zu einer nachhaltigen Produktions- und Lebensweise zu ermöglichen und es ist gleichzeitig eine effektive Agrar-, Ressourcen- und Energiewende erforderlich. Hierzu sind innovative technologische Lösungen, wirtschaftlich attraktive Anreize für die Industrie, und die Akzeptanz für neue Lebensweisen in der Gesellschaft, bei gleichzeitiger Gewährleistung der ökologischen Verträglichkeit zum Schutze und zur Regeneration von Ökosystemen und Biodiversität, erforderlich. Die Fraunhofer-Gesellschaft, eine der weltweit führenden Organisationen für anwendungsorientierte Forschung, sieht die Bioökonomie als ein zentrales Element dieses Wandels. Durch deren konsequente Umsetzung im Alltag haben wir eine Chance, auch künftigen Generationen ein Leben in Gesundheit, Sicherheit und Würde zu ermöglichen.

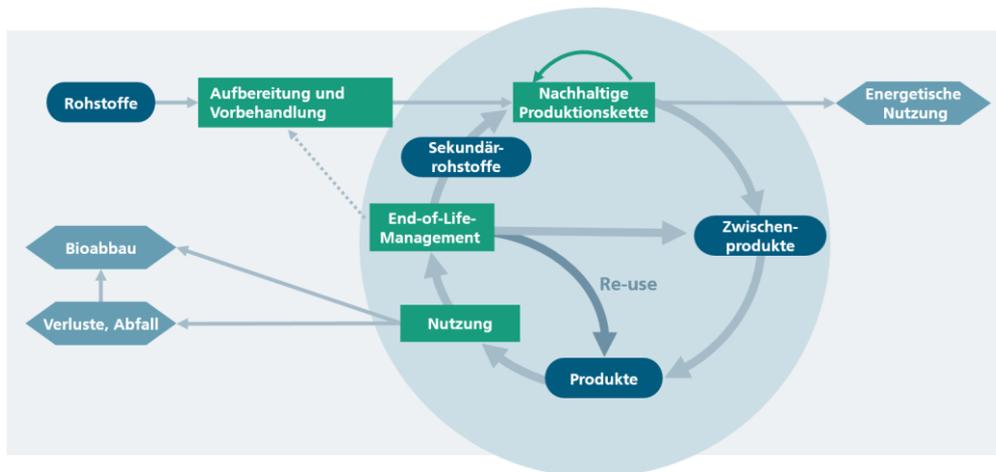
Die Bioökonomie wird definiert als die Erzeugung und Nutzung biologischer Ressourcen (auch Informationen und Wissen umfassend), um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen [1]. Neue Produkte und Technologien im Bereich der Bioökonomie bergen das Potenzial, die Sicherung zukünftiger Arbeitsplätze und des Lebensstandards zu fördern und Beiträge zur weltweiten Ernährungssicherheit sowie zum Klima- und Umweltschutz zu leisten. Die Bioökonomie muss so ausgestaltet werden, dass sie die planetaren Grenzen respektiert und alle drei Säulen der Nachhaltigkeit – Ökologie, Ökonomie und Soziales – gleichermaßen berücksichtigt. Unter diesen Prämissen leistet sie einen signifikanten Beitrag zu den »Sustainable Development Goals« (SDGs) der Vereinten Nationen und den »Pariser Klimaschutzziele« [2, 3]. Mit der Bioökonomie eröffnet sich die Möglichkeit, durch einen systemischen Ansatz verschiedene Branchen und Wissenschaftsdisziplinen auf einer gesamtgesellschaftlichen Basis miteinander zu vereinen. Die Erprobung und Einführung neuer Produkte und Technologien, die Einbindung verschiedener Stakeholder in Entscheidungsprozesse sowie eine konstruktive Debatte über mögliche Zielkonflikte in der Öffentlichkeit stellen dabei zentrale Elemente für eine erfolgreiche Transformation dar.

Die Fraunhofer-Gesellschaft trägt als außeruniversitäre, anwendungsorientierte Forschungseinrichtung mit ihrer Expertise in der Bioökonomie entscheidend zur Transformation in Richtung einer nachhaltigen und ressourceneffizienten Welt bei. Sie orientiert sich mit ihren spezifischen Forschungsaktivitäten am Leitbild einer zirkulären Bioökonomie, einer Synergie der Konzepte der Bioökonomie und der Kreislaufwirtschaft [4]. Die gemeinsame Mission aller im Feld der Bioökonomie aktiven Fraunhofer-Institute ist es, biotechnologische, verfahrenstechnische, digitale, zirkuläre und systemische Lösungen für eine verantwortungsvolle Nutzung der natürlichen Ressourcen zu entwickeln und diese in die industrielle Praxis zu überführen. Als kompetenter Partner der Industrie ist die Fraunhofer-Gesellschaft auf die Stärkung des Wirtschaftsstandorts Deutschland ausgerichtet, sieht sich aber im gleichen Maße verpflichtet, wesentliche Beiträge zur Bewältigung der großen gesellschaftlichen Herausforderungen zu leisten.

Die global zu bewältigenden Aufgaben erfordern zwingend eine Abkehr von einem linearen, ressourcenintensiven und emissionsstarken Wirtschaftsmodell hin zu einer zirkulären Wirtschaft, die auf Wertschöpfungskreisläufen und -netzwerken beruht und somit weitestgehend auf die Nutzung von fossilen Rohstoffen verzichtet. Aufgrund des Klimawandels und der Endlichkeit von Erdöl, Erdgas und Kohle muss ein Wandel von der Nutzung fossilen Kohlenstoffs hin zu alternativen und nachhaltigen Rohstoffquellen gelingen.

Im Zentrum der zirkulären Bioökonomie steht die Entwicklung und Umsetzung innovativer Verfahren und Produkte, die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsnetzwerke, welche in Summe auf eine kreislaforientierte Nutzung von Rohstoffen in Produktionsprozessen unter ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten fokussieren.

Eine solche zirkuläre Bioökonomie beruht in weiten Teilen auf biogenen Rohstoffen aus Land- und Forstwirtschaft, Reststoffen, Abwasser und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), welche in mehrstufigen, kaskadenförmigen Kreisläufen verwertet und möglichst weitgehend wiederverwendet werden (Abb. 1). Als Nutzungskaskade wird hierbei eine mehrfache stoffliche Nutzung mit ggf. abnehmender Wertschöpfung sowie eine abschließende energetische Verwertung oder eine Kompostierung der Reststoffe verstanden. Darüber hinaus können biotechnologische Verfahren und biologisches Wissen dazu genutzt werden, die Kreislaufführung und Kaskadennutzung von abiotischen Rohstoffen zu unterstützen. Dies kann beispielsweise über die Rückgewinnung von Metallen für industrielle Anwendungen oder anorganischer Stoffe zur Produktion von Düngemitteln erfolgen. Das Ziel ist stets eine verbesserte Ressourcennutzung mit höherer Umweltverträglichkeit und geringeren Treibhausgasemissionen sowie die Wertschöpfung von und aus Neben- und Reststoffströmen.



**Abb. 1 Konzept der zirkulären Bioökonomie und der dazugehörigen Elemente**

Produktionsprozesse, welche nicht-fossile Rohstoffe verarbeiten und eine damit gekoppelte Kreislaufwirtschaft sind notwendige Ansatzpunkte für eine zirkuläre Bioökonomie, führen aber nicht automatisch zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise. Zusätzlich bedarf es geeigneter wirtschaftlicher, politischer und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen, damit knappe Anbauflächen und Rohstoffströme der effizientesten und produktivsten Nutzung zugeführt werden. Auch unvermeidliche Ziel- und Nutzungskonflikte müssen im Voraus objektiv in Szenarienbetrachtungen und Foresightprozessen ermittelt werden, um in chancenorientierten Dialogprozessen mit allen relevanten Stakeholdern prospektive, präventive und proaktive Lösungen zu finden.

## 3 Status-Quo und Herausforderungen

Das große Potenzial der Bioökonomie und die Notwendigkeit zur Transformation wurde bereits weltweit erkannt: Mehr als 50 Staaten haben eigene Bioökonomiestrategien aufgelegt und damit begonnen, die darin definierten Zielsetzungen voranzutreiben [1]. Um die Bioökonomie über die Aktivitäten der einzelnen europäischen Länder hinaus zu bündeln, veröffentlichte die Europäische Kommission im Jahr 2012 die erste europäische Bioökonomiestrategie, welche kontinuierlich überarbeitet wird [5–7]. Der Aufschwung der Bioökonomie zeichnet sich in Deutschland auch auf Bundesländerebene ab: verschiedene Bundesländer und Regionen haben Bioökonomiestrategien entwickelt oder entwickeln diese gerade [8–11]. Zudem fördern der Bund und die Bundesländer den Ausbau der Bioökonomie in Deutschland mit diversen Programmen und Initiativen.

Auch die Bundesregierung hat bundesländerübergreifend Leitlinien und Ziele der deutschen Bioökonomiepolitik definiert und Umsetzungsmaßnahmen festgelegt, beginnend mit dem auf EU-Ebene entwickelten »Cologne Paper« bis zur »Nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030« [12, 13]. Mit der aktuellen »Nationalen Bioökonomiestrategie« soll die Wettbewerbsfähigkeit und Souveränität der deutschen Wirtschaft gesichert und ihre Resilienz gesteigert werden [1]. Durch die Nutzung biologischen Wissens sowie einem umfassenden Verständnis der Zusammenhänge in Ökosystemen werden neue Produkte und Verfahren etabliert. Gleichzeitig wird die Erneuerung traditioneller Unternehmensformen und der Auf- und Umbau von Wertschöpfungsketten in ökologisch und gesellschaftlich verträglicher Weise vorangetrieben. Diesen Zielen fühlt sich auch die Fraunhofer-Gesellschaft verpflichtet. Mit der vorliegenden Roadmap zeigt sie aus wissenschaftlich-technologischer Perspektive Handlungsoptionen auf, die zur Erreichung dieser Ziele beitragen.

Im Folgenden werden relevante und notwendige Entwicklungen hinsichtlich Verfügbarkeit und Bedarf von Biomasse skizziert, Einflussfaktoren auf die Umsetzungsmöglichkeiten von Technologien aufgezeigt und daraus zentrale Grundannahmen für die Roadmap abgeleitet. Diese Grundannahmen geben zusammen mit den oben skizzierten Zielen der Transformation (Kap. 1 und 2) Hinweise und Empfehlungen, wie die Politik u. a. durch die Unterstützung der Forschung und der Festlegung von Leitlinien zur Umsetzung der Bioökonomie entscheidend beitragen kann. Die Roadmap zeigt außerdem auf, welche Themen und Schwerpunkte aus Sicht der anwendungsorientierten Forschung für dieses Ziel vorrangig anzugehen sind.

### 3.1 Biomasse als zentraler Rohstoff für die Bioökonomie

Biomasse ist derzeit der zentrale Rohstoff der Bioökonomie. Für die Abschätzung von Technologie- und Innovationsbedarfen und deren Potenzialen spielen die zukünftig anzunehmenden Verfügbarkeiten von biogenen Rohstoffen eine wesentliche Rolle: Nutzungskonflikte sind (auch unter stark volatilen Rahmenbedingungen) zu antizipieren und zu vermeiden. Knappe Rohstoffe müssen so genutzt werden, dass die Ziele des Klimaschutzes (Stärkung und Erhaltung der Biodiversität) und der Nachhaltigkeit gleichermaßen erreicht werden.

Hauptquellen für Biomasse sind heute die Land- und Forstwirtschaft. Diese Sektoren gewährleisten traditionell die Versorgung mit Lebensmitteln, nachwachsenden Materialien und Energieträgern. Aufgrund einer Vielzahl von Faktoren, wie der steigenden Bevölkerungszahl und einem zunehmenden Wohlstand sowie des dadurch weltweit steigenden Bedarfs an Lebensmitteln und Konsumgütern, ist auch in der Zukunft eine

verstärkte Nachfrage nach diesen Rohstoffen zu erwarten. Durch die fortschreitende Implementierung der Bioökonomie wird die Nachfrage nach Biomasse zusätzlich gesteigert. Dies kann zu einer größeren Flächeninanspruchnahme für deren Produktion und zu möglichen Zielkonflikten mit anderen Nutzungsmöglichkeiten führen. Zugleich ist die Leistungsfähigkeit der Land- und Forstwirtschaft zur Bereitstellung von Biomasse gefährdet: Der Klimawandel trägt zur Verschlechterung der Bodenqualität und Bodenfruchtbarkeit bis hin zur Wüstenbildung und Landdegradierung in vielen Regionen der Welt bei. Häufigkeit, Dauer und Intensität von Extremereignissen wie Dürren oder Überschwemmungen nehmen zu. Ganze Ökosysteme, wie beispielsweise Moore oder Permafrost-Regionen sind in ihrer Funktionsfähigkeit beeinträchtigt und in ihrer Resilienz geschwächt. Der dramatische Verlust an Biodiversität ist sowohl Ursache als auch Folge dieser globalen Veränderungen. Intakte, funktionsfähige Ökosysteme sind für eine produktive und nachhaltige Agrar- und Forstwirtschaft jedoch von essenzieller Bedeutung. Seit Jahren wird intensiv diskutiert, inwieweit die Bereitstellung von Biomasse vor allem auf Agrarflächen nachhaltig erfolgen kann.<sup>1</sup> Nach Abschätzungen des Internationalen Instituts für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS GmbH) liegt das nachhaltig erzeugbare Potenzial (bis 2050) von Biomasse ohne Reststoffe aus der Landwirtschaft deutlich unter der aktuell gewonnenen Menge [14].<sup>2</sup> Zudem besteht kaum Potenzial, den Bedarf an nachhaltig erzeugter Biomasse über den Welthandel zu decken. Dies gelingt bereits innerhalb der Europäischen Union (EU) nur eingeschränkt, und die ökologischen Folgen des heimischen Biomassebedarfs für andere Länder werden sehr kritisch gesehen [15].

Nicht zuletzt besteht auch innerhalb der land- und forstwirtschaftlichen Produktion von Biomasse eine Flächen- und Nutzungskonkurrenz zwischen Ökosystemdienstleistungen<sup>3</sup>, Nahrungs- und Futtermittelproduktion, sowie stofflicher und energetischer Verwertung der zur Verfügung stehenden Biomasse. In der »Nationalen Bioökonomiestrategie« und auch im Rahmen des vorliegenden Papiers ist als vorrangiges Ziel die Ernährungssicherung vor der stofflichen Nutzung und der energetischen Nutzung von Biomasse festgelegt [1].

<sup>1</sup> Bei der nachhaltigen Erzeugung von Biomasse wird darauf geachtet, dass die Regeneration der Anbauflächen möglich ist und somit zukünftige Generationen diese nutzen können. Nachhaltigkeit umfasst hierbei ökonomische, ökologische und soziale Aspekte.

<sup>2</sup> Das Potenzial nachhaltig erzeugbarer Biomasse aus der Landwirtschaft (ohne Reststoffe) liegt bei 77 Mio. Tonnen Trockengewicht. Die aktuell gewonnene Menge bei 140 Mio. Tonnen Trockengewicht [14].

<sup>3</sup> Ökosystemdienstleistungen: Direkte oder indirekte Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen.

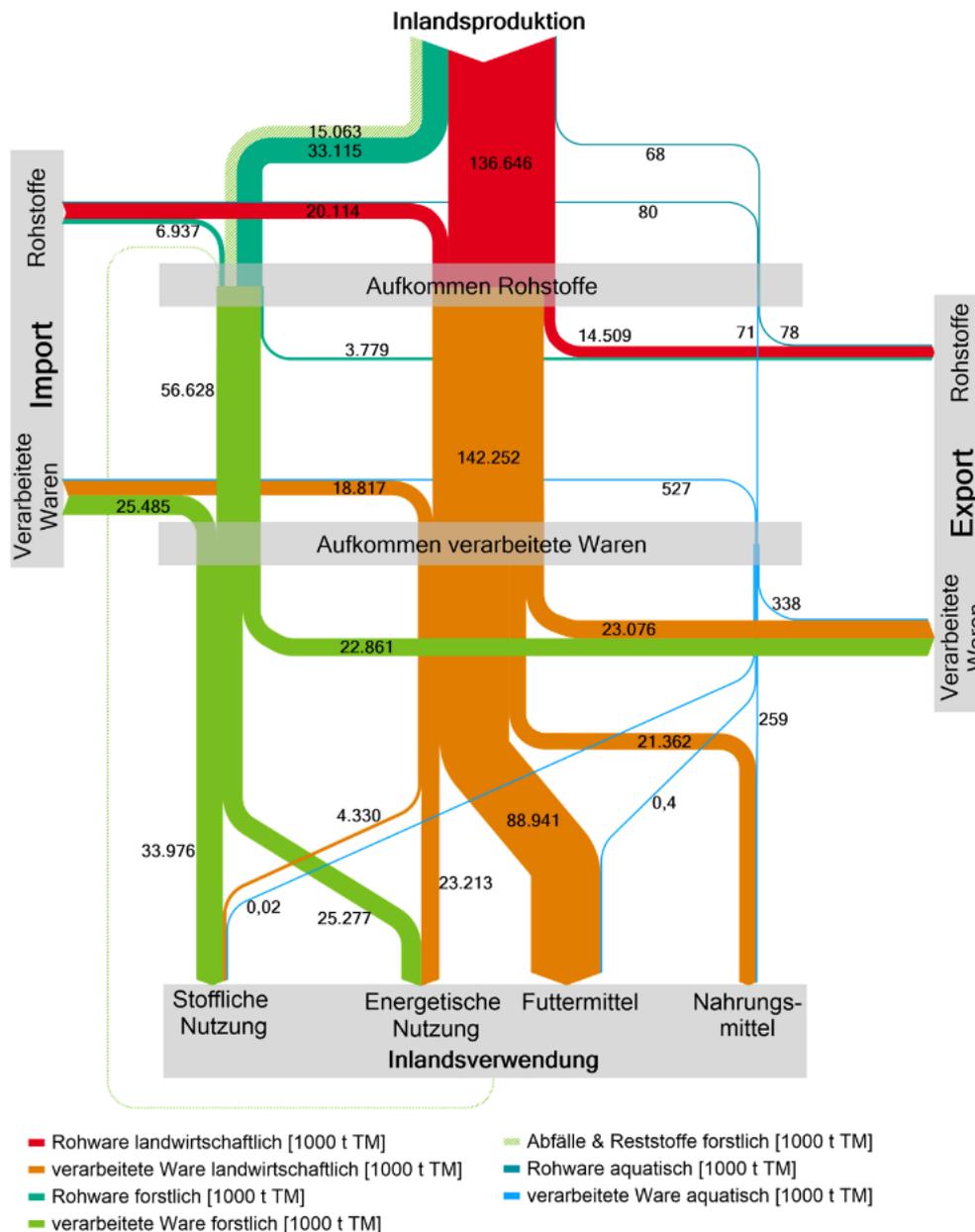
## 3.2 Biomasseangebot und -nachfrage und damit einhergehende Herausforderungen

Zur Beschreibung der Verfügbarkeit und Nutzung von Biomasse sind die Flächenverfügbarkeit, die inländische Biomasseproduktion, Im- und Exporte von biogenen Rohstoffen sowie die weiterverarbeiteten Waren zu berücksichtigen. Die aktuellsten Zahlen in diesen Bereichen liegen zwar nur für das Jahr 2015 vor, neuere Angaben für Teilbereiche lassen jedoch den Schluss zu, dass es seitdem keine wesentlichen Änderungen gegeben hat [14].<sup>1</sup> Die inländische Produktion von Biomasse beläuft sich auf rund 185 Mio. Tonnen (Abb. 2). Ein Großteil der Biomasse (inkl. Importe) stammt aus der landwirtschaftlichen Produktion. Deutschland ist bereits heute Nettoimporteur von Biomasse und daraus hergestellter Produkte und verlagert damit einen erheblichen Anteil der ökologischen Effekte, die mit intensiver Landnutzung verbunden sind, in das Ausland. Dies kann zu sozialen und politischen Ungleichgewichten führen und muss bei einer zukünftigen Entwicklung von Verfahren zur Nutzung von biogenen Rohstoffen bereits im Vorfeld berücksichtigt werden.

Der größte Anteil der Biomasse wird derzeit in Deutschland für Futtermittel genutzt. An zweiter Stelle steht die Produktion von Bioenergie und erst an dritter Stelle die stoffliche Nutzung (z. B. Holz für Möbel und Papier). Der geringste Anteil (ca. 10 Prozent) wird für die direkte Produktion von Nahrungsmitteln für den menschlichen Verzehr verwendet [16].

Biomasse bietet für eine Vielzahl von Wirtschaftssektoren eine der wenigen Alternativen zu fossilen Rohstoffen. Der stofflichen Nutzung von Biomasse wird daher seit geraumer Zeit ein wichtiger Beitrag zu einer nachhaltigen wirtschaftlichen Entwicklung zugesprochen. Nachwachsende Rohstoffe haben in den vergangenen Jahren bereits in viele Märkte Einzug gehalten. Sie bedienen dabei ein breites Produktspektrum von Baustoffen über Papier und Pappe bis hin zu Kautschukerzeugnissen und Zwischenprodukten für die chemische Industrie. Neben der chemischen Industrie setzen die Textilindustrie, die Bauindustrie sowie die Pharma- und Kosmetikindustrie große Mengen nachwachsender Rohstoffe für die stoffliche Verwertung ein. Auch zukünftig werden signifikante Wachstumsraten in verschiedenen Märkten z. B. bei Bioschmierstoffen und -tensiden erwartet [17]. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse erscheinen jedoch nur die Nutzungspfade mit einer hohen Rohstoffeffizienz und geringer Nutzungskonkurrenz zu Futter- und Nahrungsmitteln zukunftsfähig. Im Sinne einer nachhaltigen Bioökonomie ist zudem zu beachten, dass die benötigte Biomasse unter Berücksichtigung ökologischer und ethischer Kriterien gewonnen, verarbeitet und effizient eingesetzt wird.

<sup>1</sup> Aktuellere Schätzungen bei der Nutzung von Biomasse beziehen sich auf die genannten Zahlen oder kommen zu einem ähnlichen Ergebnis (z. B. [14]). Zudem hat sich in den vergangenen Jahren die landwirtschaftliche Fläche nur leicht verringert und auch die Waldfläche ist konstant geblieben. Daten zu Erntemengen beispielsweise bei Getreide zeigen – auch unter Berücksichtigung jährlicher Schwankungen – keinen eindeutigen Trend auf.



**Abb. 2 Biomasse-Stoffströme in der deutschen Bioökonomie (Stand 2015). Quelle: Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie [16]**

Die energetische Verwendung von Biomasse wird maßgeblich von gesetzlichen Regelungen, insbesondere der »Renewable Energy Directive« und ihrer nationalen Umsetzung bestimmt [18]. Aus der absehbaren Knappheit von Biomasse wird von vielen Expertinnen und Experten eine Reduktion und Umnutzung der bisherigen energetischen Biomasseverwendung gefordert [14]. Daraus leiten sich die Forderung einer zunehmenden Kaskadennutzung und die vorwiegende Wiederaufbereitung von Abfall- und Reststoffen u. a. zur Energiewandlung und Kraftstofferzeugung ab [19]. Biomasse für die energetische Nutzung sollte daher auf Stoffströme beschränkt sein, die weder der Ernährung noch der stofflichen Verwendung dienen können. Es ist in diesem Zusammenhang zu betonen, dass sich die stoffliche und energetische Nutzung von Biomasse nicht ausschließen. Hier spielt die wissenschaftsbasierte züchterische Anpassung von Pflanzen für die jeweiligen stofflichen Einsatzgebiete eine wesentliche Rolle. Beispielsweise kön-

nen pflanzliche Eigenschaften, die für eine Nutzung als Nahrungs- oder Futtermittel bislang nachteilig waren, für technische Anwendungen einen Nutzungsvorteil bringen und zugleich der Stärkung der Resilienz und der Biodiversität in Ökosystemen zuträglich sein. Statt vermeintlicher Gegensätze und Konkurrenzen gilt es also, systemische Verbindungen und Synergien aufzuzeigen und die wirtschaftlichen, ökologischen, sozio-ökonomischen und gegebenenfalls sogar politischen Stärken wie Sicherung der Souveränität und Resilienz der Bundesrepublik herauszuarbeiten.

### 3.3

## Alternative Rohstoffquellen für die Bioökonomie

Für die gesamte industrielle Nutzung – stofflich oder energetisch – spielen biogene Rest- und Abfallstoffe eine zunehmend wichtige Rolle. Sie haben den Vorteil, dass sie nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- oder Futtermittelproduktion stehen. Mögliche nachteilige Effekte der Nutzung von Abfällen für die Stabilität von Ökosystemen und Sicherheit der Versorgung der Menschen mit Nahrungsmitteln sind geringer als bei der Nutzung von Waldholz oder Agrarbiomasse [20]. Für das Jahr 2015 wurde ein technisches Potenzial von biogenen Reststoffen, Nebenprodukten und Abfällen von 85,6 bis 139,6 Mio. Tonnen Trockenmasse in Deutschland identifiziert [21]. Davon werden zwischen 66 und 84 Prozent bereits genutzt.<sup>1</sup> Somit verbleibt ein noch ausschöpfbares technisches Potenzial von ca. 14 bis 48 Mio. Tonnen Trockenmasse.<sup>2</sup> Dies entspricht rund 7 bis 22 Prozent der aktuellen Nutzungsmenge von Biomasse. Folglich stellen biogene Rest- und Abfallstoffe ein signifikantes Biomassepotenzial für verschiedene Nutzungen dar und können erheblich zur Wertschöpfung der zirkulären Bioökonomie beitragen.

Neben der Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen liegt eine weitere zentrale Möglichkeit zur Reduktion des Flächenbedarfs darin, andere Rohstoffe als Biomasse für die stoffliche und energetische Verwendung einzusetzen. Carbon Capture and Utilization (CCU) nutzt CO<sub>2</sub> als Rohstoff, um Kohlenwasserstoffe herzustellen [22, 23]. Die CCU-Technologie ermöglicht eine umfassende technische Kreislaufführung von Kohlenstoff und die Loslösung von fossilen Kohlenstoffquellen (Erdgas und Erdöl) ebenso wie von nachwachsenden Rohstoffen. Es ist darauf hinzuweisen, dass CCU-Verfahren bereits technologisch möglich sind, jedoch aufgrund ihres hohen (Energie)-Aufwands derzeit meist noch nicht wirtschaftlich arbeiten. Essenziell bei vielen CCU-Verfahren ist die gleichzeitige Bereitstellung von Wasserstoff als Reaktionspartner für CO<sub>2</sub>, der im Sinne der Nachhaltigkeit durch Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden sollte. Die so erzeugten Kohlenwasserstoff-Verbindungen (z. B. Methanol) können als Grundstoffe für die chemische und die Kunststoffindustrie sowie als Treibstoffe für den Verkehrssektor dienen. Über verschiedene Prozessrouten könnte beispielsweise ein Großteil der Chemieindustrie auf eine solche Rohstoffbasis umgestellt werden [24]. In diesem Bereich sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (FuE-Arbeiten) bereits so weit fortgeschritten, dass heute schon niedermolekulare Grundstoffe über Wasserstoff und CO<sub>2</sub> mittels Power-to-X-Verfahren (PtX) hergestellt werden. Um die Produktion organischer Moleküle mit größerer Komplexität zu erreichen, ist es

<sup>1</sup> Den größten Anteil hat hierbei die stoffliche Nutzung (54 bis 58 Prozent). Auf die energetische Nutzung entfallen 37 Prozent und etwa 5 bis 9 Prozent können einer stofflichen bzw. energetischen Nutzung nicht eindeutig zugeordnet werden [20].

<sup>2</sup> Die Bandbreiten ergeben sich aus Unsicherheiten bei den Berechnungselementen. So beschreibt die in der Arbeitsgruppe gesichtete Literatur erhebliche Bandbreiten für die Wasser- und Trockenmassegehalte sowie Entnahmeraten von Waldrestholz.

zukünftig notwendig, ergänzend auch biotechnologische Verfahren für die Umsetzung von CO<sub>2</sub> in Betracht zu ziehen.

-----  
Status-Quo und  
Herausforderungen  
-----

Mögliche Quellen für CO<sub>2</sub> sind die Abscheidung von CO<sub>2</sub> beispielsweise an Punktquellen (z. B. in Stahl- und Zement-, Kraftwerken, Abfallverbrennungs- und Abwasserbehandlungsanlagen) oder direkt aus der Luft (Direct Air Capture (DAC)). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Klimaschutzplan vorsieht die Emissionen im Industriesektor von 172 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (Jahr 2020) auf 118 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Jahr 2030 zu reduzieren [25].

Es ist zu beachten, dass es sich bei der Nutzung von Punktquellen bis auf einige Ausnahmen, bei denen CO<sub>2</sub> Emissionen unvermeidbar sind (z. B. Zementindustrie), nur um Übergangslösungen handelt, da das generelle Ziel die vollständige Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen ist. Bei den aktuellen Generationen von Industrieanlagen können CCU-Verfahren jedoch die CO<sub>2</sub>-Bilanz verbessern und gleichzeitig zur Entwicklung praxisreifer CCU-Verfahren und deren Skalierung dienen.

Die in diesem Kapitel skizzierten Rahmenbedingungen der Verfügbarkeiten von Biomasse und anderen nicht fossilbasierten Kohlenstoffquellen, sind die Basis für den Erfolg der Umsetzung einer zirkulären Bioökonomie, die ökonomischen, ökologischen und sozialen Anforderungen gerecht wird. Im nachfolgenden Kapitel werden die sich aus diesen Annahmen und den genannten Fragestellungen resultierenden FuE-Bedarfe erläutert und Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt.

In diesem Kapitel werden exemplarisch anhand der Anwendungsfelder »Ernährung« und »Stoffliche Nutzung von Biomasse und CO<sub>2</sub>« wichtige Wertschöpfungsketten der Bioökonomie dargestellt. Es wird der aktuelle Stand der jeweiligen Technologien erläutert und es werden FuE-Bedarfe in den jeweiligen Sektoren skizziert. Zudem werden Hemmnisse in der angewandten Forschung sowie beim Transfer der Forschung in die Anwendung aufgezeigt.

## 4.1 Ernährung

Die in Kapitel 1 genannten Herausforderungen haben deutlich gemacht, wie volatil und fragil auch über Jahrzehnte etablierte Produktions- und Lieferketten sein können. So sind in den letzten 20 Jahren die Preise für viele Grundnahrungsmittel erheblich angestiegen [26]. Beispielsweise betrug die Preissteigerung für Reis im Jahresvergleich über 30 Prozent [27]. Dieser globale Trend führt dazu, dass die Zahl der an Hunger leidenden Menschen erstmals seit Ende des zweiten Weltkriegs wieder zunimmt; dabei geht eine Studie der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) davon aus, dass bereits vor Beginn des Ukraine-Kriegs weltweit rund 800 Mio. Menschen ihren täglichen Kalorienbedarf nicht decken konnten [28].

Somit gehört die resiliente Versorgung einer stetig wachsenden Weltbevölkerung mit hochwertigen und sicheren Lebensmitteln zu den größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Zwar würde die derzeitige Agrarproduktion ausreichen, um genug pflanzenbasierte Nahrung für 9,5 Mrd. Menschen im Jahr 2050 bereitzustellen [29], die Erzeugung von genügend Kalorien reicht für eine gesunde Ernährung jedoch nicht aus. So ist bereits heute in weiten Teilen der Welt neben einem Mangel an Mikronährstoffen vor allem die unzureichende Versorgung mit hochwertigen Proteinen eine Hauptursache für den sogenannten »versteckten Hunger« [30]. Dieser ist weltweit für rund 700 000 Todesfälle von Kindern unter 5 Jahren verantwortlich [31]. Es ist damit zu rechnen, dass sich der Mangel an Proteinen durch Klimawandel-bedingte Extremwetterereignisse sowie durch die Verschlechterung der Böden weiter verschärfen wird [32, 33]. Während Unter- und Mangelernährung ein weltweites, wachsendes Problem darstellt, steigt gleichzeitig die Zahl der Menschen, die unter Übergewicht und Fettleibigkeit leiden [34]. Auch in Deutschland entsprechen die Essgewohnheiten der Bevölkerung nur bedingt den Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e. V. (DGE e. V.). Diese Fehlernährung ist mitverantwortlich für die Zunahme von Adipositas, Herz-Kreislauferkrankungen, Diabetes mellitus und vielen Krebsarten. Jeder fünfte Todesfall in Deutschland und 30 Prozent der Kosten im Gesundheitssystem werden mit einer falschen Ernährungsweise in Verbindung gebracht und könnten zum größten Teil vermieden werden [35]. Ohne gezielte Maßnahmen ist damit zu rechnen, dass sich die Ernährungsweise und damit die Häufigkeit der durch sie verursachten Erkrankungen in Deutschland nicht verbessern wird [36].

Jahrzehnte der Ernährungsforschung belegen, dass die aktuellen Ansätze nicht zu einem dauerhaft gesunden Lebensstil in der Bevölkerung führen. Für eine nachhaltige Veränderung der Ernährungs- und Lebensgewohnheiten bedarf es neuer, ganzheitlicher Konzepte der Kommunikation und der zielgerichteten Einbindung aller Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Mögliche Lösungsansätze zur Umsetzung sind beispielsweise auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierende Apps für eine

personalisierte Ernährungsberatung und innovative Lebensmittel mit hohem Genusswert bei einem gleichzeitig wertvollen ernährungsphysiologischen Profil.

Rund ein Drittel der weltweit produzierten Lebensmittel enden entlang der gesamten Wertschöpfungskette als Neben- oder Abfallstrom [37]. Ein Teil dieser Nebenströme besteht aus nicht essbaren Bestandteilen der produzierten Lebensmittel und ist somit nicht vermeidbar. Diese haben jedoch das Potenzial, in einer Kaskadennutzung einer stofflichen und energetischen Wertschöpfung zugeführt zu werden.

Aufgrund der geschilderten aktuellen Situation lassen sich folgende übergeordnete Themenfelder mit Handlungsbedarf ableiten:

- 1) Steigerung der technischen Resilienz entlang der Lebensmittel-Wertschöpfungskette
- 2) Globale Ernährungssicherung
- 3) Zentrale Fokussierung auf nachhaltige und gesunde Ernährung für das Wohlbefinden und die individuelle Gesundheit der Menschen
- 4) Reduktion vermeidbarer Lebensmittelabfälle sowie Nutzung von unvermeidbaren Lebensmittelabfällen und -nebenströmen

#### **4.1.1 Resilienz der Lebensmittel-Wertschöpfungsketten**

##### **Steigerung der Resilienz der Lieferketten**

Die Ernährungswirtschaft zeichnet sich durch stark vernetzte Wertschöpfungsketten mit sowohl lokalem als auch globalem Charakter aus. Nicht zuletzt zeigte die COVID-19-Pandemie, dass die Resilienz gegen Störungen aller Art einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil bietet. Resiliente Wertschöpfungsketten in der Ernährungswirtschaft sind nicht nur dadurch gekennzeichnet, dass auch bei Störungen in Produktion und Verarbeitung die Lieferketten aufrechterhalten werden können, sondern vor allem auch dadurch, dass die Sicherheit der Verbraucherinnen und Verbraucher immer gewährleistet ist. Zur Bewertung der Resilienz in der Ernährungswirtschaft müssen daher komplexe Einflüsse auf die Lieferkette, aber vor allem auch auf die Produktion, mitgedacht werden.

Eine Steigerung der Resilienz kann durch die Planung von Strategien und Gegenmaßnahmen erreicht werden, die dem gesamten System eine rasche Rückkehr in den Ursprungs- oder Sollzustand ermöglichen. Die Resilienz bezeichnet also die Stabilität, gegen innere und äußere Einflüsse und Störungen zu bestehen. Durch Ausschluss äußerer Einflüsse, wie z. B. beim Indoor Farming, können externe Störungen größtenteils eliminiert, Restrisiken zielgerichtet gesenkt und so die Resilienz des Systems deutlich verbessert werden. Hier gilt es u. a., mögliche Aufwände (z. B. Energieverbrauch bei der Indoor-Kultivierung) gegenüber anderen verbrauchenden Prozessen (z. B. Mehraufwand bei Verpackung und Transport) gegeneinander abzuwägen, und die höhere Qualität bei regionaler Bereitstellung aus solchen Anbausystemen ebenfalls zu berücksichtigen. So können neuartige Anbaustrategien in regionalen oder urbanen Konzepten den Bedarf an Lagerstätten in Vertrieb, Handel und Logistikketten ebenso wie bei Verbraucherinnen und Verbrauchern in relevantem Umfang senken. Gekoppelt mit nachhaltigen, regionalen Energieversorgungskonzepten dienen diese Strategien zugleich der Stärkung der Resilienz und Souveränität in der Energieversorgung.

Um die Resilienz eines komplexen technischen Systems, z. B. einer Anlage zur Lebensmittelverarbeitung, zu steigern, ist die Anlage in ihre technischen Subsysteme zu unterteilen, beispielsweise Energieversorgung, Betriebsstoffversorgung, Steuerungstechnik,

Fördersystem, Zulieferung und Versorgungssysteme für Roh- und Betriebsstoffe etc. Für die einzelnen Subsysteme müssen dann mögliche Störszenarien identifiziert und geeignete Gegenmaßnahmen entwickelt werden. Je nach Gestaltung der Gegenmaßnahmen lässt sich die technische Resilienz des Systems qualitativ bewerten.

In Produktionsumgebungen der Lebensmittelindustrie lassen sich die Möglichkeiten der Digitalisierung umfassend nutzen, um die Resilienz deutlich zu verbessern. Dafür sind die folgenden konkreten Maßnahmen umzusetzen:

- Identifizierung und Nutzung von Produktionsdaten in Form eines Digitalen Zwillings
- Digitalisierung der Prozesse
- Identifizierung potenzieller Störfälle von Produktionsanlagen und Gesamtsystemen (Lieferketten)
- Risikoabschätzung
- Definition von Gegenmaßnahmen
- Automatisierung der Anlagensteuerung mithilfe geeigneter Sensorik und Aktorik

### **Regionale Verarbeitung (adaptive, modulare Verarbeitungssysteme)**

In der Lebensmittel-Wertschöpfungskette sind Primär- und Sekundärproduktion weitgehend voneinander entkoppelt. Das bedeutet, dass Zutatenhersteller Rohstoffe in großen Mengen auf dem Weltmarkt einkaufen und diese in hochoptimierten und spezialisierten Anlagen zu einer kleinen Anzahl von Produkten verarbeiten. Die hauptsächliche Verarbeitung und Wertschöpfung erfolgt somit nicht oder nur zu einem kleinen Teil beim Primärproduzenten. Dies zeigt sich beispielsweise aktuell im Bereich der Pflanzenölproduktion: Sowohl die Rohstoffe (Ölsaaten) als auch die Produkte (Futtermittel und Pflanzenöl) werden weltweit gehandelt und verschifft. Eine direkte Verbindung zwischen den Landwirtinnen und Landwirten als Rohstoffproduzierenden und/oder Nutzerinnen und Nutzern des Futtermittels sowie der Ölmühle als Verarbeiter besteht in der Regel nicht.

Im Sinne einer stärkeren regionalen Wertschöpfung sowie einer Steigerung der technologischen Resilienz bedarf es neuer Verarbeitungskonzepte und Maschinen, welche die Variabilität der biologischen Systeme und ihrer Produkte berücksichtigen oder kompensieren können. Dies erfordert modulare und adaptive Maschinenkonzepte, die in der Lage sind, unterschiedliche Rohstoffe dezentral und Rohstoff-tolerant zu verarbeiten.

Vor dem Hintergrund der Lebensmittelsicherheit werden hierzu nicht nur die Bereitstellung geeigneter Aggregate, sondern auch entsprechende Sensorsysteme, welche die Herstellung hochwertiger und sicherer Lebensmittel gewährleisten, benötigt.

#### **4.1.2 Globale Ernährungssicherung**

##### **Alternative Anbausysteme**

Für die Produktion von Lebensmitteln, Lebensmittelzutaten und Nahrungsergänzungsmitteln sind neben der klassischen Agrikultur alternative Anbaumethoden in geschlossenen Systemen (Indoor Farming) entwickelt worden, die einen Beitrag zur globalen Ernährungssicherung leisten können: Vertical Farming für Pflanzen, Kultivierung von Insekten, Bioreaktoren für Pilze, Single Cell Protein und Cultured Meat sowie Photobioreaktoren für Mikroalgen.

Dabei ergeben sich viele Vorteile: Zum einen kann die Produktion das ganze Jahr und unabhängig von klimatischen Bedingungen weltweit erfolgen. Dies ermöglicht eine effiziente und resiliente Lebensmittelproduktion bei gleichbleibender Qualität sogar in ariden, marginalen oder urbanen Gebieten. Zum anderen erlauben die geschlossenen Systeme einen kontrollierten und sicheren Prozess – so werden beim Vertical Farming beispielsweise für Salat und Kräuter aber auch für Proteinpflanzen wie Getreide und Luzerne im Vergleich zum konventionellen Anbau nur 5 Prozent des Wassers, 50 Prozent des Düngers und keine Pestizide benötigt [20]. Zudem weisen die Produktionssysteme durch ihren vertikalen Aufbau und die Möglichkeit zur ganzjährigen Produktion eine bis zu 100-fach höhere Produktivität pro genutzter Fläche auf, als die konventionelle horizontale Landwirtschaft.

Trotz vielfältiger ökologischer Vorteile des Vertical Farming liegen die Kosten der damit erzeugten Produkte rund dreimal so hoch wie die aus klassischem Anbau. Dies ist vor allem auf die hohen Energiekosten für die Beleuchtung und Klimatisierung der geschlossenen Systeme zurückzuführen. Ein möglicher Lösungsansatz zur Reduktion der Energiekosten ist der Einsatz von hybriden Beleuchtungssystemen, also der kombinierten Nutzung von Sonnen- und Kunstlicht. Die Nutzung und Einkopplung von spektral-moduliertem Licht in Vertical Farming-Anlagen zur Senkung des Energieverbrauchs kann hier eine deutliche Kostensenkung und somit eine Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit dieser Anlagen ermöglichen.

### **Alternative Proteinquellen**

Für die Gewinnung von 1 kg tierischem Protein in klassischer Tiernutzung (Eier, Milch, Fleisch) müssen im Mittel 5 kg Proteine aus pflanzlichen Rohstoffen bereitgestellt werden [38], wodurch der Verzehr tierischer Lebensmittel mit einem sehr hohen Verbrauch an Wasser, Energie und Agrarflächen einhergeht und darüber hinaus für einen erheblichen Teil der anthropogenen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist [39].

Pflanzliche Proteine stellen die mengenmäßig wichtigste alternative Proteinquelle dar. Allerdings ist die Nutzung des aktuell am meisten genutzten Pflanzenproteins, Soja, aus Nachhaltigkeitsgründen in Frage zu stellen, sofern keine regionale Produktion unter Schutz wichtiger Ökosysteme beispielsweise auch in Europa realisiert wird. Darüber hinaus schränkt die hohe Allergenität von Soja (ebenso wie die von Weizenprotein) die Nutzung erheblich ein. Somit ist die Bereitstellung neuer Proteinzutaten idealerweise auf Basis einheimischer Agrarrohstoffe wie beispielsweise Ölsaaten und Leguminosen zu empfehlen. Dies erfordert die Entwicklung angepasster Prozesse zur Produktion sensorisch attraktiver Proteinkonzentrate und -isolate mit hoher Funktionalität.

Im Vergleich zu konventionellen tierischen Proteinquellen weisen Insekten eine vergleichsweise hohe Futtermittelnutzungseffizienz auf [40]. Darüber hinaus bietet sich beim sogenannten Insect Farming das Potenzial, biogene Reststoffe als Futtermittel zu nutzen [41]. Somit gilt das Insect Farming als nachhaltiges Produktionssystem für proteinreiche Lebensmittelzutaten und Futtermittel [42].

Beim Insect Farming liegt die Herausforderung in der Vermeidung von Kontaminationen mit Insekten- und Lebensmittelpathogenen (z. B. Listeria- oder Salmonella-Bakterien), um auf den Einsatz von Antibiotika und Pestiziden verzichten zu können. Bislang existieren keine geeigneten Überwachungssysteme, mit denen »Insektenfabriken« vor dem Ausbruch von Infektionskrankheiten geschützt werden können. Zudem besteht ein Bedarf, die Verarbeitung und Zubereitung von Lebensmitteln aus Insekten an die Bedürfnisse der Verbraucherinnen und Verbraucher sowie der Lebensmittelindustrie anzupassen [43].

Wie bei den Insekten besteht auch bei filamentösen Pilzen und Mikroalgen die Möglichkeit einer Kaskadennutzung durch Verwendung von Reststoffen als Substrat für die Kultivierung. Eine weitere Herausforderung ist es, die aus diesen Rohstoffen gewonnenen Proteine in eine schmackhafte Form zu überführen und als Zutat zu vermarkten. Um Mikroalgen als wettbewerbsfähige Proteinquelle zu etablieren, sind vor allem technische Fortschritte bei den Photobioreaktoren in Bezug auf Lichtausbeute bei Einsatz von künstlicher Beleuchtung und KI-basierter Steuerung und Automatisierung dieser Systeme sowie die Verarbeitung der Proteine zu hochwertigen Lebensmitteln erforderlich.

Neben den prozessorientierten Maßnahmen wird ein Schlüssel zu mehr Resilienz darin liegen, Fortschritte in der Anpassung der Organismen (wissensbasierte Züchtung von Pflanzen, Mikroalgen, Insekten) auf sich ändernde Umweltbedingungen zu erzielen. Hier ist prospektive und präventive Entwicklungskompetenz gefordert, die auch die Kultivierung und Züchtung von Organismen unter fordernden oder gar extremen Bedingungen berücksichtigt und die resultierenden Bedarfe der Zukunft antizipiert. Prozessoptimierung zur Aufarbeitung von Lebens-, Futtermitteln und Rohstoffen fängt im verwendeten Organismus an. Ein Beispiel ist hier die Stärkekartoffel, die durch wissensbasierte Mutagenese-Verfahren (TILLING) so adaptiert wurde, dass umweltschädliche chemische Prozesse zur Aufarbeitung der Stärke für die Industrie unnötig wurden. Auch Anpassungen an das Wachstum in einer Vertical Farm oder Photobioreaktoren werden zu einer nachhaltigeren Versorgung führen.

### **Verfahrensentwicklung für alternative Proteinquellen zur Akzeptanzsteigerung bei Verbraucherinnen und Verbrauchern**

Neben einer Optimierung und Verbesserung der Kosteneffizienz in der Produktion alternativer Proteine stellt die Nutzung der Proteine in Lebensmitteln eine wesentliche Herausforderung dar. So weisen beispielsweise viele pflanzliche Proteine einen Eigengeschmack und eine Färbung auf, die von Verbraucherinnen und Verbrauchern häufig als ungewohnt oder unangenehm empfunden werden. Zudem ist das ernährungsphysiologische Profil, insbesondere der Anteil an essenziellen Aminosäuren, sowie die anwendungsrelevanten (techno-funktionellen) Eigenschaften vieler alternativer Proteinquellen unzureichend. Für die Verbesserung des sensorischen Profils sind weitere Anpassungen in den Herstellungsprozessen, z. B. zur Abtrennung von Fehlgerüchen und farbgebenden Komponenten, erforderlich. Darüber hinaus sollte die Nutzung von Kombinationen verschiedener Proteine und Zutaten verstärkt untersucht werden, um synergistische Effekte bei den funktionellen Eigenschaften zu nutzen und das ernährungsphysiologische Profil zu optimieren.

### **Vereinfachung von Zulassungsprozessen im Bereich Novel Food**

Eine weitere Hemmschwelle bezüglich der Nutzung neuer Zutaten in Lebensmitteln stellen regulatorische Vorgaben dar. So ist für die Verwendung von Zutaten, z. B. auf Basis von Pilzmyzel, den meisten Insektenarten und vielen Pflanzen wie beispielsweise Raps, eine »Novel Food«-Zulassung durch die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) erforderlich. Diese ist sehr zeit- und kostenintensiv. Darüber hinaus werden in der Regel umfangreiche Studien zur toxikologischen Unbedenklichkeit gefordert. Die hierfür erforderlichen Tierversuche werden inzwischen von einer zunehmenden Zahl von Unternehmen jedoch abgelehnt. Dies stellt zunehmend ein Innovationshindernis dar und führt dazu, dass Lebensmittel und Lebensmittelzutaten, obwohl für die Industrie und die Konsumentinnen und Konsumenten relevant, nicht in den Verkehr gelangen. Somit sind Vereinfachungen im Zulassungsprozess, ohne die Verbrauchersicherheit zu gefährden, empfehlenswert.

### 4.1.3 Nachhaltige und gesunde Ernährung

#### **Gesundheitsförderung und Vermeidung ernährungsbedingter Krankheiten**

Die Ernährungsgewohnheiten der deutschen Bürgerinnen und Bürger entsprechen nicht den Empfehlungen der DGE e. V. So werden im Schnitt zu viel Salz, Zucker, gesättigte Fette und tierische Produkte und zu wenig pflanzliche Lebensmittel, insbesondere Leguminosen, konsumiert. Umgekehrt ist eine rein pflanzliche Ernährungsweise ebenfalls nur bedingt empfehlenswert, da die Zusammensetzung (z. B. das Aminosäurespektrum) nur teilweise den menschlichen Anforderungen entspricht und bestimmte antinutritive Inhaltsstoffe die Aufnahme wertvoller Nährstoffe im Körper sogar erschweren.

Hier können Züchtung, biotechnologische Ansätze sowie eine gezielte Optimierung der Kultivierungsbedingungen schon in der Primärproduktion eine Verbesserung des sensorischen und ernährungsphysiologischen Profils der Agrarprodukte herbeiführen. Durch diese Maßnahmen werden die Anteile an wertvollen Inhaltsstoffen wie Proteinen, Vitaminen und Ballaststoffen sowie deren Wertigkeit verbessert und der Anteil an sensorisch unattraktiven sowie antinutritiven Inhaltsstoffen reduziert.

Ein weiterer Baustein hinsichtlich der Bereitstellung von gesunden Lebensmitteln mit hoher Verbraucherakzeptanz ist die Entwicklung von neuen, sensorisch ansprechenden Produkten. Um hierbei die Defizite einzelner Rohstoffe hinsichtlich des sensorischen Profils, der ernährungsphysiologischen Wertigkeit sowie der Funktionalität auszugleichen, werden zunehmend Mischungen verschiedener Inhaltsstoffe (z. B. Proteine, Ballaststoffe etc.) eine wesentliche Rolle spielen. Dies umfasst sowohl die Mischung verschiedener pflanzlicher Rohstoffe als auch Mischungen aus pflanzlichen Rohstoffen mit Algen, Pilzen und tierischen Quellen, insbesondere Insekten. Allerdings ist v. a. im Bereich der Nutzung von Insekten als Lebensmittel die Verbraucherakzeptanz durch gezielte Information noch zu verbessern.

Bei der Entwicklung von gesundheitsfördernden Lebensmitteln mit optimierten sensorischen Eigenschaften ist zu beachten, dass die Anforderungen an beide Eigenschaften stark von den Konsumentinnen und Konsumenten abhängig sind. Sowohl die sensorische Wahrnehmung als auch die Bedürfnisse an das ernährungsphysiologische Profil sind abhängig von Alter, Gesundheitszustand und Lebensweise (z. B. Stress, Sport etc.), und unterliegen zudem kulturellen und regionalen Einflüssen. Diese unterschiedlichen Anforderungen sind bei der Entwicklung der neuen Lebensmittel und Lebensmittelzutaten zu berücksichtigen, um bedarfsgerechte Produkte bereitstellen zu können.

In Frankreich werden im Rahmen der Studie »NutriNet-Santé« regelmäßig die Ernährungsprofile von 300 000 Personen und die metabolischen Daten von 20 000 Konsumentinnen und Konsumenten erfasst [44]. Diese in einer derartig großen Kohorte erhobenen Daten können die Grundlage für die Entwicklung digitaler, KI-unterstützter Tools zur evidenzbasierten Ernährungsberatung sowie zur Bereitstellung individualisierter Lebensmittel bilden. Allerdings sind die Ergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Ernährungsgewohnheiten, z. B. des deutlich höheren Anteils an Fertiggerichten in der deutschen Ernährung, nur bedingt übertragbar [45].

Die Durchführung einer mit »NutriNet-Santé« vergleichbaren Studie zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Ernährungsweise und ernährungsbedingten Krankheiten in den verschiedenen Lebenssituationen deutscher Konsumentinnen und Konsumenten wäre zu empfehlen. Darauf aufbauend könnten digitale Werkzeuge und neue Lebens-

mittel entwickelt werden, um eine auf die Bedürfnisse der Konsumentinnen und Konsumenten abgestimmte Ernährung anbieten zu können.

#### 4.1.4

#### **Reduktion vermeidbarer Lebensmittelabfälle sowie Nutzung von unvermeidbaren Lebensmittelabfällen und -nebenströmen**

In der Lebensmittelproduktion fallen große Mengen an sogenannten unvermeidbaren, also nicht verzehrbaren, Nebenströmen an (z. B. Schalen, Stängel, Karkassen etc.) Eine stoffliche oder/und energetische Nutzung dieser Rest- und Nebenströme, idealerweise in einer Kaskade, bietet erhebliches Potenzial der Steigerung der Wertschöpfung und der Ressourceneffizienz.

Insbesondere pflanzliche Reststoffe enthalten funktionelle Inhaltsstoffe, wie beispielsweise Phenole, Alkaloide, Tannine etc. Diese verfügen über ein hohes Anwendungspotenzial als Basischemikalien, Kosmetika, Nahrungsergänzungsmittel und Lebensmittelzutaten. Hierfür werden jedoch geeignete Konzepte benötigt, um die Reststoffe und Nebenströme in geeigneter Qualität zur Verfügung zu stellen. Ebenso müssen integrierte Prozesse entwickelt werden, um einerseits die Gewinnung der funktionellen Inhaltsstoffe als auch die Nutzung der verbleibenden, in der Regel faserreichen Matrix in stofflichen (z. B. in Naturfaser-Kunststoff-Compounds) oder energetischen Anwendungen zu ermöglichen.

Neben den erwähnten unvermeidbaren Abfällen stellen prinzipiell verzehrbare Produkte einen wesentlichen Teil der Lebensmittelabfälle dar. Dies sind beispielsweise pflanzliche und tierische Rohstoffe, die aufgrund von Form, Farbe oder Größe nicht verkauft oder verarbeitet werden. Da diese jedoch grundsätzlich essbar sind, bietet sich eine Nutzung in der Herstellung von Lebensmittelprodukten an, bei denen die angewandten Ausschlusskriterien keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen (z. B. Pürees, Smoothies, getrocknete Frucht- und Gemüsesnacks etc.). Da sowohl die anfallenden Rohstoffe (Art der Früchte und Gemüse) als auch die Mengen saisonal stark schwanken, werden für die Verarbeitung dieser Nebenströme hochflexible Aggregate benötigt. Diese sollten idealerweise direkt am Entstehungsort (Logistikzentren, Verarbeitungsbetriebe) eingesetzt werden und in der Lage sein, sowohl verschiedene Rohstoffe als auch unterschiedliche Mengen zu sicheren Lebensmitteln zu verarbeiten. Hier bieten sich, mit entsprechenden Sensoren zur Qualitätssicherung ausgestattete, modulare und adaptive Maschinen an, die im Bedarfsfall (z. B. bei Kampagnenbetrieb) mit wenig Aufwand zu einem anderen Standort transportiert werden können. Derartige Verarbeitungsmaschinen sind aktuell jedoch noch nicht verfügbar.

Lebensmittelabfälle entstehen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, wobei die größte Menge an vermeidbaren Abfällen auf Einzelhandels- und Konsumentenebene anfällt [46]. Während bei Produktion und Distribution durch Optimierung der Prozesse und Logistikkonzepte eine Reduktion dieser Abfallströme erreicht werden kann, sind rein technische Lösungen auf Konsumentenebene nur bedingt umsetzbar. Hier ist eine Kombination von Maßnahmen erforderlich. Dies umfasst zum einen eine verstärkte Aufklärung der Verbraucherinnen und Verbraucher bezüglich der Vermeidung von Lebensmittelabfällen ebenso wie die Schaffung von regulatorischen Rahmenbedingungen, beispielsweise zur Einführung eines dynamischen Mindesthaltbarkeitsdatums (MHD) oder zum Einsatz antimikrobieller Beschichtungen bei Verpackungen. Aus technischer Sicht sind vor allem Maßnahmen zur Verlängerung sowie dem Monitoring der Haltbarkeit notwendig. Dies betrifft somit in erster Linie Entwicklungen im Verpackungsbereich.

Aktuell wird bei der Verpackung von Lebensmitteln ein statisches Mindesthaltbarkeitsdatum angegeben, welches einen hohen Sicherheitsfaktor enthält. Dies bedeutet, dass

das Lebensmittel in der Regel deutlich länger haltbar ist als im MHD angegeben. Da den Verbraucherinnen und Verbrauchern die tatsächliche Haltbarkeit nicht bekannt ist, führt dies dazu, dass große Mengen von nach wie vor essbaren Produkten weggeworfen werden. Abhilfe können hier kostengünstige Sensoren und Indikatoren schaffen, die wesentliche Faktoren der Lebensmittelqualität überwachen, wie z. B. die Einhaltung der Kühlkette oder die Bildung von Verderbsprodukten. Diese können den Verbraucherinnen und Verbrauchern dann unmittelbar über ein dynamisches MHD (Farbskala auf der Verpackung oder eine mobile App) über die Verzehrbarkeit eines verpackten Produkts informieren.

Insbesondere bei der Verpackung sensibler Lebensmittel werden Verbundmaterialien aktuell eingesetzt, um die Eigenschaften der Materialien zu kombinieren. Dies gewährleistet zwar eine maximale Haltbarkeit des Packguts, verhindert aber andererseits das werkstoffliche Recycling der Verpackung. Eine mögliche Lösung stellt die Funktionalisierung eines (bio)-kunststoff- oder papierbasierten Substrats mit (biobasierten) Beschichtungen dar. Diese Beschichtungen beeinträchtigen aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Schichtdicke die Recyclingfähigkeit der Verpackung nicht oder nur in geringem Maße, müssen aber andererseits Funktionalitäten wie Barrieren gegenüber Wasserdampf oder Sauerstoff, antimikrobielle Wirkung etc. bereitstellen, um das Lebensmittel optimal zu schützen und somit eine lange bzw. optimale Haltbarkeit zu gewährleisten. Derartige, insbesondere biobasierte Beschichtungen sowie darauf aufbauende Verpackungssysteme sind aktuell nur in Ansätzen verfügbar.

Generell sind, neben den Verpackungssystemen und -strategien, gerade auch die Strategien und bestehenden Technologien und Konzepte zur Bevorratung (substanziell in einer nachhaltigen und kreislauffähigen Bioökonomie) zu überdenken. Diese sind einerseits wesentliche Faktoren und Treiber zur Sicherung der Versorgung, für Resilienz und Souveränität in regionalen Versorgungsketten. Zugleich sind sie Garant dafür, dass es im Falle von Krisenszenarien größeren Ausmaßes nicht zu spontaner Disruption und Ausbeutung von Ökosystemen, unverhältnismäßigen Ressourcenaufwänden und Emissionen durch Verlegung von Transportwegen oder der Einschränkung der Lebensmittelversorgung als kriegerisches oder kriminelles Element kommen kann. Hier ist höchster Wert auf die Diversifizierung von Bevorratungsstrategien und -konzepten unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Lebensmittelqualität, des ernährungsphysiologischen und sensorischen Werts der Produkte zu legen. Gleichfalls ist das Bevorratungsmanagement derart zu organisieren, das die Lagerbestände aktuell und an Bedarfen ausgerichtet werden. Die entsprechenden Foresight-Prozesse und Szenarienbetrachtungen müssen fortlaufend auf aktuellem Stand gehalten werden und aktuelle ökologische, ökonomische, soziale und politische Entwicklung berücksichtigen.

## 4.2

### Stoffliche Nutzung von Biomasse und CO<sub>2</sub> – Bioökonomie als Basis für Hightech

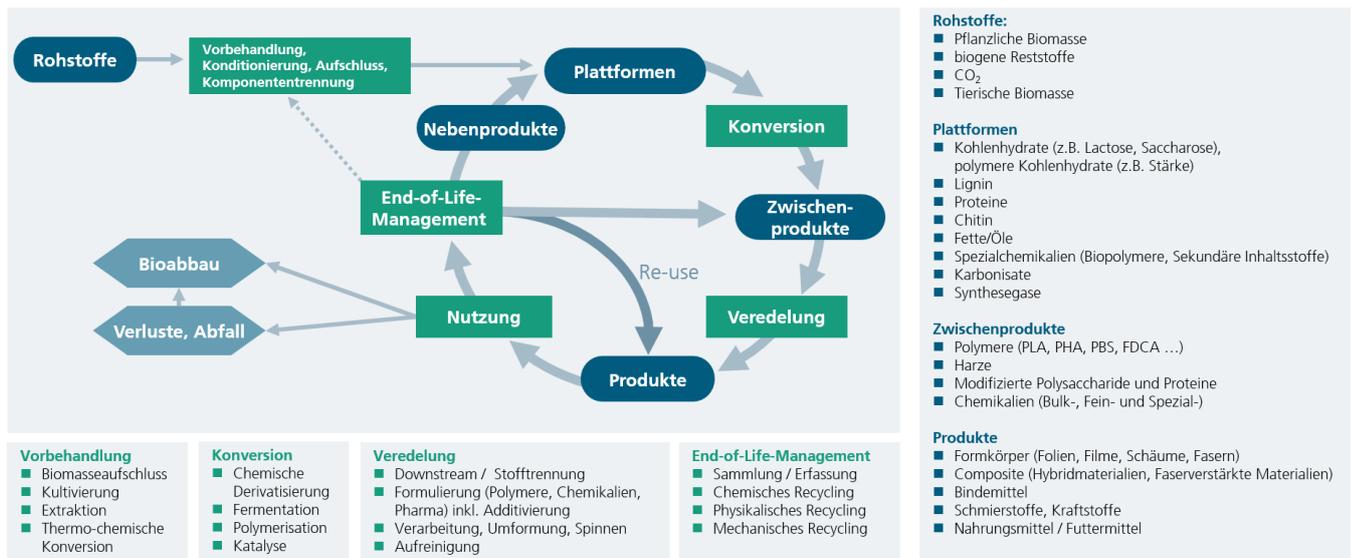
#### **Von der linearen Wertschöpfungskette zum Wertschöpfungskreislauf**

Die zirkuläre Bioökonomie (Kap. 2) basiert auf der Herstellung, Nutzung und dem End-of-Life-Management (Reuse, Recycling) von kohlenstoffhaltigen Produkten und ist damit eng mit dem globalen Kohlenstoffkreislauf verbunden. Verluste im Kreislauf entstehen durch Materialverluste während der Herstellungs- und Nutzungsphase sowie durch biogenen Abbau. Eines der wohl ältesten und bekanntesten Beispiele für einen Wertschöpfungskreislauf ist die Papierherstellung. Dabei wird, ausgehend vom nachwachsenden Rohstoff Holz, Cellulose gewonnen, die als Hauptbestandteil bei der Papierherstellung dient. Nach der Nutzung des Papiers wird dieses heute recycelt und die

Altpapierfasern werden erneut in der Papierherstellung eingesetzt, womit sich der Kreislauf schließt.

Die Bioökonomie kann zusätzlich einen Vorteil bieten, wenn komplexe Moleküle oder Strukturen über kürzere (z. B. biotechnologische) Konversionsrouten im Vergleich zu konventionellen (chemischen) Prozessen hergestellt werden. Dazu sollten, wenn möglich, Reststoffe verwendet werden. Zudem bieten bioökonomische Prozesse die Möglichkeit, CO<sub>2</sub> in einen Wertschöpfungskreislauf einzubinden und neben der direkten CO<sub>2</sub>-Nutzung eine indirekte CO<sub>2</sub>-Nutzung zu ermöglichen.

Wesentliche Elemente der zirkulären Bioökonomie sowie einige Beispiele für die jeweiligen Prozessstufen, Rohstoffe und Produkte zeigt Abb. 3.



**Abb. 3** Der Wertschöpfungskreislauf der Bioökonomie mit Beispielen für die jeweiligen Prozessstufen (grün), Rohstoffe und Produkte (blau)

Die Herausforderungen und Entwicklungsbedarfe einer zirkulären Bioökonomie werden nachfolgend anhand von beispielhaften Wertschöpfungszyklen verdeutlicht. Dazu zählen neben anderen:

- 1) Biobasierte Kunststoffe
- 2) Biowerkstoffe als Baumaterialien
- 3) CO<sub>2</sub> als Rohstoff
- 4) Chemierohstoffe und Kraftstoffe durch thermochemische Verfahren

#### 4.2.1 Biobasierte Kunststoffe

##### Produktionsprozess

Die Herstellung von Kunststoffen aus Biomasse, deren Verwendung und Rezyklierung stellt einen Wertschöpfungskreislauf der Bioökonomie dar, der sich für thermoplastische biobasierte Kunststoffe wie folgt konkret abbildet: Aus Rohstoffen werden verschiedene Plattformchemikalien als monomere Bausteine gewonnen, aus denen dann die biobasierten Polymere (Kunststoffe) synthetisiert werden. In einem Zwischenschritt (Compoundierung) können die Kunststoffe für bestimmte Einsatzzwecke modifiziert oder direkt eingesetzt werden. Der Kreis schließt sich durch die Wiederverwendung haltbarer Bauteile oder ein entsprechendes Recycling. Für alle Verarbeitungsschritte

innerhalb des Wertschöpfungskreislaufs gibt es qualifizierte Systeme, die sich bereits am Markt etabliert haben. Daneben existieren aber eine Reihe von Entwicklungen mit unterschiedlichen Technologiereifegraden (TRL), auf die im Folgenden ebenfalls eingegangen werden soll.

## Stand der Technologie

Bei der Suche nach nachhaltigen Rohstoffquellen liegen die Hauptaugenmerke derzeit vor allem auf in größeren Mengen vorhandenen cellulose- und lignocellulosehaltigen Rest- und Wertstoffen. Beispielsweise auf dem nachwachsenden Rohstoff Holz, inklusive aller seiner Bestandteile, sowie ähnlicher Lignin-haltiger Biomasse aus Nebenströmen der Landwirtschaft, wie z. B. Weizenstroh [47]. Hier gilt es allerdings, die Bodengesundheit durch die Entzüge des Pflanzenanbaus im Blick zu behalten. Humusbildende Maßnahmen müssen im Ausgleich geschaffen werden und sorgen für weiterhin fruchtbare und wasserspeichernde Böden mit guten Erträgen. Auch cellulosehaltige Reststoffe aus der papierherstellenden Industrie kommen in Frage. Die Erweiterung der Rohstoffbasis für Kunststoffe auf CO<sub>2</sub> als Primärbaustein ist ein weiteres Ziel, wobei die Technologie noch am Anfang der Entwicklung steht (TRL von 2 bis 4). Für die Aufspaltung der Lignocellulose, einem Bestandteil der Zellwand verholzter Pflanzen (Holz, Stroh, etc.), existieren verschiedene Technologien, welche jedoch je nach Art der Biomasse individuell angepasst werden müssen. Neben den lang etablierten Aufschlussverfahren der Zellstoffwerke wurden insbesondere im Rahmen von Bioraffinerieansätzen neue Verfahren wie »Steam-Explosion« (Dampfdruckaufschluss) oder »Organosolv« (Solubilisierung mit Hilfe von organischen Lösemitteln) entwickelt oder wiederentdeckt [48].

Die Fraktionierung von Lignocellulose in die Hauptbestandteile Cellulose (C6-Zucker), Hemicellulose (C5-Zucker) und Lignin (aromatische Verbindungen) stellt dabei eine wesentliche Voraussetzung für eine vollständige und hochwertige stoffliche Nutzung als nachwachsenden Chemierohstoff dar. Durch enzymatische Hydrolyse wird beispielsweise aus der Cellulose Glukose gewonnen. Diese kann als Substrat für vielfältige Fermentationen genutzt werden und so derzeit vor allem eingesetzte höherwertige Rohstoffquellen wie Zuckerrohr oder Stärke ersetzen [49]. Während der Fermentation verstoffwechseln Mikroorganismen, wie Bakterien oder Pilze, diese Kohlenstoffverbindungen und wandeln sie einerseits in Biomasse um, aber auch in eine Vielzahl von Chemikalien, wie z. B. Ethanol (Weiterverarbeitung zu Ethen), Bernsteinsäure, Butandiol oder auch Milchsäure, welche dann weiter zu Polymeren wie Bio-Polyethylen (Bio-PE), Polybutylensuccinat (PBS) oder Polymilchsäure (PLA) verarbeitet werden können [50]. Verschiedene Polymere wie Polyhydroxybuttersäure (PHB) lassen sich auch direkt fermentativ aus Zucker gewinnen. Für Milchsäure sind die Prozesse bereits so weit entwickelt, dass PLA zu wirtschaftlich wettbewerbsfähigen Bedingungen rein biobasiert produziert werden kann. Rund 300 000 Tonnen werden auf diese Weise jährlich fermentativ hergestellt [51].

Das chemisch oder biotechnologisch hergestellte Polymer kann im weiteren Verlauf des Wertschöpfungszyklus mit anderen Polymeren oder Additiven wie u. a. Stabilisatoren, Verarbeitungshilfen oder sogar Flammenschutzmitteln, aber auch mit Fasern wie Naturfasern oder biobasierten Carbonfasern verbunden werden, um unterschiedlichste Materialeigenschaften für die späteren Kunststoffbauteile zu erhalten. In der Kunststoffindustrie können aktuell in erster Linie zwei Biokunststofftypen identifiziert werden, die mit dem entsprechenden Potenzial ausgestattet sind, in größerem Umfang und in breit angelegten Anwendungsfeldern klassische erdölbasierte Kunststoffe zu ersetzen: PBS und PLA. Beide Materialien unterliegen derzeit noch umfangreichen Weiterentwicklungen, welche die Zielsetzung haben, die Kunststoffe durch Verbesserung des zur Verfügung stehenden Eigenschaftsprofils und Erhöhung der Typenvielfalt mehr Einsatzfel-

dern zugänglich zu machen, was bis auf das Niveau von technischen Kunststoffen reicht. Aktuell wurden beispielsweise Wasserfilter (PBS), Kaffeekapseln (PLA), Lagerbehälter (PBS) oder Elektronikbauteile bis an die Marktreife herangeführt. In anderen Feldern (Blasformen, Thermoformen u. a.) sind die Entwicklungsarbeiten weit fortgeschritten. Im Bereich der Verpackungsmaterialien wurden beispielsweise durch eine Anpassung der Molekülstruktur weiche Materialien auf Basis von PLA entwickelt [52]. Dank entsprechender Rezepturenentwicklung können PBS- und PLA-Materialien heute bereits für beständige spritzgegossene Bauteile eingesetzt werden, welche schlagzäh, temperaturbeständig und flammgeschützt sind [53]. Grundsätzlich können alle bekannten Verarbeitungstechnologien, wie sie für klassische, fossilbasierte Kunststoffe eingesetzt werden, auch für die Verarbeitung der Biokunststoffe genutzt werden. Das Potenzial der Biokunststoffe ist hoch. Viele Anwendungen sind heute bereits möglich und spezifische Anpassungen an zusätzliche und höherwertige Anwendungen zeigen vielversprechende Ergebnisse.

Nach der Nutzung des Bauteils kann das Material durch einen Recyclingschritt wieder in den Wertschöpfungskreislauf überführt werden. Hierfür kommen je nach biobasiertem Kunststoff verschiedene Wege in Frage: Im Fall des werkstofflichen Recyclings wird das Polymer direkt wiedergewonnen, beim chemischen Recycling wird es zunächst in kleine Bausteine gespalten, die dann erneut für eine Polymerisation genutzt werden können, womit sich der Kreislauf schließt [54]. Viele biobasierte Kunststoffe sind zudem bioabbaubar und bieten daher den Vorteil, dass Kreislaufverluste über den Umweg des biologischen Abbaus wieder zurück in den Kohlenstoffkreislauf übergehen, ohne dass sie zu einer »Vermüllung« der Biosphäre beitragen. Der direkt und bewusst gesteuerte Weg des Bioabbaus ist allerdings nur für wenige Anwendungen relevant (z. B. verschiedene Produkte in der Landwirtschaft oder »flüssiges« Plastik beispielsweise in Kosmetika), und sollte auch nur dort eingesetzt werden, wo kein Recycling möglich ist [55].

### **Fragen und Herausforderungen, die einer Lösung bedürfen**

Die globale Kunststoffproduktion betrug 2020 ca. 367 Mio. Tonnen, wobei hierin die Fasern aus Polyethylenterephthalat (PET), Polyamid (PA) und Polyacrylnitril (PAN) nicht mit eingerechnet sind [56]. Für die Kunststoffproduktion werden ca. 6 Prozent des globalen Bedarfs an Rohöl verbraucht [57]. Dabei finden teilweise bedenkliche, toxische Substanzen Anwendung, die in einigen Fällen auch in der Gebrauchsphase des Kunststoffs freigesetzt werden (Bisphenol-A (BPA), Isocyanate, etc.). Schätzungen zufolge wurden bis zum Jahr 2017 etwa 8300 Mio. Tonnen erdölbasierte Kunststoffe produziert, von denen ungefähr 5000 Mio. Tonnen als Abfall auf Deponien oder in der Umwelt endeten [58].

Biobasierte und bioabbaubare Kunststoffe machen dagegen derzeit nur einen sehr geringen Anteil an der weltweiten Kunststoffproduktion aus (Abb. 4). Je nach dem Umfang der Materialien, die betrachtet werden, reichen die Schätzungen von ca. 2,4 Mio. Tonnen bis zu 3,8 Mio. Tonnen, was im Bereich von etwa einem Prozent liegt. Aktuelle Voraussagen gehen aber von einer starken Zunahme der Produktionskapazitäten auf 7,5 Mio. Tonnen im Jahr 2026 aus, wobei diese im Wesentlichen in Asien prognostiziert wird [59]. Wichtigste biobasierte Polymere, die für die Herstellung biobasierter Kunststoffe verwendet werden, sind PBS, PLA, Stärkeblends, biobasierte Polyamide (PA) und biobasiertes Polyethylen (PE). Aktuell ist zudem der Trend zu beobachten, dass Hersteller konventioneller Kunststoffe vorprozessierte biobasierte Rohstoffe, vor allem sogenanntes Bio-Naphtha, einkaufen. Dieses wird mit dem petrochemischen Naphtha gemeinsam verarbeitet. Ein Teil der daraus hergestellten Standardpolymere, der dem Anteil des Bio-Naphthas in den Rohmaterialien entspricht, wird nach einem Massenbilanzierungsansatz dann als biobasiert vermarktet.

Bislang wird das Nachhaltigkeitspotenzial biobasierter Kunststoffe vor allem im Bereich des Recyclings aufgrund der beschriebenen geringen Mengen im Markt nur sehr ungenügend ausgeschöpft. Zur Umsetzung vorhandener technischer Lösungen und innovative Recyclingansätze bedarf es der Anpassung politischer Vorgaben und einen erleichterten Marktzugang, um die Kreisläufe wirtschaftlich wettbewerbsfähig zu schließen und die ökologischen Vorteile der biobasierten Kunststoffe vollumfänglich auszuspielen. Für die Technologieentwicklung dieser Materialien wäre es beispielsweise hilfreich, wenn sich aus ihrem vorteilhaften Carbon Footprint auch ein preislicher Wettbewerbsvorteil ergäbe. Dies könnte durch Maßnahmen wie CO<sub>2</sub>-Bepreisung oder andere Klimaschutzabgaben erreicht werden. Auch eine notwendige Aufklärung zu den Möglichkeiten der Kreislaufführung für biobasierte, auch potenziell abbaubare Kunststoffe kann zu einer breiteren Akzeptanz und Nachfrage führen.



**Abb. 4 Weltmarktanteile Biokunststoffe nach Umsatz aus dem Jahr 2018 sowie Schätzungen für 2023 und 2030: Biobasierte Kunststoffe und petrobasierte bioabbaubare Kunststoffe [60–62]**

Wesentlich für den breiteren Einsatz von biobasierten Kunststoffen in verschiedenen Anwendungen sind aber weiterhin notwendige Innovationen innerhalb des gesamten Wertschöpfungszyklus von der Rohstoffgewinnung über die Verarbeitung zum Recycling. Nur mit diesen kann es gelingen, den ökonomischen und technischen Vorsprung der konventionellen Kunststoffe aufzuholen und Biokunststoffe im Markt zu etablieren. Die Bedarfe im Bereich der Forschung und Entwicklung zu Biokunststoffen sind daher im Folgenden kurz skizziert.

### Forschungs- und Entwicklungs-Bedarfe

Die Frage nach verbesserter Nachhaltigkeit in der Kunststoffindustrie ist mittlerweile von großer Bedeutung in nahezu allen Bereichen der Gesellschaft, wobei für den weiteren Aufbau einer biobasierten Kunststoffwirtschaft die folgenden Punkte im Fokus technischer Herausforderungen stehen:

- Biobasierte Ausgangsmaterialien (Agrarprodukte, Holz, Naturfasern, Reststoffe etc.)
- Erweiterung des werkstofflichen Eigenschaftsprofils und der Verarbeitungsprozesse
- Integration von biologischen Funktionen in Kunststoffe für Erweiterung des Anwendungsspektrums sowie der Zirkularität
- Entwicklung recyclingfähiger und zusätzlich abbaubarer Kunststoffe als Strategie gegen die »Vermüllung« und für die Vision einer umfassenden Kreislaufwirtschaft
- Neue Recyclingtechnologien

Als Rohstoffe für biobasierte Kunststoffe sollten, wo möglich, günstige Kohlenstoffquellen wie Lignocellulose oder Speicherkohlenhydrate wie Inulin, eine Polyfruktose, eingesetzt und die Forschung darauf fokussiert werden. Gleichzeitig muss die Entwicklung von leistungsfähigeren Mikroorganismen, beispielsweise durch neue moderne Werkzeuge für die Genom-Editierung, oder die kontinuierliche Suche nach neuen Mikroorganismen gefördert werden, um die Palette an erreichbaren benötigten Produkten zu erweitern. Hürden zeigen sich zum einen auf Seiten der Gesetzgebung als auch auf Seiten der Öffentlichkeit, deren generelle Akzeptanz für den Einsatz von gentechnisch veränderten Organismen noch sehr gering ist.

Kunststoffe aus biogenen Stoffen sind im Vergleich zu ihren Verwandten aus fossilen Rohstoffen eine relativ junge Materialklasse. Spezialisierte (biobasierte) Additive, Compounds und auch Verarbeitungstechnologien wurden, im Gegensatz zu den seit über 50 Jahren erhältlichen petrochemischen Materialien, noch nicht ausentwickelt und das Eigenschaftsprofil der Biokunststoffe ist demzufolge an vielen Stellen noch nicht gleichwertig zu konventionellen Kunststoffen, wenn auch der Abstand zu schrumpfen begonnen hat. Erweiterung von Schmelzeviskositäten, E-Modul- und Bruchdehnungsbereich auf dem vollen Gebiet, das heute von Polyolefinen abgedeckt wird oder auch die Wärmeformbeständigkeit von PLA und Barriereigenschaften gegenüber Sauerstoff, Wasserdampf und Geruchsstoffen sind Fragestellungen, die über eine Weiterentwicklung der Biopolymere selbst, aber auch neuer biobasierter Additive und Rezepturen zu klären sind.

Die Technologien zur Modifizierung und zur Verbreiterung von Marktqualitäten müssen somit stetig verbessert werden. Damit einher geht die Evaluierung neuer Polymerbausteine im Sinne der Materialeigenschaften, aber auch im Sinne der Ökonomie und der Lebenszyklus-Analyse (LCA). Es müssen kreislauffähige Lösungen erarbeitet werden inkl. Recyclingverfahren für weitere (biobasierte) Kunststoffe, die entsprechend bewertet werden und sich im Praxistest beweisen müssen. Dies beinhaltet eine Reihe an Anforderungen an die Sammlung, Trennung und Aufarbeitung, aber auch an die Erarbeitung von Depolymerisationsprozessen mit einem Down-Stream-Processing und nicht zuletzt einer Repolymerisation.

#### **4.2.2 Biowerkstoffe als Baumaterialien am Beispiel Pilzwerkstoffe**

##### **Fragen und Herausforderungen, die einer Lösung bedürfen**

Die Bauwirtschaft ist mit mehr als 10 Prozent des Bruttoinlandsprodukts ein bedeutsamer Wirtschaftszweig Deutschlands [63]. Ressourceneffizienz, die Nutzung nachhaltiger Rohstoffe, Kreislaufführung sowie klimaneutrale Energieversorgung von Neubauten und des Bestands sind wesentliche Schritte zur Erreichung einer klimaneutralen Bauwirtschaft. Der Ersatz primär fossiler Rohstoffe durch biobasierte, wie beispielsweise Pilzmaterialien oder Hanf, ist dabei ein wichtiges Element zur Senkung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks in Produkten sowie zur Implementierung neuer Materialkreisläufe im Bauwesen.

Eine Ausgangsbasis für neue nachhaltige Werkstoffe, die auch in der Bauindustrie z. B. als Dämmmaterialien Anwendung finden können, sind Pilze. Sie sind die natürlichen Vorbilder für ein Recyceln und Verwerten von organischen Abfallstoffen. Mit ihrem Geflecht aus Zellfäden, dem sogenannten Myzel, durchwachsen sie in der Natur ihre Nahrungsquelle, das Substrat. Substrate, die aus losen Fasern bestehen, können durch die Zellfäden (Hyphen) verbunden werden, wobei das Myzel mit den Fasern ein festes Komposit bildet. Insbesondere holzersetzende Pilzspezies werden bereits in Ansätzen zur Herstellung von Dämm- und Verpackungsmaterialien oder textilen Anwendungen

genutzt. Diese Pilzwerkstoffe können in zwei Werkstoffgruppen eingeteilt werden: Kompositwerkstoffe, bei denen das Substrat im späteren Werkstoff noch vorhanden ist, und Werkstoffe, welche nach dem Fertigungsprozess aus dem reinen Myzel bestehen (diese werden auch oft als Pilzleder bezeichnet) [64–66]. Im Fall der Kompositwerkstoffe wird das Pilzmyzel ohne Formaldehydbelastung als natürliches Bindemittel genutzt, um biologisch abbaubare Werkstoffe herzustellen. Für beide Werkstoffgruppen können verschiedenste organische Reststoffe aus Industrie, Land- und Holzwirtschaft verwendet werden. Als ungiftiger und vollständig kompostierbarer Werkstoff auf Basis von Rest- und Abfallstoffen eignen sich Myzelwerkstoffe daher besonders für den Einsatz in einer biobasierten Kreislaufwirtschaft.

## Produktionsprozess

Im Bereich der Pilzwerkstoffe lässt sich der Produktionsprozess grob in die vier Prozessschritte Vorbereitung, Wachstum, Deaktivierung und Nachbehandlung einteilen. In einem Nährmedium wird der gewünschte Organismus als Stammkultur gezüchtet und ein steriles Substrat (flüssig oder fest) beimpft. Als Substrat können je nach Pilzart unterschiedliche pflanzliche Reststoffe, beispielsweise Stroh, Trester, Grünschnitt oder ähnliches eingesetzt werden. Nach der Beimpfung beginnt das Myzel das Substrat zu durchwachsen. Je nach Pilzart und Umgebungsbedingungen kann dies eine bis drei Wochen dauern. Im Falle der reinen Myzelwerkstoffe werden die Bedingungen so gewählt, dass das Myzel vermehrt auf dem Substrat und weniger im Substrat wächst. Bei Kompositwerkstoffen ist das Durchdringen des Substrats durch die Hyphen gewünscht, da dieses Teil des Werkstoffs werden soll. Kompositwerkstoffe können bereits in der gewünschten Produktform gezüchtet werden. Häufiger werden sie jedoch vorgezüchtet und nach dem Durchwachsungsprozess zerkleinert und anschließend in Negativformen gefüllt, die innerhalb weniger Tage erneut durchwachsen werden und ein festes Konglomerat bilden. Neben der Formgebung in Negativformen können Pilzwerkstoffe auch mit Hilfe von pastösen Substraten im 3D-Pastendruck-Verfahren produziert werden [65]. In diesem Falle durchwächst der Pilz die 3D-gedruckte Paste und verbessert damit Stabilität und wasserabweisende Eigenschaften der Produkte (Hydrophobie). Unabhängig vom Herstellungsprozess muss das Pilzwachstum vor der Fruchtkörperbildung gestoppt werden, um Veränderungen der Werkstoffeigenschaften sowie das Übergreifen auf andere lignocellulosehaltige Materialien in der Nähe zu verhindern. Dazu werden Pilzwerkstoffe am Ende des Wachstumsprozesses unter Hitze getrocknet. Je nach Einsatzbereich müssen Pilzwerkstoffe ggf. nachbehandelt werden. Soll reines Pilzmyzel für den textilen Bereich eingesetzt werden, so muss es, analog zu tierischem Leder, haltbarer und flexibler gemacht werden. An Kompositwerkstoffe gibt es je nach Anwendungsfall besondere Anforderungen, wie beispielsweise Brandschutz oder Feuchtigkeitsbeständigkeit. Neben der Anpassung der Funktionalität bieten sich darüber hinaus Möglichkeiten wie das Färben oder Prägen der verschiedenen Werkstoffe an.

## Forschungs- und Entwicklungs-Bedarfe

Für den gesamten noch recht neuen Herstellungsprozess für Pilzwerkstoffe ist nach aktuellem Stand eine Prozessoptimierung notwendig. Im Labormaßstab werden derzeit alle Schritte dieser Prozesskette manuell durchgeführt. Da die Rohstoffkosten sehr gering sind, ermöglicht eine Skalierung und Automatisierung der Produktionsschritte eine effizientere Herstellung der Werkstoffe und der daraus entwickelten Produkte. Ökonomisch und ökologisch besteht im Wachstumsprozess des Pilzmyzels erhöhter Optimierungsbedarf, vor allem im Bereich des Energieverbrauchs der Klimatechnik. Die notwendige Prozesstechnik ist im Bereich der Textil- oder Baubranchen nicht vorhanden, da teilsterile und klimatisierte Produktionsprozesse dort bisher unbekannt sind.

Dies erschwert industrieorientierte Skalierungsprozesse und erhöht den FuE-Bedarf. Hier müssen zukünftig bekannte Produktionsprozesse aus der Biotechnologie und Lebensmittelindustrie als Ausgangspunkte für neue Produktionswege dienen. Insbesondere im Bereich der Bauindustrie sind Pilze zudem nach wie vor eher negativ belastet, da mit ihnen Schimmel an Gebäuden und somit die Sorge vor der Ausbreitung des Pilzes verbunden wird. Hier ist eine erhöhte Aufklärungsarbeit nötig, um die Bedenken auszuräumen. Eine Produktion mit lebenden Organismen bietet außerdem immer die Herausforderung von Qualitätsschwankungen. Im Textilbereich ist diese aus der Lederindustrie bekannt. Die Bauindustrie ist geprägt von Normen mit wenig Spielraum. Daher muss vermehrt daran geforscht werden, wie der Prozess qualitätssicher und ohne qualitätsschwankungsbedingte Ausfälle umgesetzt werden kann. Qualitätsschwankungen sind auch mit Blick auf Rohstoffsicherheit zu bedenken. Pilze haben die positive Eigenschaft, dass sie auf unterschiedlichen Substraten wachsen können, dennoch muss ihrer möglichen Varianz als biologischem System, sowohl durch technologische Maßnahmen, adaptierte Bewertungssysteme sowie überdachte Normen und Standards und angepasste Regulatorik Rechnung getragen werden. Eine Produktion, die mit unterschiedlichen pflanzlichen Reststoffen als Ausgangssubstraten arbeiten kann, wäre hier sicherlich eine wichtige Entwicklung für eine zukunftssichere Produktion von pilzbasierten Biowerkstoffen. Sie muss aber auch durch Rahmengesetzgebung, gerade in der Erprobung und in explorativen Phasen, entsprechend ermöglicht werden.

### **4.2.3 CO<sub>2</sub> als Rohstoff**

#### **Fragen und Herausforderungen, die einer Lösung bedürfen**

In den letzten Jahrzehnten hat sich eine so hohe Konzentration an Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in der Atmosphäre angesammelt, wie seit Hunderttausenden von Jahren nicht mehr. Im Jahr 2021 wurden weltweit 36,3 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente durch Energieverbrennung und industrielle Prozesse ausgestoßen [67, 68]. Diese viel zu hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen müssen deutlich gesenkt werden, um den Klimawandel zu begrenzen. Deutschland hat sich zur Erreichung der Netto-Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 verpflichtet und nach 2050 sollen negative Treibhausgasemissionen erzielt werden [69]. Auf dem Weg dorthin sind in allen Sektoren (Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft) drastische Senkungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen erforderlich.

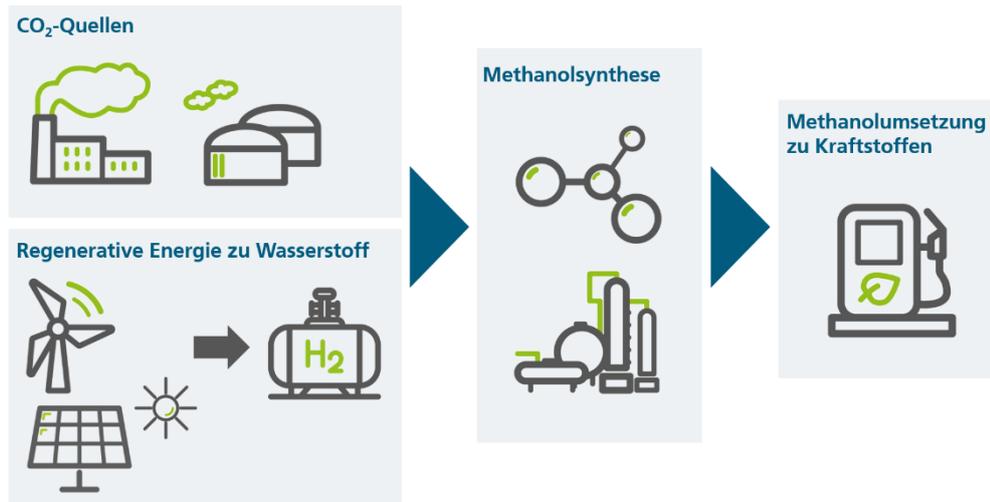
Eine wichtige Lösungsstrategie neben Effizienzsteigerungen und auch Einsparungen ist die Defossilisierung, d. h. der zunehmende Ersatz von fossilen Energie- und Rohstoffträgern durch andere Rohstoffe. CO<sub>2</sub> wird hier zukünftig eine wichtige Rolle spielen. Gleichzeitig wird immer ersichtlicher, dass zur Erreichung des globalen 1,5 Grad-Ziels (Begrenzung des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur auf unter 1,5 Grad gegenüber dem vorindustriellen Temperaturniveau) schon deutlich früher das verbleibende CO<sub>2</sub>-Budget aufgebraucht ist und vermehrt auch CO<sub>2</sub> aktiv aus der Atmosphäre entfernt und gebunden werden muss [70, 71].

#### **Produktionsprozess**

In enger Zusammenarbeit bieten die Chemie, die Verfahrenstechnik und die synthetische Biotechnologie gemeinsam intelligente Lösungen zur effizienten Abtrennung, Reinigung und Verwertung von CO<sub>2</sub>. Angestrebt wird die Weiterentwicklung von Technologien, hin zu wirtschaftlich tragfähigen Modellen. Im Folgenden werden verschiedene Routen zur Nutzung von CO<sub>2</sub> im Sinne der Bioökonomie, als zukunftsweisende Alternative zu fossilen Kohlenstoffquellen, betrachtet.

Die Verbesserung der Verwertung von CO<sub>2</sub> durch Landpflanzen zu Biomasse und wertgebenden Inhaltsstoffen hat nach wie vor einen hohen Stellenwert. Eine weitere direkte Route zur Nutzung von CO<sub>2</sub> bietet beispielsweise die Kultivierung von Mikroalgen, die CO<sub>2</sub> zum Wachstum benötigen und so Kohlenstoff aus der Atmosphäre direkt in eine Vielzahl innovativer Produkte mit hoher Wertschöpfung überführen können.

In einem anderen chemisch-synthetischen Ansatz wird CO<sub>2</sub> zusammen mit Wasserstoff zu Methanol umgesetzt, wobei der Wasserstoff mittels einer PtX-basierten Produktionsroute mit erneuerbarer Energie erzeugt wird. Das Methanol kann dann u. a. zur weiteren Synthese von Drop-in-Kraftstoffen oder zur Herstellung von Plattformchemikalien für die chemische Industrie von morgen genutzt werden (Abb. 5).



**Abb. 5 Die Herstellung nachhaltiger CO<sub>2</sub>-basierter Kraftstoffe über das Zwischenprodukt Methanol**

## Stand der Technologie

Beispiele für Produkte, welche sich bereits heute direkt aus Mikroalgen gewinnen lassen, sind Algenöle und Fettsäuren, welche entweder in die energetische Verwertung in Form von Algenkraftstoffen eingehen oder aber zur Herstellung von Kunststoffen, z. B. von algenbasierten Garnen für die Textilindustrie, genutzt werden können [72]. Insbesondere bei solchen Anwendungen, in welchen der Kohlenstoff über längere Zeit im Produkt gebunden wird, zeigt die Algenbiotechnologie als CO<sub>2</sub>-Senke großes Potenzial. Für die Produktion von 1 kg Algenbiomasse werden beispielsweise ca. 1,8 kg CO<sub>2</sub> aktiv der Atmosphäre entzogen [73]. Weiterhin sind Mikroalgen hervorragende Produzenten von wertvollen Nahrungsergänzungsmitteln, wie z. B. dem Carotinoid Astaxanthin, aber auch von Proteinen, wodurch eine effiziente und nachhaltige Versorgung von Nahrungsmitteln für die wachsende Weltbevölkerung in Aussicht gestellt werden kann (Kap. 4.1) [74].

Über den PtX-Ansatz kann Methanol als primäres Zwischenprodukt direkt aus CO<sub>2</sub> hergestellt werden. Die anschließende Umsetzung führt über weitere Zwischenprodukte zu flüssigen Kraftstoffen im Benzin- und Mitteldestillatbereich. Diese sogenannte »Methanol-Route« bietet die Möglichkeit, nachhaltige und CO<sub>2</sub>-neutrale Drop-in-Kraftstoffe, sogenannte E-Fuels, zu entwickeln, die in Bereichen zum Einsatz kommen, in welchen die Elektromobilität keine Lösung anbieten kann. Dazu zählen u. a. Land- und Forstmaschinen sowie die Binnenschifffahrt, aber auch die kommerzielle Luftfahrt und der Schwerlastverkehr.

Die Methanolsynthese ist ein großtechnisches Verfahren (TRL 9), wobei die größte Anlagenkapazität derzeit etwa 7200 Tonnen pro Tag beträgt (world scale plants). Welt-

weit wurden im Jahr 2019 etwa 90 Mio. Tonnen Methanol hergestellt. Die industrielle Methanolsynthese basiert auf fossilem oder auch biogenem Synthesegas (Gemisch aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid (CO)) als Ausgangsstoff. Angestrebt wird die ausschließliche Nutzung von CO<sub>2</sub>, z. B. aus industriellen Punktquellen (Abgase von Zementwerken, Bioraffinerien etc.), und elektrolytisch aus Wasser erzeugtem grünen Wasserstoff für die Erzeugung von grünem Methanol.

### **Forschungs- und Entwicklungs-Bedarfe**

Um die Algenbiotechnologie für eine breitere Palette von Anwendungen wirtschaftlich umsetzen zu können, insbesondere im angestrebten Niedrigpreissektor, bedarf es derzeit noch effizienterer Reaktorsysteme zur Kultivierung der Algen und eine Optimierung der Herstellungsprozesse [75]. Aufgrund der Weiterentwicklung im Bereich der LED-Technik, findet hier momentan der Wandel von der Freiland- zur Indoor-Kultivierung mit künstlicher Beleuchtung statt [76]. Je nach Standort und verwendeter Technik sind künstlich beleuchtete Kulturen bereits heute schon profitabler als ein »Anbau« im Freiland. Um ein Maximum an Effizienz zu erzielen ist es daher einerseits von großer Bedeutung, die LED-Technologie weiter voranzutreiben und dadurch die Energie-Licht-Ausbeute zu maximieren, und andererseits ist es ebenfalls unumgänglich, die Licht-Biomasse-Ausbeute durch neuartige Reaktorkonzepte zu verbessern. Aktuell liegen daher die meisten der derzeit noch wenigen Produkte der Algenbiotechnologie im Hochpreissegment. Erschwerend für eine weitere Entwicklung ist, dass insbesondere die notwendigen gentechnischen Werkzeuge, welche eine gezielte Entwicklung von biotechnologisch modifizierten Hochleistungsalgen erlauben, nicht ausreichend etabliert und verfügbar sind [77].

Zudem kann die Verbesserung der Nutzung und Umwandlung von CO<sub>2</sub> in Rohstoffe (Saccharose, Stärke, Inulin, Kautschuk und andere Inhaltsstoffe) durch Landpflanzen enorme Sprünge in der Bioökonomie hinsichtlich der Bereitstellung von Wertstoffen für viele Industriesegmente generieren.

Ein wichtiger Aspekt für die direkte chemisch-synthetische Nutzung von CO<sub>2</sub> ist der alternative Einsatz von aus CO<sub>2</sub> gewonnenem Methanol für zukünftige biotechnologische Prozesse, im Gegensatz zur klassischen Nutzung in der chemischen Industrie. Hierbei wird Methanol statt Zucker als Kohlenstoff- und Energiequelle für Mikroorganismen eingesetzt, die durch sogenanntes Metabolic Engineering zur gezielten Synthese wertvoller chemischer Produkte befähigt werden. Auf diese Weise wird PtX mit der industriellen Biotechnologie gekoppelt. In Anbetracht der daraus folgenden Vielfalt an Möglichkeiten greift die Bezeichnung PtX nicht weit genug, da die elektrochemische Umsetzung nur den ersten Schritt in den sich anschließenden Prozessketten darstellt. Der Begriff wurde daher zu Power-to-X-to-Y erweitert, um zu verdeutlichen, dass der sich rasant entwickelnde Ansatz der Rezyklierung von CO<sub>2</sub> durch Nutzung erneuerbarer Energien nicht auf die Synthese einfacher Produkte (»X«) wie Wasserstoff oder Methanol beschränkt bleibt. Vielmehr werden diese einfachen Produkte als Rohstoffe zukünftiger Raffinerien betrachtet, in denen durch verschiedene Prozesskaskaden dringend benötigte neue Plattformchemikalien (»Y«) hergestellt werden.

Bei der direkten Methanolsynthese aus CO<sub>2</sub> bestehen in der Entwicklung noch Herausforderungen. In den bislang durchgeführten Studien wurden hauptsächlich konventionelle Katalysatoren eingesetzt, die sehr empfindlich gegenüber Katalysatorgiften reagieren, welche als Verunreinigungen in technischen CO<sub>2</sub>-Quellen vorkommen, etwa aus Verbrennungs- und Fermentationsprozessen. Hier besteht Entwicklungsbedarf für stabile und resiliente Katalysatoren für die CO<sub>2</sub>-basierte Methanolsynthese [78]. Mehr Studien sind nötig, in denen die Methanolsynthese mit verschiedenen technischen CO<sub>2</sub>-Quellen integriert wird, um Erkenntnisse zur erforderlichen Gasaufbereitung und zu

Prozessstabilität und -performance zu gewinnen. Die Studien sollten unter möglichst relevanten Prozessbedingungen durchgeführt werden, um den Erkenntnistransfer in die industrielle Anwendung zu erleichtern.

Eine vorindustrielle Anlage zur Erzeugung von CO<sub>2</sub>-basiertem Methanol wurde in Island im Jahr 2012 erbaut [79], weitere Anlagen sind in Planung. Verlässliche Studien im Pilotmaßstab werden benötigt, um diese Entwicklungen zu unterstützen und eine stabile und selektive Synthese im industriellen Maßstab und in Verbindung mit verschiedenen technischen CO<sub>2</sub>-Quellen zu ermöglichen.

#### 4.2.4

#### **Chemierohstoffe und Kraftstoffe durch die thermochemische Umsetzung von Biomasse**

##### **Produktionsprozess**

Die thermochemische Erzeugung von Chemierohstoffen und nachhaltigen Kraftstoffen aus biogenen Reststoffen (z. B. aus Land- und Forstwirtschaft, Lebensmittelindustrie oder aus der Kultivierung von Algen) stellt eine Wertschöpfungskette der Bioökonomie dar, welche aus den folgenden Schritten aufgebaut ist: Biogene Reststoffe werden mittels thermochemischer Konversionsprozesse (Pyrolyse, Vergasung, hydrothermale Carbonisierung) in Zwischenprodukte wie »Biokohle« (Karbonisat), Pyrolysekondensat und Pyrolysekoks sowie Synthesegas gewandelt, die über weitere Prozessschritte und Anwendungen genutzt werden. Beim Karbonisat und dem Pyrolysekoks ist dies sowohl eine stoffliche Nutzung (Bodenanwendung, Zuschlagstoff in Baumaterialien etc.), welche auch die langfristige Einlagerung von Kohlenstoff ermöglicht, als auch eine energetische Nutzung. Das Pyrolysekondensat (Pyrolyseöl) kann je nach Qualität durch verschiedene Nachbehandlungsschritte zu einem Treibstoff veredelt oder in Raffinerieprozessen genutzt werden. Bei Synthesegas ist eine direkte energetische Nutzung ebenso möglich, wie Synthesen zu Methan (SNG, Substitute Natural Gas), Methanol oder Fischer-Tropsch-Kohlenwasserstoffen [80]. Durch Hinzunahme von grünem Wasserstoff zum primären Synthesegas kann eine nahezu vollständige Ausbeute des Kohlenstoffs aus den Einsatzstoffen erreicht werden.

##### **Fragen und Herausforderungen, die einer Lösung bedürfen**

Die große Herausforderung der beschriebenen Prozesse ist die ökonomisch wertvolle Umsetzung von biogenen Reststoffströmen, welche derzeit keinen oder minderwertigen Verwertungspfaden zugeführt werden. Die Technologien im Bereich der thermochemischen Konversion von Reststoffen hat dabei in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Am Beispiel des »Thermo-Katalytischen Reformings« (TCR) konnten erstmals thermisch stabile Öle als Zwischenprodukte für die Hydrierung zu Kraftstoffprodukten generiert werden [81, 82].

Generell ist für die zukünftige Nutzung von strombasierten Kraftstoffen (Power-to-Liquid-Kraftstoffe) zu erwarten, dass aus Kostengründen und zur Verbreiterung der Rohstoffbasis eine Mischung mit abfallstämmigen Biokraftstoffen angeraten sein wird. Das Mischen von Kraftstoffen ist in der Praxis jedoch ein komplexer Vorgang, welcher die Entwicklung jeweils spezieller Additive notwendig machen kann. Ein frühzeitiges experimentelles Angehen dieser Fragestellung unter Beachtung der ökologischen wie ökonomischen Randbedingungen könnte die von der Bundesregierung angestrebte Einführung von Power-to-Liquid-Kraftstoffen (PtL) für die Schifffahrt, optional auch für den Schwerlastverkehr, deutlich beschleunigen und ökonomische Hürden reduzieren [83].

## Stand der Technologie

Die verschiedenen Pyrolyse- und Vergasungstechnologien gilt es hinsichtlich der Skalierung und der Flexibilität in Bezug auf die jeweiligen Einsatzstoffe entsprechend zu optimieren. Beispielsweise kann die Verwertung von Klärschlamm für die Erzeugung von nachhaltigen Kraftstoffen demonstriert werden. Über eine pyrolysebasierte Konversionstechnologie wird thermisch stabiles Bioöl erzeugt, welches im nachfolgenden Hydrierprozess auf die Qualität von Normkraftstoffen aufbereitet werden kann.

Bioöl aus der Schnellpyrolyse von Stroh und Energiegräsern lässt sich in ein Zwischenprodukt umwandeln, welches in einer konventionellen Erdölraffinerie mitverarbeitet werden kann; der Nachweis ist bereits im großen Technikumsmaßstab erbracht. Aus Stroh und landwirtschaftlichen Reststoffen lassen sich weiterhin Komponenten herstellen, die unter Additivzugabe als konventionelle Schiffskraftstoffe genutzt werden können.

## Forschungs- und Entwicklungs-Bedarfe

Bei der technologischen Optimierung steht die Verbreitung der Einsatzstoffbasis im Fokus. Dies beinhaltet insbesondere Biomassereststoffquellen, welche durch hohe Aschegehalte oder heterogene Zusammensetzung bislang nicht primär untersucht wurden, aufgrund der guten Verfügbarkeit jedoch Bedeutung haben. Darüber hinaus ist verfahrenstechnisch die Vereinfachung der Prozesse von Relevanz, um letztlich aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten die Prozessführung und vor allem die Aufwendungen für die Produktgasstrecke zu reduzieren. Dabei sind auch die Produkteigenschaften weiterhin ein Zielparameter bei der Prozessoptimierung, um die hochwertigen Produkte Synthesegas, Pyrolyseöl und Karbonisate bereitzustellen [84]. Die verfahrenstechnische Entwicklung der vergangenen Jahre hat auch die hochwertige Nutzung von Bioölen aus der thermochemischen Umsetzung in neuen Anwendungsbereichen ermöglicht. Allen voran ist hierbei die Hydrierung von Pyrolyseölen zu nennen, welche durch verbesserte Öleigenschaften auch hin zu werthaltigen (Zwischen-)Produkten aufgearbeitet werden können. Dies soll u. a. dahingehend eruiert werden, die erzeugten Öle und Zwischenprodukte im Raffinerieprozess und der chemischen Industrie direkt einzubinden oder zur Erzeugung von Blendkraftstoffen auf PtL-Basis mit thermochemisch und anderweitig erzeugten Reststoffbiomasse-stämmigen Kraftstoffen zu nutzen.

Die Bewertung der gesamten Wertschöpfungsketten im Bereich der Reststoffverwertung hinsichtlich wirtschaftlicher, nachhaltiger und sozioökonomischer Gesichtspunkte ist bei den weiteren Entwicklungen ein primärer Aspekt, welcher zusammen mit der weiteren Hochskalierung der Verfahren einhergeht (beispielsweise sind hier Fragen beim Scale-up zu beantworten, welche sich mit der Verringerung der spezifischen Kosten vs. Verfügbarkeit und Transport von Reststoffquellen beschäftigen).

## 4.3

### Exkurs: Biologische Transformation

Die Biologische Transformation ist ein wichtiger Baustein in der Umsetzung einer zirkulären Bioökonomie. Sie wird definiert als die zunehmende Nutzung von Materialien, Strukturen, Prozessen und Organismen der belebten Natur in Technik und Produktion mit dem Ziel einer nachhaltigen Wertschöpfung. Dabei wird zwischen drei Entwicklungsmodi des Transformationsprozesses unterschieden. Bei bioinspirierten Systemen dienen Konzepte oder Phänomene der Biologie als Anregung für technische Systeme. Hingegen wird bei biointegrierten Systemen mindestens eine biologische Komponente, wie beispielsweise ein Enzym oder im komplexeren Fall eine Zelle, mit einem technischen System vereint. Wird das biointegrierte System um ein informatives System (z. B. KI) erweitert, welches eine Interaktion und Kommunikation zwischen dem biologischen und technischen System ermöglicht, entsteht ein biointelligentes System [85–87].

Die Biologische Transformation ist mehr als bloß eine einzige Schlüsseltechnologie, sie vereint viele verschiedene Innovationen aus den Lebens-, Ingenieurs- und Informationswissenschaften [85, 86]. Auf dieser Basis beschäftigt sich die aktuelle Forschung u. a. mit der Entwicklung und Verarbeitung von biobasierten, bioinspirierten und biointegrierten Materialien [85, 86, 88–90]. Eine wesentliche Rolle in der Biologischen Transformation spielen auch biointelligente Waste-to-X-Systeme, welche die Aufwertung von Rest- und Abfallstoffen durch die Wiederverwendung und eine Kreislaufführung von Materialien und Energieträgern ermöglichen [85, 86, 91–93].

Es werden Schnittstellen zwischen Biologie und Technik (z. B. Sensorik und Aktorik) geschaffen, die einen Datentransfer zwischen biologischen und technischen Systemen ermöglichen sollen [85, 86, 94, 95]. Für die Entwicklung von biointelligenter Produktionstechnik und deren Organisation braucht es z. B. sogenannte Digitale Zwillinge und bioinspirierte Algorithmen. Zur Interaktion von biologischen und technischen Systemen werden große Datenmengen generiert, welche durch bioinspirierte und biobasierte Datenverarbeitungssysteme verwaltet werden könnten [85, 86].

Ein anderer Bereich betrifft die biointelligente Energiegewinnung, -speicherung und -versorgung. Auch hier gibt es verschiedene Forschungsansätze, von der künstlichen Photosynthese bis zu »Hydrogen Bioenergy with Carbon Capture and Storage«-Prozessen (HyBECCS-Prozesse) [85, 86, 92, 93, 96, 97]. Darüber hinaus ist die Entwicklung von Modellen zur Abbildung von komplexen biointelligenten Systemen und zur Vorhersage der Einflüsse und Folgen von biointelligenter Technologie entscheidend, um die Beherrschbarkeit sowie Sicherheit dieser Systeme zu gewährleisten. In Bezug auf die Nutzung von gentechnisch veränderten Organismen, KI und personenbezogenen Daten in biointelligenten Systemen sind noch grundsätzliche ethische Fragen zu klären und Sicherheitsmaßnahmen zu entwickeln [85, 86].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Entwicklung von biointelligenten Systemen unterschiedlich weit vorangeschritten ist und von ersten Beschreibungen der Anwendungen bis zum Einsatz von Prototypen reicht. Allerdings wird für eine breite Nutzung und den Transfer von Pilot-Technologien in die industrielle Produktion eine Intensivierung der angewandten Forschung auch in diesem Feld benötigt.

## 5 Handlungsempfehlungen

Für die gesamtgesellschaftliche Realisierung einer zirkulären Bioökonomie müssen Rahmenbedingungen sowohl für Wissenschaft als auch Industrie und Gesellschaft so gestaltet sein, dass Forschung, Entwicklung, Innovation, Produktion und die Erbringung von Dienstleistungen in einem langfristig verlässlichen und planbaren Umfeld stattfinden.

Darüber hinaus ist es von grundlegender Bedeutung, die fundamentale Neustrukturierung des Wirtschaftssystems von linearen zu zirkulären Abläufen gesamtgesellschaftlich umzusetzen. Dazu sind gesonderte Anstrengungen erforderlich, ausgehend von der Bereitstellung von Information bis hin zu einem gesellschaftlichen Diskurs, um die erforderliche Akzeptanz für die Bioökonomie zu erreichen.

Die zirkuläre Bioökonomie ist von zentraler Bedeutung, um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft auch zukünftig zu sichern und auszubauen, und um die ambitionierten nationalen, europäischen und internationalen Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsziele erreichen zu können. Mit der »Nationalen Bioökonomiestrategie« und einer Reihe von Bioökonomiestrategien der Bundesländer und Regionen wurden in Deutschland die strategischen Grundlagen für eine nachhaltige, bioökonomische Wirtschaft gelegt. Für das Gelingen der Transformation zu zirkulären, bioökonomischen Abläufen sind verlässliche und fördernde politische Rahmenbedingungen und konkrete Maßnahmen erforderlich. Nur so wird es möglich sein, die notwendigen Prozesse aktiv gemeinsam mit der Gesellschaft als Treiber voranzubringen.

Dabei kommt insbesondere der konsequenten Translation von Innovationen (bereits bestehenden und zukünftigen) in die industrielle Realität große Bedeutung zu. Es gilt, die zur Umsetzung der Bioökonomie getroffenen Maßnahmen kontinuierlich zu überprüfen und sie ggf. an sich ändernde Rahmenbedingungen anzupassen und weiterzuentwickeln. Dies ist eine essenzielle Voraussetzung dafür, ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeitsziele mit einer zirkulären Bioökonomie zu erreichen.

Nachfolgend werden die von der Fraunhofer-Gesellschaft erarbeiteten, kurzfristigen (bis 2025), mittelfristigen (bis 2030) und langfristigen (bis 2035) Handlungsempfehlungen zur Umsetzung und Etablierung einer zirkulären Bioökonomie vorgestellt. Diese sind in drei Themenfelder unterteilt: Rahmenbedingungen, Technologie und Translation.

### 5.1 Rahmenbedingungen

#### **Kurzfristige Umsetzung**

Unser gegenwärtiger Konsum und der damit einhergehende Ressourcenverbrauch können nicht in unveränderter Weise, auf Basis endlicher Rohstoffe, fortgesetzt oder sogar weiter gesteigert werden. Die Auswirkungen dieses nicht nachhaltigen Verhaltens sind drastisch und bereits jetzt nur noch schwer – wenn überhaupt – umkehrbar (Klimawandel, Verlust von Biodiversität etc.). Ein sofortiges Handeln mit kurzfristig greifenden Maßnahmen ist erforderlich. Diese beinhalten die konsequente Überführung bereits vorhandener, etablierter kreislauffähiger und bioökonomischer Technologien, Verfahren und Produkte in die industrielle Anwendung. Diese wurden bisher aufgrund von Pfadabhängigkeiten, mangelnder Wettbewerbsfähigkeit und hoher Kosten nicht

industriell umgesetzt. Daher müssen vor allem Rahmenbedingungen geschaffen werden, in denen die Vorteile bioökonomischer, kreislauffähiger Produkte und Verfahren sich auch ökonomisch positiv abbilden. Darüber hinaus sollten zentrale und dezentrale Verarbeitungstechnologien und Konzepte, wie Bioraffinerien mit Nachdruck in die Umsetzung gebracht werden, wodurch die Skalierung von nachhaltigen Technologien aus dem Labor in den Pilotmaßstab und in die industrielle Implementierung möglich wird. Die erforderlichen regulatorischen Rahmenbedingungen sind anzupassen oder neu zu etablieren und ggf. regulatorische Hemmnisse abzubauen. Die Etablierung neuer Real-labore im Bereich der Bioökonomie als Testräume für Innovation und Regulierung bietet darüber hinaus die Möglichkeit, dass Wirtschaft und Forschung gemeinsam Dienstleistungen, Produkte oder Ansätze erproben, die mit dem aktuellen Rechts- und Regulierungsrahmen nur beschränkt vereinbar sind.

Eine schnellere Umsetzung muss den Unternehmen Planungssicherheit geben und finanzielle Risiken abpuffern. Hierzu müssen jedoch Barrieren für die Kommerzialisierung abgeschafft werden. Durch eine frühzeitige Einbindung der Industrie in den FuE-Prozess wird es möglich, sich auf eine marktgerechte Entwicklung zu konzentrieren. Ein besonderer Fokus im Bereich des Transfers muss zudem auf die Verbesserung des Zugangs zu kapitalintensiver Infrastruktur durch die Einrichtung von Pilot- und Demonstrationsanlagen sowie auf die Verbesserung des Zugangs zu und der Dienstleistung von bestehenden Infrastrukturen gelegt werden. Um Unternehmen Anreize zu bieten, bioökonomische Technologien einzusetzen, kann über Subventionen und Steuerbeiträge nach ökologischen Standards, der Passfähigkeit zur Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeitsvorteilen nachgedacht werden.

Des Weiteren ist es wichtig, neue Technologien zu initiieren und voranzubringen. Dafür bedarf es weiterhin einer zielgerichteten Förderung durch Bund und Länder, idealerweise in einer verzahnten und über Ministerien hinweg abgestimmten Weise. Dieses Vorgehen sollte zudem im Einklang mit den Strategien und Aktivitäten im Bereich der Bioökonomie auf EU-Ebene erfolgen.

## Mittelfristige Umsetzung

Bioökonomische Prozesse und Produkte sind nicht per se nachhaltig. Daher ist es unabdingbar, die Vorteile von bioökonomischen Verfahren und Produkten unter Nachhaltigkeitsaspekten im Vergleich zu konventionellen Prozessen und Produkten methodisch einwandfrei zu ermitteln sowie transparent und nachvollziehbar zu kommunizieren. Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung und geeignete Metriken müssen entwickelt, standardisiert und normiert werden, um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Bewertungsansätzen zu erzielen und die Nachhaltigkeit von Produkten im Markt sichtbar zu machen. Solche Metriken, die vor allem auf Verlässlichkeit und Langfristigkeit ausgelegt sind, stellen sicher, dass sowohl im Bereich Business-to-Business (B2B) als auch Business-to-Customer (B2C) bewusste und effektive Entscheidungen für nachhaltige Prozesse und Produkte getroffen werden. Durch die transparente Kommunikation des Nachhaltigkeitsprofils soll die Nachfrage nach nachhaltigen Produkten und Dienstleistungen gesteigert werden. In der Klimapolitik sind solche Metriken bei der CO<sub>2</sub>-Bepreisung und dem europäischen Emissionshandel etabliert. Bei der Erschließung und Nutzung von Reststoffströmen und den daraus herstellbaren Produkten bedarf es eines Mechanismus zur Lenkung von Biomasse- und Reststoffströmen in die jeweils vorteilhaften Nutzungspfade. Hierfür sind die Bewertung, relevante Metriken sowie Analysen erforderlich, um eine valide Aussage darüber zu gewinnen, welche der potenziell möglichen Verwertungspfade im jeweiligen Kontext zu präferieren sind. Darüber hinaus ist eine Anpassung des Begriffs »Abfall«, insbesondere im Hinblick auf Definitionen zum Ende der Abfalleigenschaft und der damit verbundenen Regularien und Gesetze erfor-

derlich, um eine umfassende Nutzung von Reststoffen als Wertstoffe in bioökonomischen Prozessen zu ermöglichen.

Durch gezielte regulatorische Rahmensetzungen wird der Markteintritt für bioökonomische Produkte und Technologien erleichtert. Hierbei spielen Selbstverpflichtungen, Standards und auch Quoten sowie Subventionen eine wichtige Rolle. Diese müssen streng an die Nachhaltigkeitsbewertungen gekoppelt sein. Es sollte ein »Level-Playing-Field« geschaffen werden, auf welchem primär die Nachhaltigkeitsbewertung darüber entscheidet, inwieweit der Marktzutritt für die jeweilige Technologie oder das Produkt erleichtert oder erschwert wird. Dies kann derart erfolgen, dass Subventionen für nicht oder gering nachhaltige Produkte reduziert werden, wodurch sich gleichzeitig Innovations- und Markthemmnisse für nachhaltige Technologien und Produkte verringern. Darüber hinaus kann durch die Einführung von Öko-Design-Standards ein Mess- und Bewertungssystem für Ökosystemdienstleistungen geschaffen werden. Weiterhin ist zu klären, wie ein solches System gestaltet werden muss, um Geschäftsmodelle für Ökosystemdienstleistungen für Wirtschaft und Gesellschaft in Wert zu setzen.

Mittelfristig müssen daher geeignete Metriken zur Nachhaltigkeitsbewertung kontinuierlich verbessert und der regulatorische Rahmen entsprechend angepasst werden. Es gilt Gremien zur Entwicklung der Regulatorik sowohl auf nationaler und internationaler Ebene weiter auszubauen und mit fachkundigen Expertinnen und Experten zu besetzen. Ein Beispiel ist die Regulatorik bei der Zulassung von alternativen Proteinquellen für Lebensmittel.

Weiterhin gilt es, in Förderbekanntmachungen Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung stärker zu berücksichtigen. In den Bekanntmachungen muss verbindlich gefordert werden, dass die Projekte so konzipiert werden, dass alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit – Ökonomie, Ökologie und Soziales – adäquat adressiert und gemeinsam gedacht werden und ineinandergreifen. Einen Ansatzpunkt hierzu bieten die Ausschreibungen innerhalb des »Horizont Europa«-Programms. Im Sinne eines lernenden Fördersystems sollte zudem in regelmäßigen Abständen evaluiert werden, inwieweit die angestrebten Nachhaltigkeitsziele in den Projekten tatsächlich erreicht werden, und wie eventuelle Hemmnisse und Defizite in künftigen Fördermaßnahmen verringert werden können. Zudem muss insbesondere bei der Förderung von Projekten unter Beteiligung großer Konsortien mit mehreren Projektpartnern die finanzielle Förderung um den Aspekt des Projektmanagements ausgeweitet werden. Solche Projekte sind generell aufwändiger und haben einen höheren internen Kommunikationsbedarf. Um die Forschung in der gebotenen Qualität und Geschwindigkeit durchführen zu können, braucht es somit ein ziel- und ergebnisorientiertes Management in transdisziplinären Konsortien mit agilen, adaptiven und flexiblen Hierarchieebenen. Diese werden kontinuierlich auf den Prüfstand gestellt und neuen Rahmenbedingungen und der Ergebnislage angepasst.

## Langfristige Umsetzung

Die Resilienz biobasierter Produktionssysteme muss unter Beachtung der ökologischen Kapazitäten gesteigert werden. Resilienz kann bei Störungen aller Art einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil bieten. Auf Basis von Foresight- und Szenarien-Analysen müssen Lösungen entwickelt und ein langfristiger Wandel eingeleitet werden. Viele bioökonomische Ansätze laufen aktuell auf eine immer intensivere Nutzung biologischer und ökologischer Ressourcen hinaus, was zu einem Resilienzverlust führen kann, da auf diese Weise die Anfälligkeiten fossiler Ökonomien nicht beseitigt, sondern unverändert übernommen werden. Die Bioökonomie verfügt über ein breites Technologiereservoir zur Beantwortung neuer Herausforderungen. Zur Vorbeugung neuer Risiken, muss vorab bereits die Frage beantwortet werden, wie biobasierte Produktionssysteme gestaltet werden müssen, um diese Herausforderungen meistern zu können. Die

Förderung der Politik sollte darauf ausgelegt sein, nur Formen der Bioökonomie zu unterstützen, die resilient gegenüber Veränderungen in den Märkten sind ohne neue ökologische Anfälligkeiten zu erzeugen.

Deutschland ist auch im Bereich der Bioökonomie ein rohstoffimportierendes Land. Der Ukrainekrieg hat exemplarisch aufgezeigt, dass internationale Lieferketten vulnerabel und bisherige geopolitische Allianzen ggf. nicht langfristig verlässlich sind. Die Erstellung von Potenzialanalysen im Bereich der Rohstoffverfügbarkeiten und Potenziale sowie die Etablierung von wirtschaftspolitischen, globalen Partnerschaften für eine nachhaltige Versorgung mit biobasierten Rohstoffen unter Berücksichtigung der Zuliefererländer muss demzufolge in den Fokus gestellt werden. Wirtschaftspolitische Partnerschaften sollten durch entsprechende FuE-Projekte und Förderprogramme flankiert werden mit dem Ziel, resiliente Wertschöpfungsketten und eine enge Verzahnung von Biomasseerzeugung, -bereitstellung und -konversion aufzubauen und zu stärken.

## 5.2 Technologien

Technologieentwicklungen und Innovationen bilden die zentrale Grundlage, um die Transformation zu einer nachhaltigen Wirtschaft und Gesellschaft voranzutreiben. Prozessinnovationen, die zu einer effizienten Verwertung von Roh- und Reststoffen führen, sind zur Realisierung der zirkulären Bioökonomie von entscheidender Bedeutung. Dabei muss das Ziel sein, umweltverträgliche und wirtschaftliche Prozesse zu entwickeln, die schnell in den industriellen Maßstab überführt werden können und dadurch bestehende, auf fossilen und nicht nachhaltigen Rohstoffen beruhende Ansätze zu ersetzen.

### **Kurzfristige Umsetzung**

In der Technologieentwicklung muss unter den derzeitigen Rahmenbedingungen ein noch stärkerer Akzent als bisher auf die Entwicklung biobasierter Produkte mit hoher Wertschöpfung und besonderen Qualitäten und Funktionalitäten gelegt werden. Zurzeit wird nur ein ausreichender Pull-Effekt am Markt hervorgerufen, wenn biobasierte Materialien zusätzlich besondere Eigenschaften und verbesserte Funktionalitäten aufweisen, welche sie deutlich von fossilen Materialien abheben. Eine Möglichkeit zur Erweiterung des Eigenschaftsprofils kann beispielsweise durch die Funktionsintegration biologischer Komponenten (z. B. durch Enzyme) erreicht werden. Darüber hinaus ist es wichtig, neue Technologien zu etablieren und voranzubringen. Deshalb sollten neuartige, nachhaltige Produkte durch die Ausschöpfung des gesamten Potenzials biologischen Wissens entwickelt und Wege für einen nachhaltigen Lebensstil vorangetrieben werden. Als Beispiel seien alternative Proteine für eine Ernährung ohne Schlachtviehhaltung genannt, welche zu einem deutlich geringeren ökologischen Fußabdruck führen. Auch Entwicklungen im Bereich der Biologischen Transformation (Kap. 4.3) wie beispielsweise HyBECCS-Prozesse können einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und somit auch zur Nachhaltigkeit leisten. Somit sollten zukünftige Förderungen gezielt interdisziplinär ausgeschrieben und entsprechend bewertet werden.

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von biogenen Rohstoffen und dem Primat des »Food First« muss ein verstärkter Fokus auf die Erschließung von Reststoffen aus Land- und Forstwirtschaft, Industrie und Haushalten für die stoffliche und energetische Verwertung gelegt werden. Nicht vermeidbarer »Abfall« muss als Rohstoff für eine potenzielle zirkuläre Nutzung betrachtet werden. Hierzu bedarf es technologischer, organisatorischer und logistischer Innovationen, um bislang minderwertig genutzte »Abfälle« von wechselnder Qualität und Verfügbarkeit verwerten zu können. Es gilt, bioökonomi-

sche Verfahren zu entwickeln, mit denen ein breites Spektrum an variablen Reststoffen als Rohstoff für die industrielle Produktion von Produktgruppen, wie Chemikalien, Fasern und Kunststoffe, erschlossen werden kann.

Aus Sicht der zirkulären Bioökonomie sollte die Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoff für die Synthese von organischen Verbindungen intensiviert werden: Zum einen können durch die Erschließung dieser weiteren Kohlenstoffquelle Land- und Biomassenutzungskonflikte entschärft, Kohlenstoff in Sinne einer Kreislaufwirtschaft rezykliert und Beiträge dazu geleistet werden, Klimagasemissionen zu minimieren. Zum anderen sind zusätzlich zur Photosynthese mehrere Stoffwechselwege bekannt, mit denen Organismen mit Hilfe regenerativer Energiequellen CO<sub>2</sub> in hochwertige Chemikalien überführen können. Sie bilden den Ausgangspunkt für die Entwicklung entsprechender (bio)technologischer Verfahren und deren Skalierung in den industriellen Maßstab. Es besteht dringender Handlungsbedarf, ein technologieoffenes »Level-Playing-Field« herzustellen und biotechnologischen Ansätzen zur industriell relevanten CO<sub>2</sub>-Nutzung eine Chance zu eröffnen. Bisher werden einzelne Vorhaben auf der Ebene von EU, Bund und einiger Bundesländer gefördert. Hier bedarf es der Intensivierung und Bündelung der Förderung sowie des Community Building.

### **Mittelfristige Umsetzung**

Um biogene Roh- und Reststoffe möglichst vollumfänglich und nachhaltig zu nutzen, sollte eine intensivere Förderung von Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsprojekten (FuEul-Projekte) betrieben werden, die explizit darauf ausgerichtet sind, Biomasseerzeugung, -bereitstellung und -konversion miteinander zu verknüpfen. Als mögliche Themenschwerpunkte sind hier die Steigerung der Biomassequalität durch wissenschaftsbasierte Züchtung, Biotechnologie für industrielle Anwendungen und die Schaffung dezentraler Bioraffinerien im kleineren Maßstab in ländlichen Regionen zu nennen. Zur Anbahnung solcher Projekte muss zusätzlich die Vernetzung der Akteure aus Landwirtschaft, Verarbeitung und industrieller Konversion unterstützt werden, beispielsweise durch Vernetzungsveranstaltungen oder den Auf- und Ausbau von Matchmaking-Datenbanken, -Technologien und -Plattformen.

Eine stärkere Anwendungsorientierung der Forschung muss durch die Förderung von Projekten mit höherem Technologie-Reifegrad (Entwicklung Forschung bis TRL 7) unterstützt werden. Im Bereich der Nahrungsmittel sind hier Technologien zu ökologischeren konventionellen und alternativen Anbaumethoden wie Vertical Farming und Insect Farming sowie (Photo)-Bioreaktoren, die Bereitstellung von neuen (ggf. adaptiven) Verarbeitungs- und Sensorsystemen zur Herstellung sicherer und hochwertiger Lebensmittel oder Entwicklungen von alternativen Proteinquellen zu unterstützen. Für die stoffliche Nutzung von biogenen Rohstoffen oder Rest- und Abfallstoffen sind dies beispielsweise die Erzeugung von innovativen Biokunststoffen mit neuen Eigenschaften, bei deren Konzeption zukünftige Verwertungs- und Recyclingpfade bereits im Produktdesign vorgesehen sind. Zudem muss die Herstellung von solchen Materialien/Chemikalien mit Nachdruck verfolgt werden, welche CO<sub>2</sub> als Rohstoff nutzen und mit innovativen Verfahren, z. B. durch die Kombination von biologischen Katalysatoren und regenerativer Energie, gewonnen werden können. Demzufolge müssen maßgeschneiderte Programme und Instrumente, welche die spezifischen Bedarfe der jeweiligen Akteure entlang der Wertschöpfungskette abdecken, weiter ausgebaut werden. Nur so kann die notwendige Translation von Wissen zur Umsetzung und die breite Diffusion von Maßnahmen beschleunigt werden. Zudem können hierdurch Innovationshemmnisse abgebaut und kommerzielle Akteure zu Investitionen in bioökonomische Verfahren motiviert werden. Bei Technologien und Produkten, die bereits ein hohes TRL besitzen, bei denen dennoch keine industrielle Umsetzung erfolgt ist, liegt dies oft daran, dass kein Return-Of-Invest im erforderlichen Zeitraum zu erwarten ist, da

dies die Rahmen- und Marktbedingungen nicht zulassen. Hier gilt es, wie bereits in Abschnitt 5.1 erwähnt, die Rahmenbedingungen zu verbessern.

## Langfristige Umsetzung

Ziel der zirkulären Bioökonomie muss es sein, die Kreislauffähigkeit der bioökonomischen Produkte anzustreben und in langfristiger Perspektive zu gewährleisten. Daher muss die FuE-Förderung in diesem Bereich weiter intensiviert werden. Der effiziente und kreislauffähige Einsatz von Ressourcen sollte bereits beim Produktdesign mitgedacht werden. Damit wird es möglich, Werkstoffe und daraus hergestellte Produkte möglichst lange im Kreislauf zu halten. Als Beispiel wäre hier die Kreislaufführung von Verbundwerkstoffen in wiederverwertbaren Bausteinen zu nennen. Der Design-Prozess sollte darauf abzielen, eine möglichst lange Lebensdauer sowie eine einfache Wartungsfähigkeit und Reparierbarkeit zu erreichen, um den Wiedereinsatz der Produkte zu erleichtern. Auch die Materialauswahl spielt für die Kreislauffähigkeit eine wichtige Rolle: Ein Wiedereinsatz der Materialien sollte ohne Qualitätsverlust erfolgen und die Produkte sollen modular aufgebaut sein. Es bleibt zu beachten, dass Materialien bei jedem Recyclingzyklus an Qualität verlieren und nicht unbegrenzt im Kreislauf geführt werden können. Zur Etablierung eines nachhaltigen, vollständigen Kreislaufs, bei welchem alle Ressourcenströme aus wiedergewonnenen oder erneuerbaren Materialien stammen, beinhaltet dies auch die Notwendigkeit einer allgemeinen Reduzierung des Materialeinsatzes und des wirtschaftlichen Durchsatzes. Bis zur Realisierung einer kompletten Kreislauffähigkeit von bioökonomischen Produkten muss versucht werden, eine möglichst weitgehende Umsetzung zu erreichen.

Die Bioökonomie verfügt über ein breites Technologiereservoir, mit dem die Resilienz biobasierter Produktionssysteme bei gleichzeitiger Einhaltung der planetaren Grenzen und Belastbarkeit der Ökosysteme erhöht werden kann. Aufbauend auf Konzepten für resiliente biobasierte Produktionssysteme (Kap. 5.1) müssen Förderprogramme initiiert werden, die gezielt nur solche Forschungs- und Technologieansätze unterstützen, die die wirtschaftliche und ökologische Resilienz stärken.

## 5.3 Translation

Die Bioökonomie eröffnet mit ihren Technologien, Prozessen, Produkten und Dienstleistungen vielfältige Möglichkeiten den globalen Herausforderungen zu begegnen. Jedoch bedarf es dringend Innovationen und insbesondere deren Überführung in die gesellschaftliche und wirtschaftliche Praxis. Ein Fokus bei diesem Translationsprozess muss daher auf der Umsetzung in den Markt und dem Erwerben von gesellschaftlicher Akzeptanz liegen.

## Kurzfristige Umsetzung

Damit bioökonomische Technologien und Produkte in die breite Anwendung gelangen, braucht es gesellschaftliche Akzeptanz für diese Technologien und ihre industrielle Anwendung. Deshalb gilt es, den Dialog mit der Gesellschaft zu intensivieren und den gesellschaftlichen Diskurs zu fördern. Geeignete Kommunikationsformate müssen geschaffen und den Verbraucherinnen und Verbrauchern die Vorteile biobasierter Produkte und Verfahren erläutert werden, damit diese solche (ein)schätzen und ihre Wünsche und Ansprüche artikulieren können. In Verbindung mit Informationsbereitstellung und Wissensvermittlung ist ein weiterer zentraler Punkt, dass die gesellschaftlichen Zielvorstellungen, beispielsweise zu Landnutzung oder Biomasse- und Reststoffnutzungskon-

flikten, den Bürgerinnen und Bürgern verständlich dargelegt werden und in den politischen, technologischen und wirtschaftlichen Aktivitäten Berücksichtigung finden. Ein besonderer Fokus sollte darauf liegen, auf welche Art und Weise Diskurse geführt werden, welchen Konkretisierungsgrad deren Ergebnisse haben, wie die Ergebnisse von Forschung, Politik und Industrie aufgenommen werden, wie eine Verständigung erfolgt oder Konflikte im Bereich der Bioökonomie zu lösen sind. Ansatzpunkte sind beispielsweise (Online)-Bürgerdialoge und transparente und öffentlich frei zugängliche Informationskampagnen, um über Entwicklungen und Zielstellungen der Bioökonomie zu informieren. Die Einbindung von Best-Practice-Beispielen in solche Kampagnen bietet sich insbesondere an, um Informationen für Bürgerinnen und Bürger verständlicher darzustellen.

### **Mittelfristige bis langfristige Umsetzung**

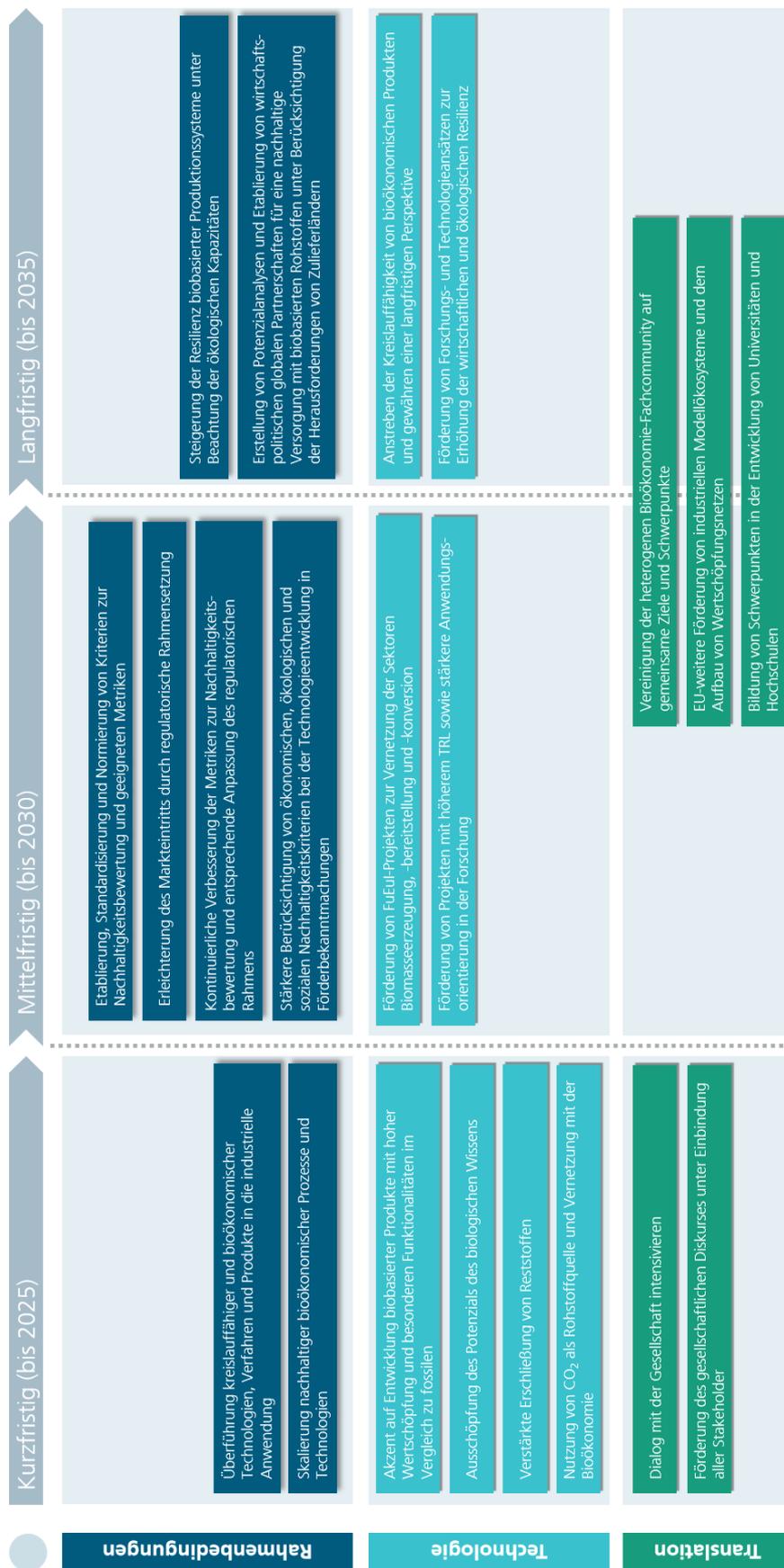
Es müssen Maßnahmen zur Fokussierung aller Akteure der bisher heterogenen Bioökonomie-Community auf gemeinsame Ziele und Schwerpunkte festgelegt werden. Ein Fokus sollte darauf liegen, wie solche Ziele operationalisiert werden und welche Zielrichtungen anzugehen sind. Hierzu bedarf es der Förderung einer offenen Innovations- und Kommunikationskultur zwischen Forschung, Unternehmen, Gesellschaft und Politik. Zudem sollte der inter- und transdisziplinäre Austausch zwischen Wissenschaft und Wirtschaft durch Interaktionsplattformen, wie beispielsweise regionale Kompetenz- und Transferzentren, gefördert werden. Bei der Politik ist zu beachten, dass die verschiedenen Bereiche der Bioökonomie dazu führen, dass viele Ressorts in Entscheidungen eingebunden sind (z. B. Agrar-, Forst-, Wirtschafts-, Forschungs- sowie Energie- und Umweltpolitik). Von den Ressorts werden dabei teilweise unterschiedliche politische Interessen vertreten und Themen priorisiert, was zu unterschiedlichen Leitbildern und Zielsetzungen innerhalb der Bioökonomie führt. Ziel muss eine abgestimmte und kohärente Bioökonomiepolitik u. a. auch bei der Flächenbereitstellung zur Biomassennutzung sein. Um dies zu erreichen, müssen Ressort- und Ebenen-übergreifende politische Entscheidungen getroffen und kommuniziert werden. Auf Bundesebene lassen sich erste Ansätze in der interministeriellen Arbeitsgruppe zur Bioökonomie erkennen, ähnliche Ansätze sollten auch auf Landesebene sowie zwischen Landes- und Bundesebene vorangetrieben werden.

Industrielle Modellökosysteme und der Aufbau von Wertschöpfungsnetzen sollten EU-weit gefördert werden. Es müssen Überlegungen angestellt werden, wo zentrale Bio-raffinerien einen Mehrwert bieten und wo dezentrale, regionale Bio-raffinerien zu bevorzugen sind (vor allem hinsichtlich der möglichen Abnehmer der Produkte aus der chemischen Industrie und weiterer chemischer Pilotanlagen). Ein Erfahrungsaustausch mit und zwischen den regionalen Initiativen und verschiedenen Modellregionen, wie beispielsweise Öko-Modellregionen oder Bioenergiedörfer, sollte weiter fortgesetzt werden, da sich bereits in der Vergangenheit gezeigt hat, dass sich auf diese Weise Akteure vor Ort motivieren lassen, um gemeinsame Visionen für die regionale Entwicklung zu erarbeiten. Zudem kann eine hohe Identifikation von Bürgerinnen und Bürgern mit dem jeweiligen Ziel erreicht werden. Die existierenden Modellvorhaben in der Bioökonomie sollten daher mit hoher Priorität fortgesetzt, ihre Erfolgsfaktoren erhoben und in der breiteren Fläche um weitere regionale Vorhaben ergänzt werden. Darüber hinaus sollten Dialog- und Beteiligungsformate für eine breite Öffentlichkeit als fester Bestandteil regionaler Modellvorhaben implementiert werden.

Im Bereich der Aus- und Weiterbildung müssen entsprechende Schwerpunkte in der Entwicklung von Universitäten und Hochschulen gelegt werden. Die Bioökonomie muss über einzelne Hochschulen hinaus stärker in die allgemeine und berufliche Bildung integriert werden. Laut einer Umfrage der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2022 wird es bis 2030 einen Anstieg in der Nachfrage von Personen mit höheren Quali-

fikationen in Bereichen der Bioökonomie geben (u. a. Lebensmittelindustrie, Forstwirtschaft, Chemie und chemische Technologie, Mikro- und Biotechnologie, Materialwissenschaften und Produktion). Hierbei werden digitale und industrielle Technologien, Geschäftsmodelle sowie sozioökonomische Entwicklungen die benötigten Qualifikationen beeinflussen. Ansätze für mögliche Schwerpunkte liegen somit u. a. in den Bereichen systemisches Denken, technologische und digitale Kompetenzen sowie der Einbeziehung ethischer Aspekte bei der Nutzung biologischer Ressourcen. In Hochschulprogrammen empfiehlt es sich, transdisziplinäre Lehrpläne auszuarbeiten, um die verschiedenen Schwerpunkte der Bioökonomie miteinander zu verknüpfen. Dies betrifft beispielsweise die bereits in Kap. 5.2 adressierten Technologien in den Bereichen nachhaltige Alternativen für fossile Materialien, Kreislaufführung und Wertschöpfung von Reststoffströmen. Um die Nachfrage nach qualifizierten Personen zu decken, muss zudem eine bessere Zusammenarbeit zwischen Hochschuleinrichtungen, Wirtschaft, Politik und Akteuren aus der Zivilgesellschaft stattfinden. Vorteile der Bioökonomie können durch Sensibilisierungsmaßnahmen und die Einbettung der Bioökonomie in die Berufsberatung für Jugendliche und Erwachsene hervorgehoben werden. Außerdem stärken langfristige Qualifikationsverpflichtungen im Rahmen von Bioökonomiestrategien entsprechende qualifikationsbezogene Initiativen.

Eine zusammenfassende Darstellung aller aufgeführten Empfehlungen für die hier benannten drei Themenfelder ist Abb. 6 zu entnehmen.



Handlungsempfehlungen

Abb. 6 Übersicht der Handlungsempfehlungen

## Literatur

- [1] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *Nationale Bioökonomiestrategie*. [Online]. Verfügbar unter: [https://biooekonomie.de/sites/default/files/2022-04/bmbf\\_nationale\\_biooekonomiestrategie\\_langfassung\\_DE\\_22.pdf](https://biooekonomie.de/sites/default/files/2022-04/bmbf_nationale_biooekonomiestrategie_langfassung_DE_22.pdf) (Zugriff am: 28. September 2022).
- [2] United Nations, *Transforming our world – The 2030 Agenda for sustainable development*. [Online]. Verfügbar unter: [https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030 Agenda for Sustainable Development web.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf) (Zugriff am: 28. September 2022).
- [3] United Nations, *Paris Agreement*. [Online]. Verfügbar unter: [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf) (Zugriff am: 28. September 2022).
- [4] P. Stegmann, M. Londo und M. Junginger, „The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters“, *Resources, Conservation & Recycling: X*, Jg. 6, S. 100029, 2020, doi: 10.1016/j.rcrx.2019.100029.
- [5] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, *European bioeconomy policy: stocktaking and future developments: report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/997651> (Zugriff am: 28. September 2022).
- [6] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, *Review of the 2012 European Bioeconomy Strategy*. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/086770> (Zugriff am: 28. September 2022).
- [7] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, *Innovating for sustainable growth: a bioeconomy for Europe*. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/6462> (Zugriff am: 28. September 2022).
- [8] Landtag Brandenburg, *Beschluss des Landtages Brandenburg – Eine Bioökonomie-Strategie für Brandenburg*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.parlamentsdokumentation.brandenburg.de/starweb/LBB/ELVIS/parladedoku/w7/beschlpr/anlagen/4495-B.pdf> (Zugriff am: 12. Oktober 2022).
- [9] Staatskanzlei und Ministerium für Kultur des Landes Sachsen-Anhalt, *Bioökonomie als Treiber für Wertschöpfung und Innovation*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.investieren-in-sachsen-anhalt.de/fileadmin/SOM/SOM\\_Uebergreifend/Dateien\\_Bilder\\_Nachrichten\\_Termine/2021/04-06/Strategiepapier\\_Biooekonomie\\_als\\_Treiber\\_fuer\\_Wertschoepfung\\_und\\_Innovation.pdf](https://www.investieren-in-sachsen-anhalt.de/fileadmin/SOM/SOM_Uebergreifend/Dateien_Bilder_Nachrichten_Termine/2021/04-06/Strategiepapier_Biooekonomie_als_Treiber_fuer_Wertschoepfung_und_Innovation.pdf) (Zugriff am: 12. Oktober 2022).
- [10] Ministerium für ländlichen Raum und Verbraucherschutz und Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, *Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg*. [Online]. Verfügbar unter: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mum/intern/Dateien/Dokumente/6\\_Wirtschaft/Biooekonomie/Landesstrategie-Nachhaltige-Biooekonomie-barrierefrei.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mum/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Biooekonomie/Landesstrategie-Nachhaltige-Biooekonomie-barrierefrei.pdf) (Zugriff am: 12. Oktober 2022).
- [11] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, *Bioökonomiestrategie Bayern – Zukunft. Bioökonomie. Bayern*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user\\_upload/stmwi/e-paper/index.php?catalog=biooekonomie\\_2020](https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/e-paper/index.php?catalog=biooekonomie_2020) (Zugriff am: 12. Oktober 2022).
- [12] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *Nationale Forschungsstrategie Bioökonomie 2030. Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft*. [Online]. Ver-

- füßbar unter: [https://biooekonomie.de/sites/default/files/files/2016-09/nfsb\\_2030.pdf](https://biooekonomie.de/sites/default/files/files/2016-09/nfsb_2030.pdf) (Zugriff am: 28. September 2022).
- [13] Cologne Paper, *En Route to the Knowledge-Based-Bio-Economy*. [Online]. Verfügbar unter: [https://dechema.de/dechema\\_media/Downloads/Positionspapiere/Cologne\\_Paper.pdf](https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Cologne_Paper.pdf) (Zugriff am: 28. September 2022).
- [14] Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und –strategien, *Kurzstudie: Zukunftsfähige Bioökonomie. Endbericht für den NABU – Naturschutzbund Deutschland e.V.* [Online]. Verfügbar unter: [https://iinas.org/app/downloads\\_from\\_old\\_page/bio/IINAS\\_2021\\_BOe\\_Nachhaltig\\_NABU.pdf](https://iinas.org/app/downloads_from_old_page/bio/IINAS_2021_BOe_Nachhaltig_NABU.pdf) (Zugriff am: 28. September 2022).
- [15] S. Bringezu et al., „Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/11591>. Zugriff am: 28. September 2022.
- [16] Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie, *Biomasse Stoffströme in der deutschen Bioökonomie*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmel.de/SharedDocs/Bilder/DE/Landwirtschaft/Nachwachsende-Rohstoffe/stoffstrom-biooekonomie-deutschland.html> (Zugriff am: 4. Oktober 2022).
- [17] J. Wackerbauer et al., *Ermittlung wirtschaftlicher Kennzahlen und Indikatoren für ein Monitoring des Voranschreitens der Bioökonomie: Schlussbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. München: ifo Institut Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V, 2019.
- [18] European Parliament and Council of the European Union, *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable resources*. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02018L2001-20220607&from=EN> (Zugriff am: 28. September 2022).
- [19] H. Fehrenbach et al., *BIOMASSEKASKADEN - Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis. Im Auftrag des Umweltbundesamtes*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2017-06-13\\_texte\\_53-2017\\_biokaskaden\\_abschlussbericht.pdf](https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/2017-06-13_texte_53-2017_biokaskaden_abschlussbericht.pdf) (Zugriff am: 28. September 2022).
- [20] A. Schüch und C. Henning, „Abfall- und reststoffbasierte Bioökonomie“ in *Das System Bioökonomie*, S. 125–146.
- [21] A. Brosowski, „National resource monitoring for biogenic residues, by-products and wastes“. Dissertation, Deutsches Biomasseforschungszentrum; Universität Leipzig.
- [22] Acatech, *CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie: Analyse, Handlungsoptionen und Empfehlungen*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/09/acatech\\_POSITION\\_CCU\\_CCS\\_WEB-002\\_final.pdf](https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/09/acatech_POSITION_CCU_CCS_WEB-002_final.pdf) (Zugriff am: 28. September 2022).
- [23] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, *CO<sub>2</sub>-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland - Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu\\_paper\\_03\\_2019\\_CO2-Quellen-f%C3%BCr-PtX.pdf](https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_paper_03_2019_CO2-Quellen-f%C3%BCr-PtX.pdf) (Zugriff am: 28. September 2022).
- [24] S. Bringezu, S. Kaiser und S. Turnau, „Zukünftige Nutzung von CO<sub>2</sub> als Rohstoffbasis der deutschen Chemie- und Kunststoffindustrie“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://kobra.uni-kassel.de/themes/Mirage2/scripts/mozilla-pdf.js/web/viewer.html?file=/bitstream/handle/123456789/11483/ZukuenftigeNutzungVonCO2AlsRohstoffbasisSummary.pdf?sequence=5&isAllowed=y>. Zugriff am: 28. September 2022.

- [25] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, *Klimaschutz in Zahlen: Aktuelle Emissionstrends und Klimaschutzmaßnahmen in Deutschland - Ausgabe 2022*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/klimaschutz-in-zahlen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/klimaschutz-in-zahlen.pdf?__blob=publicationFile&v=4) (Zugriff am: 30. September 2022).
- [26] Trading Economics, *World Food Price Index*. [Online]. Verfügbar unter: <https://tradingeconomics.com/world/food-price-index#:~:text=Food%20Price%20Index%20in%20World,for%20World%20Food%20Price%20Index>. (Zugriff am: 30. September 2022).
- [27] Trading Economics, *Rice - Global Market Price*. [Online]. Verfügbar unter: <https://tradingeconomics.com/commodity/rice> (Zugriff am: 30. September 2022).
- [28] Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, *The State of Food Security and Nutrition in the World 2021*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fao.org/3/cb4474en/online/cb4474en.html> (Zugriff am: 30. September 2022).
- [29] P. Eisner, U. Weisz, R. Osen und S. Mittermaier, „Innovative Food Products“ in *Biological Transformation*, R. Neugebauer, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 37–62, doi: 10.1007/978-3-662-59659-3\_4.
- [30] O. Müller und M. Krawinkel, „Malnutrition and health in developing countries“ (eng), *CMAJ : Canadian Medical Association journal = journal de l'Association medicale canadienne*, Jg. 173, Nr. 3, S. 279–286, 2005, doi: 10.1503/cmaj.050342.
- [31] A. J. Prendergast und P. Kelly, „Interactions between intestinal pathogens, enteropathy and malnutrition in developing countries“ (eng), *Current opinion in infectious diseases*, Jg. 29, Nr. 3, S. 229–236, 2016, doi: 10.1097/QCO.0000000000000261.
- [32] J. Schmidhuber und F. N. Tubiello, „Global food security under climate change“ (eng), *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Jg. 104, Nr. 50, S. 19703–19708, 2007, doi: 10.1073/pnas.0701976104.
- [33] M. Padilla, S. Mok, H. Raj, V. Latypov und M. Bescansa, „Urban farming in the city of tomorrow: Assessing the global landscape on urban food and resource production with the focus on indoor plant and microalgae cultivation“, Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO, Stuttgart, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/e4afc949-5d63-4b44-b9b7-0e45fb451318/content>. Zugriff am: 30. September 2022.
- [34] L. M. Jaacks *et al.*, „The obesity transition: stages of the global epidemic“, *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, Jg. 7, Nr. 3, S. 231–240, 2019, doi: 10.1016/S2213-8587(19)30026-9.
- [35] A. Afshin *et al.*, „Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017“, *The Lancet*, Jg. 393, Nr. 10184, S. 1958–1972, 2019, doi: 10.1016/S0140-6736(19)30041-8.
- [36] A. G. Ampofo und E. B. Boateng, „Beyond 2020: Modelling obesity and diabetes prevalence“ (eng), *Diabetes research and clinical practice*, Jg. 167, S. 108362, 2020, doi: 10.1016/j.diabres.2020.108362.
- [37] Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO, „The State of Food and Agriculture 2019: Moving Forward on Food Loss and Waste Reduction“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>. Zugriff am: 30. September 2022.
- [38] X. Zhu und E. C. van Ierland, „Protein Chains and Environmental Pressures: A Comparison of Pork and Novel Protein Foods“, *Environmental Sciences*, Jg. 1, Nr. 3, S. 254–276, 2004, doi: 10.1080/15693430412331291652.

- [39] A. Popp, H. Lotze-Campen und B. Bodirsky, „Food consumption, diet shifts and associated non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases from agricultural production“, *Global Environmental Change*, Jg. 20, Nr. 3, S. 451–462, 2010, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2010.02.001.
- [40] R. T. Gahukar, „Edible Insects Farming: Efficiency and Impact on Family Livelihood, Food Security, and Environment Compared With Livestock and Crops“ in *Insects as Sustainable Food Ingredients: production, processing and food applications*, A. T. Dossey, Morales-Ramos Juan A., Rojas und M. Guadalupe, Hg., Academic Press, 2016, S. 85–111, doi: 10.1016/B978-0-12-802856-8.00004-1.
- [41] K. J. Hawkey, C. Lopez-Viso, J. M. Brameld, T. Parr und A. M. Salter, „Insects: A Potential Source of Protein and Other Nutrients for Feed and Food“ (eng), *Annual review of animal biosciences*, Jg. 9, S. 333–354, 2021, doi: 10.1146/annurev-animal-021419-083930.
- [42] A. T. Dossey, Morales-Ramos Juan A., Rojas und M. Guadalupe, Hg., *Insects as Sustainable Food Ingredients: production, processing and food applications*. Academic Press, 2016.
- [43] Technical Research Centre of Finland, *VTT develops raw materials for meatballs and falafel from mealworms and crickets*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.newfoodmagazine.com/news/29348/vtt-raw-materials-meatballs-falafel-crickets/> (Zugriff am: 30. September 2022).
- [44] Étude Nutrinet Santé, *Nutrition et Santé: la recherche a besoin de vous!* [Online]. Verfügbar unter: <https://etude-nutrinet-sante.fr/> (Zugriff am: 4. Oktober 2022).
- [45] C. A. Monteiro, J.-C. Moubarac, R. B. Levy, D. S. Canella, M. L. C. Da Louzada und G. Cannon, „Household availability of ultra-processed foods and obesity in nineteen European countries“ (eng), *Public health nutrition*, Jg. 21, Nr. 1, S. 18–26, 2018, doi: 10.1017/S1368980017001379.
- [46] C. Göbel, N. Langen, A. Blumenthal, P. Teitscheid und G. Ritter, „Cutting Food Waste through Cooperation along the Food Supply Chain“, *Sustainability*, Jg. 7, Nr. 2, S. 1429–1445, 2015, doi: 10.3390/su7021429.
- [47] V. Narisetty *et al.*, „Technological advancements in valorization of second generation (2G) feedstocks for bio-based succinic acid production“ (eng), *Bioresource technology*, Jg. 360, S. 127513, 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127513.
- [48] R. Nitzsche, H. Etzold, M. Verges, A. Gröngröft und M. Kraume, „Demonstration and Assessment of Purification Cascades for the Separation and Valorization of Hemicellulose from Organosolv Beechwood Hydrolyzates“ (eng), *Membranes*, Jg. 12, Nr. 1, 2022, doi: 10.3390/membranes12010082.
- [49] S. Dörsam *et al.*, „Sustainable carbon sources for microbial organic acid production with filamentous fungi“ (eng), *Biotechnology for biofuels*, Jg. 10, S. 242, 2017, doi: 10.1186/s13068-017-0930-x.
- [50] T. R. de Castro, D. C. de Macedo, D. M. de Genaro Chiroli, R. C. Da Silva und S. M. Tebcherani, „The Potential of Cleaner Fermentation Processes for Bioplastic Production: A Narrative Review of Polyhydroxyalkanoates (PHA) and Polylactic Acid (PLA)“, *J Polym Environ*, Jg. 30, Nr. 3, S. 810–832, 2022, doi: 10.1007/s10924-021-02241-z.
- [51] K. J. Jem und B. Tan, „The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid)“, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Jg. 3, Nr. 2, S. 60–70, 2020, doi: 10.1016/j.aiepr.2020.01.002.
- [52] Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, *Produktionslinie für neuartige Biokunststoffe eröffnet*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iap.fraunhofer.de/de/Pressemitteilungen/2022/produktionslinie-fuer-neuartige-biokunststoffe-eroeffnet.html> (Zugriff am: 29. September 2022).
- [53] A. Piontek und P. Mörbitz, „PLA in technical applications“, *Bioplastics magazine*, Nr. 3, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/419677>
- [54] Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV, *Nachhaltige Verwertungsstrategien für Produkte und Abfälle aus biobasierten Kunststoffen –*

- SustRecPLA. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/recycling-von-verpackungen/sustrecpla.html> (Zugriff am: 29. September 2022).
- [55] V. Bachmüller et al., „Biosinn - Steckbriefe sinnvoll biologisch abbaubarer Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://renewable-carbon.eu/publications/product/biosinn-steckbriefe-sinnvoll-biologisch-abbaubarer-produkte-auf-basis-von-nachwachsenden-rohstoffen/>
- [56] Plastics Europe, *Plastics - the Facts 2021 - An analysis of European plastics production, demand and waste data*. [Online]. Verfügbar unter: [https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/AF-Plastics-the-facts-2021\\_250122.pdf](https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/AF-Plastics-the-facts-2021_250122.pdf) (Zugriff am: 28. Juli 2022).
- [57] Greenpeace e. V., *Öl.Report 2016*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.greenpeace.de/publikationen/oel-report-2016-greenpeace-20160108-neu.pdf> (Zugriff am: 29. September 2022).
- [58] R. Geyer, J. R. Jambeck und K. L. Law, „Production, use, and fate of all plastics ever made“ (eng), *Science advances*, Jg. 3, Nr. 7, e1700782, 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [59] European Bioplastics e. V., *Bioplastics market data*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.european-bioplastics.org/market/> (Zugriff am: 30. September 2022).
- [60] Frost & Sullivan, „Global Bio-plastic and Bio-plastic Additives Market, Forecast to 2023“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.marketresearch.com/Frost-Sullivan-v383/Global-Bio-plastic-Additives-Forecast-12958399/>. Zugriff am: 29. September 2022.
- [61] Frost & Sullivan, „Global Plastics and Composites Outlook, 2022“, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://store.frost.com/global-plastics-and-composites-outlook-2022.html>. Zugriff am: 29. September 2022.
- [62] Emergen Research, „Bioplastics Market Trend | Industry Forecast 2021-2030“, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.emergenresearch.com/industry-report/bioplastics-market>. Zugriff am: 29. September 2022.
- [63] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, *Artikel Wirtschaftsbranchen - Bauwirtschaft*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-bauwirtschaft.html> (Zugriff am: 29. September 2022).
- [64] Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut WKI, *Schwimmende Biotope für künstliche Wasserwege*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.grueneswasser.de/> (Zugriff am: 29. September 2022).
- [65] Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, *Generative Fertigung von Schallabsorberplatten auf Basis von Pilzen aus der Ordnung der Stielporlingsverwandten - Akronym: FungiFacturing*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22013418> (Zugriff am: 22. September 2022).
- [66] Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, *Biomaterialien aus Pilzmyzel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iap.fraunhofer.de/de/Projekte/Biomaterialien-aus-Pilzmyzel.html> (Zugriff am: 29. September 2022).
- [67] Umweltbundesamt, *Kohlendioxid-Emissionen 2021*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/kohlendioxid-emissionen#kohlendioxid-emissionen-2021> (Zugriff am: 22. September 2022).
- [68] International Energy Agency, „Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 - Global emissions rebound sharply to highest level ever“, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3086240-732b-4f6a-89d7-db01be018f5e/GlobalEnergyReviewCO2Emissionsin2021.pdf>. Zugriff am: 22. September 2022.

- [69] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, *Klimaschutzgesetz 2021 - Generationenvertrag für das Klima*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (Zugriff am: 12. Oktober 2022).
- [70] V. Masson-Delmotte *et al.*, *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf) (Zugriff am: 12. Oktober 2022).
- [71] Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, *So schnell tickt die CO<sub>2</sub>-Uhr*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html> (Zugriff am: 12. Oktober 2022).
- [72] A. Jacob, B. Ashok, A. Alagumalai, O. H. Chyuan und P. T. K. Le, „Critical review on third generation micro algae biodiesel production and its feasibility as future bioenergy for IC engine applications“, *Energy Conversion and Management*, Jg. 228, S. 113655, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113655.
- [73] S.-H. Ho, C.-Y. Chen, D.-J. Lee und J.-S. Chang, „Perspectives on microalgal CO<sub>2</sub>-emission mitigation systems -a review“ (eng), *Biotechnology advances*, Jg. 29, Nr. 2, S. 189–198, 2011, doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.11.001.
- [74] A. K. Koyande, K. W. Chew, K. Rambabu, Y. Tao, D.-T. Chu und P.-L. Show, „Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans“, *Food Science and Human Wellness*, Jg. 8, Nr. 1, S. 16–24, 2019, doi: 10.1016/j.fshw.2019.03.001.
- [75] R. Kratzer und M. Murkovic, „Food Ingredients and Nutraceuticals from Microalgae: Main Product Classes and Biotechnological Production“ (eng), *Foods (Basel, Switzerland)*, Jg. 10, Nr. 7, 2021, doi: 10.3390/foods10071626.
- [76] Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, *Mikroalgen: Mögliche Perspektiven für die Landwirtschaft*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.igb.fraunhofer.de/de/presse-medien/presseinformationen/2022/mikroalgen-moegliche-perspektiven-fuer-die-landwirtschaft.html> (Zugriff am: 22. September 2022).
- [77] G. Kumar, A. Shekh, S. Jakhu, Y. Sharma, R. Kapoor und T. R. Sharma, „Bioengineering of Microalgae: Recent Advances, Perspectives, and Regulatory Challenges for Industrial Application“ (eng), *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, Jg. 8, S. 914, 2020, doi: 10.3389/fbioe.2020.00914.
- [78] J. Wei *et al.*, „Directly converting CO<sub>2</sub> into a gasoline fuel“ (eng), *Nature communications*, Jg. 8, S. 15174, 2017, doi: 10.1038/ncomms15174.
- [79] B. Stefansson und Ó. Sigurbjörnsson, „Sustainable Fuel from CO<sub>2</sub> and Electricity: A Commercial Scale Solution Ready to Meet Future Challenges“ in *Zukünftige Kraftstoffe*, W. Maus, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 464–479, doi: 10.1007/978-3-662-58006-6\_20.
- [80] J. Karl und T. Pröll, „Steam gasification of biomass in dual fluidized bed gasifiers: A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 98, S. 64–78, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.09.010.
- [81] N. Schmitt, A. Apfelbacher, N. Jäger, R. Daschner, F. Stenzel und A. Hornung, „Thermo-chemical conversion of biomass and upgrading to biofuel: The Thermo-Catalytic Reforming process – A review“, *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, Jg. 13, Nr. 3, S. 822–837, 2019, doi: 10.1002/bbb.1980.
- [82] R. Daschner, T. Hornung, M. Ouadi, C. Tuck und S. Capaccioli, „TO-SYN-FUEL, The Demonstration of Waste Biomass to Synthetic Fuels and Green Hydrogen“, *European Commission Horizon2020 programme. Impact*, Nr. 6, S. 73–75, 2018.
- [83] P. Schmidt, V. Batteiger, A. Roth, W. Weindorf und T. Raksha, „Power-to-Liquids as Renewable Fuel Option for Aviation: A Review“, *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 90, 1-2, S. 127–140, 2018, doi: 10.1002/cite.201700129.

- [84] J. J. Manyà, „Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs“ (eng), *Environmental science & technology*, Jg. 46, Nr. 15, S. 7939–7954, 2012, doi: 10.1021/es301029g.
- [85] R. Mieke *et al.*, „The biological transformation of industrial manufacturing – Technologies, status and scenarios for a sustainable future of the German manufacturing industry“, *Journal of Manufacturing Systems*, Jg. 54, S. 50–61, 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.11.006.
- [86] T. Bauernhansl, C. Brecher, W.-G. Drossel, P. Gumbsch, M. ten Hompel und M. Wolperdinger, Hg., *Biointelligenz: Eine neue Perspektive für nachhaltige industrielle Wertschöpfung: Ergebnisse der Voruntersuchung zur biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung (BIOTRAIN)*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2019.
- [87] R. Mieke *et al.*, „The biological transformation of the manufacturing industry – envisioning biointelligent value adding“, *Procedia CIRP*, Jg. 72, S. 739–743, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.04.085.
- [88] R. Mieke *et al.*, „The Biological Transformation of Industrial Manufacturing-Future Fields of Action in Bioinspired and Bio-based Production Technologies and Organization“, *Procedia Manufacturing*, Jg. 39, S. 737–744, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.437.
- [89] K. Protte und O. Schwarz, „Additive manufacturing with chitin - Investigating the feasibility of an enzyme-assisted material approach for more sustainability“, *Procedia CIRP*, Jg. 107, S. 149–154, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.04.025.
- [90] A. Böker, „Biopolymere – Funktionsträger in der Materialforschung“ in *Biologische Transformation*, R. Neugebauer, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 133–163, doi: 10.1007/978-3-662-58243-5\_8.
- [91] J. Full, R. Mieke, S. Kiemel, T. Bauernhansl und A. Sauer, „The Biological Transformation of Energy Supply and Storage – Technologies and Scenarios for Biointelligent Value Creation“, *Procedia Manufacturing*, Jg. 39, S. 1204–1214, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.349.
- [92] J. Full, S. Merseburg, R. Mieke und A. Sauer, „A New Perspective for Climate Change Mitigation—Introducing Carbon-Negative Hydrogen Production from Biomass with Carbon Capture and Storage (HyBECCS)“, *Sustainability*, Jg. 13, Nr. 7, S. 4026, 2021, doi: 10.3390/su13074026.
- [93] J. Full, M. Trauner, R. Mieke und A. Sauer, „Carbon-Negative Hydrogen Production (HyBECCS) from Organic Waste Materials in Germany: How to Estimate Bioenergy and Greenhouse Gas Mitigation Potential“, *Energies*, Jg. 14, Nr. 22, S. 7741, 2021, doi: 10.3390/en14227741.
- [94] R. Mieke *et al.*, „Enabling bidirectional real time interaction between biological and technical systems: Structural basics of a control oriented modeling of biology-technology-interfaces“, *Procedia CIRP*, Jg. 81, S. 63–68, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.03.012.
- [95] J. Full, Y. Baumgarten, L. Delbrück, A. Sauer und R. Mieke, „Market Perspectives and Future Fields of Application of Odor Detection Biosensors within the Biological Transformation-A Systematic Analysis“ (eng), *Biosensors*, Jg. 11, Nr. 3, 2021, doi: 10.3390/bios11030093.
- [96] J. Full, Y. Baumgarten, Y. Dokur, R. Mieke und A. Sauer, „Biogas Plants as Hydrogen Production Facilities and Greenhouse Gas Sinks: Technology Comparison, Challenges and Potentials for Carbon Negative Hydrogen Production (HyBECCS)“, *Procedia CIRP*, Jg. 107, S. 185–190, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.04.031.
- [97] J. Full, S. Ziehn, M. Geller, R. Mieke und A. Sauer, „Carbon-negative hydrogen production: Fundamentals for a techno-economic and environmental assessment of HyBECCS approaches“, *GCB Bioenergy*, Jg. 14, Nr. 5, S. 597–619, 2022, doi: 10.1111/gcbb.12932.

## Danksagung

Das Fraunhofer Strategische Forschungsfeld Bioökonomie und das Projektteam bedanken sich bei den nachfolgend genannten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern für ihre Zeit und ihre Beiträge zu dieser Roadmap. Mit ihrer Arbeit, ihren Ideen und ihren konstruktiven Hinweisen haben sie einen wesentlichen Beitrag zur Roadmap geleistet:

- A. Apfelbacher, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
- J. Balko, Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP
- T. Büsse, Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP
- H.-A. Christ, Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut WKI
- K. Frick, Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB
- V. Heil, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
- T. Herfellner, Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV
- S. Kabasci, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
- S. Kaiser, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
- G. Kubik, Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB
- A. Mäurer, Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV
- M. Meiller, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
- C. Rasche, Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB
- M. Richter, Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB
- R. Rosencrantz, Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP
- A. Roth, Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB
- S. Schillberg, Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie IME
- C. Schulze Gronover, Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Oekologie IME
- T. Schulzke, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
- S. Sydow, Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut WKI
- V. Thome, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
- S. Torkler, Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB