



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Bioökonomie in Deutschland

Chancen für eine biobasierte und nachhaltige Zukunft



Vorwort

Nachhaltigkeit und Klimaschutz sind die prägenden Themen des 21. Jahrhunderts. Knapper werdende Ressourcen, eine schwindende biologische Vielfalt und die Auswirkungen des Klimawandels stellen uns vor große Herausforderungen. Gleichzeitig soll eine wachsende Weltbevölkerung ernährt und wirtschaftlicher Wohlstand ermöglicht werden.

Zur Bewältigung der globalen Herausforderungen muss sich unsere Wirtschafts- und Lebensweise grundlegend ändern. Dieser industrielle und gesellschaftliche Wandel hat bereits eingesetzt und gewinnt an Dynamik: Nachhaltige und klimaneutrale Geschäftsmodelle auf der Basis von erneuerbaren Ressourcen gewinnen an Bedeutung.

Die Bioökonomie versteht sich als nachhaltiges Wirtschaftskonzept. Sie nutzt biologische Ressourcen und das Wissen darüber, um mithilfe innovativer Technologien Produkte und Prozesse zu entwickeln. Auf der Basis nachwachsender Rohstoffe entstehen Lebensmittel, Materialien und Energie. Ziel einer biobasierten Wirtschaft ist eine nachhaltige und klimaneutrale Wirtschaftsweise, die Ökologie und Ökonomie klug miteinander verbindet und die sich an natürlichen Stoffkreisläufen orientiert.

Deutschland ist international Vorreiter in Sachen Bioökonomie. Bereits seit den 1990er Jahren unterstützt die Bundesregierung den Weg in eine biobasierte Wirtschaft mit Strategien und Förderprogrammen. Im Januar 2020 wurde die neue Nationale Bioökonomiestrategie veröffentlicht. Sie setzt den Rahmen für eine nachhaltige

Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen und für umweltschonende und naturverträgliche Produktionsverfahren in allen Wirtschaftsbereichen. Mit dem Weg in eine kreislauforientierte Bioökonomie leistet Deutschland einen Beitrag zum Erreichen der UN-Nachhaltigkeitsziele und stellt die Weichen für die Technologien und Arbeitsplätze von morgen.

Federführend für die Umsetzung der Bioökonomiestrategie sind das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Mit Blick auf die wichtigsten Wirtschaftsbranchen sowie auf zentrale Konzepte, Ressourcen und Produktionsverfahren beschreibt diese Broschüre, wo Deutschland beim Aufbau einer nachhaltigen Bioökonomie steht. Sie stellt vielversprechende Forschungsprojekte vor. Sie gibt einen Einblick in aktuelle Innovationsprozesse in verschiedenen Branchen. Zahlreiche der beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsprojekte werden von BMBF und BMEL gefördert.

So wird anschaulich, wie vielfältig die verfolgten Ansätze sind, wo biobasiertes Wirtschaften in der Industrie und in unserem Alltag bereits Realität ist, und wie die Bioökonomie zum Baustein eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems werden kann.

Ihr Bundesministerium für Bildung und Forschung und
Ihr Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

Inhaltsverzeichnis

Bioökonomie – eine Einführung	2
Nachhaltige Bioökonomie als Ziel	8
Die Rohstoffquellen der Bioökonomie	14
Kreislaufbasierte Bioproduktion	20
Branchen und Produkte	26
Automobilbranche.....	28
Bau	32
Chemie	36
Energie	42
Land- und Forstwirtschaft.....	48
Maschinenbau.....	58
Ernährungsindustrie	62
Pharma	68
Konsumgüter.....	72
Textilien.....	76
Der gesellschaftliche Dialog	80
Karriere in der Bioökonomie	84
Weiterführende Links	88
Impressum	89



Bioökonomie – eine Einführung

Mit Blick auf knappe fossile Rohstoffe, Klimawandel und wachsende Weltbevölkerung sind nachhaltige, ressourceneffiziente und klimaneutrale Strategien gefragt, um langfristig den Wohlstand zu garantieren. Die Bioökonomie bietet die Chance, Wirtschaftswachstum im Einklang mit Natur- und Umweltschutz zu erreichen. Der Technologie- und Forschungsstandort Deutschland nimmt international eine Vorreiterrolle ein.

Eine wachsende Weltbevölkerung, knapper werdende Ressourcen, eine schwindende biologische Vielfalt und die Auswirkungen des Klimawandels stellen uns vor existenzielle Herausforderungen. Fossile Rohstoffe wie Erdöl oder Erdgas, auf denen die Industrie immer noch überwiegend aufbaut, sind endlich, und ihr Einsatz treibt die Erderwärmung weiter an. Für die Bewältigung der aktuellen globalen Herausforderungen muss sich die Rohstoffbasis der Industrie und auch die von uns betriebene Wirtschaftsweise verändern. Doch wie können wir ressourcenschonend leben, Biodiversität und damit unsere eigene Lebensgrundlage dauerhaft erhalten und gleichzeitig unseren Lebensstandard sichern?

Einen Beitrag für einen Strukturwandel des Wirtschaftssystems in Richtung Nachhaltigkeit bietet die Bioökonomie, eine auf biologischen Ressourcen und Verfahren basierende Wirtschaft. Das Konzept der Bioökonomie setzt auf das Potenzial von Lebewesen wie Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen. Das große Zukunftsziel: Eine nachhaltige Lebens- und Wirtschaftsweise, die Ökologie und Ökonomie klug miteinander verbindet.

Innovativer Zugang zu biologischen Systemen

In der Definition der Bundesregierung umfasst die Bioökonomie die Erzeugung, Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, Prozesse und Systeme, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen.

Der Mensch nutzt Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen bereits seit Tausenden von Jahren. Dennoch steckt hinter dem Konzept der modernen Bioökonomie ein besonderer Ansatz: Bioökonomie steht für einen wissenschaftsbasierten Zugang zu biologischen Systemen, der auf dem rasant wachsenden Wissen aus Forschung und Entwicklung aufbaut und aus diesen Systemen relevanten Nutzen zieht. Die Bioökonomie ermöglicht einen neuen Blick auf die Leistungen, Fähigkeiten und Diversität der Natur, auf die Vielfalt der nachwachsenden Rohstoffe, deren nachhaltigen Anbau sowie den wirtschaftlichen und kreativen Einsatz moderner Technologien. Biobasierte Ressourcen und Verfahren liefern nicht nur Lösungen, die helfen die

Nutzung fossiler Rohstoffe zu verringern. Sie ermöglichen zugleich, wissenschaftliche und technologische Fortschritte in innovative Anwendungen zu übertragen, die über den Ersatz von Erdöl weit hinausgehen und einen Mehrwert schaffen.

Biologische Ressourcen nutzen

In der Bioökonomie werden biogene Rohstoffe mithilfe der Land- und Forstwirtschaft, der Meeres- und Gewässerwirtschaft mit Fischerei und Aquakultur oder durch Produktion mithilfe von Mikroorganismen erzeugt (vgl. Kap. Rohstoffquellen der Bioökonomie). Ein besonderes Augenmerk gilt der Verwertung und Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe. So

„Die Bioökonomie umfasst die Erzeugung, Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, Prozesse und Systeme, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen.“

Definition der Bundesregierung

können und sollen bisher ungenutzte Nebenprodukte, die bei Erzeugung der eigentlichen Produkte anfallen, sinnvoll verwendet werden. Das nennt man Koppelnutzung. Auch Wasser und Kohlendioxid fungieren dabei als Ressourcen, die in biobasierte Prozesse einfließen. Es geht in der Bioökonomie aber nicht nur um die nachwachsenden Rohstoffe selbst, sondern auch um biobasierte Prozesse, die von Mikroorganismen, tierischen und pflanzlichen Zellen und deren Bestandteilen wie etwa Enzymen vollzogen werden.

Nachhaltig in Kreisläufen wirtschaften

Biomasse, der zentrale Rohstoff der Bioökonomie, ist nicht nur eine nachwachsende Ressource. Sie ist im Vergleich zu anderen Rohstoffformen besonders dafür geeignet, um in Kreisläufen nachhaltig genutzt zu werden. In der Natur sind biologische Ressourcen in Stoffkreisläufe eingebunden; etwa im sogenannten Kohlenstoffkreislauf oder im Stickstoffkreislauf. Kreislaufprozesse sorgen dafür, dass die Nutzung und Neubildung dieser Ressourcen im Gleichgewicht stehen. Die Bioökonomie orientiert sich an diesen natürlichen Stoffkreisläufen.

Das Ziel der Bioökonomie ist eine Kreislaufwirtschaft, in der möglichst wenig Abfall und Reste entstehen. Ein Schlüssel dazu ist der effiziente Umgang mit biologischen Ressourcen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Im Idealfall entsteht nicht mehr Kohlendioxid als während der Wachstumsphase von Pflanzen, Algen oder Bakterien, die Photosynthese betreiben, der Atmosphäre entzogen wurde – ein Baustein auf dem

Weg zu einer klimaneutralen Wirtschaftsweise (vgl. *Kap. Kreislaufbasierte Bioproduktion*).

Biologische Ressourcen und biobasierte Prozesse und Produkte können eine klima- und ressourcenschonende Alternative zu fossilen Rohstoffen und Erzeugnissen sein. Damit kann die Bioökonomie einen wichtigen Beitrag leisten, um die im Jahr 2015 beschlossenen Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen zu erreichen (vgl. *Kap. Nachhaltige Bioökonomie als Ziel*). Dabei muss gleichzeitig die ökonomische, ökologische und soziale Dimension der Nachhaltigkeit betrachtet werden. Nur so lassen sich Zielkonflikte frühzeitig erkennen und unter sorgfältiger Abwägung der jeweils nachhaltigste Lösungsweg identifizieren.

Meilensteine der Bioökonomie-Politik

Auf dem Weg in eine Bioökonomie und in der begleitenden Forschung nimmt Deutschland eine internationale Vorreiterrolle ein. Bereits im Jahr 2010 hat die Bundesregierung die Bioökonomie auf ihre politische Agenda gehoben: Unter Federführung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) wurde die **Nationale Forschungsstrategie Bioökonomie 2030** aufgelegt. 2,4 Mrd. Euro wurden in diesem Rahmen in die Bioökonomie-Forschung investiert. Ihr folgte die unter Federführung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) erstellte **Nationale Politikstrategie Bioökonomie** aus dem Jahr 2013.

Als weiteren Meilenstein veröffentlichte das Bundeskabinett im Januar 2020 die **Nationale Bioökonomiestrategie**. Mit dieser Strategie schafft die Bundesregierung die Voraussetzungen dafür, Deutschlands Vorreiterrolle in der Bioökonomie weiterhin zu stärken und mit ihrer Hilfe die Technologien und Arbeitsplätze von morgen zu entwickeln (vgl. *Kasten S. 5*). Zugleich berät das Fachgremium Bioökonomierat die Bundesregierung bereits seit dem Jahr 2009.

Das Gremium befindet sich in seiner dritten Arbeitsperiode (2021 bis 2023) und ist mit Fachleuten aus diversen Disziplinen in Wissenschaft und Wirtschaft besetzt, erarbeitet Empfehlungen zur Weiterentwicklung künftiger Forschungsschwerpunkte und setzt sich für den Dialog mit allen gesellschaftlichen

Kennzahlen der deutschen Bioökonomie*

4,4 Mio. Erwerbstätige waren im Jahr 2017 in der Bioökonomie beschäftigt. Das sind 10 % der Gesamtwirtschaft. Den größten Anteil machen das verarbeitende Gewerbe (z.B. Nahrungsmittelindustrie) und das Gastgewerbe aus.

165 Mrd. Euro Bruttowertschöpfung wurden im Jahr 2017 durch die biomassebasierte Wirtschaft erzielt. Je nach Modellierungsansatz sind es bis zu 265 Mrd. Euro.

* Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie (2020)

Nationale Bioökonomiestrategie

Die im Januar 2020 veröffentlichte Nationale Bioökonomiestrategie setzt den Rahmen für eine nachhaltige Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen und für umwelt- und naturschonende Produktionsverfahren in allen Wirtschaftsbereichen. Die Bundesregierung bündelt mit der Gesamtstrategie die bisherigen Aktivitäten aller Bundesministerien zur Bioökonomie und stellt die Weichen für die weitere Gestaltung. Zugleich richtet die Bundesregierung ihre Bioökonomiepolitik noch stärker an dem übergeordneten Ziel der nachhaltigen und klimaneutralen Entwicklung aus.

Federführend sind das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Mit dem Weg in eine Bioökonomie leistet Deutschland einen Beitrag zum Erreichen der globalen Nachhaltigkeitsziele und hilft, die deutsche Spitzenstellung auf den Märkten der Zukunft zu sichern.

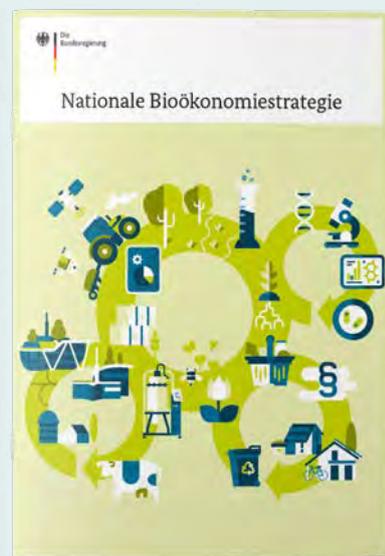
Zwei übergeordnete Leitlinien flankieren die Ziele und Maßnahmen der Nationalen Bioökonomiestrategie.

Die erste Leitlinie verweist auf biologisches Wissen und fortschrittliche Technologien als Pfeiler eines zukunftsfähigen, nachhaltigen und klimaneutralen Wirtschaftssystems. Die zweite Leitlinie zielt auf die Rohstoffbasis der Wirtschaft, die durch biogene Ressourcen nachhaltig und kreislauffähig ausgerichtet werden soll.

Die Bioökonomiestrategie der Bundesregierung adressiert ein breites Spektrum an Zielen auf unterschiedlichen gesellschaftlichen Ebenen und in allen wirtschaftlichen Sektoren, die sich in sechs gemeinsamen strategischen Zielen zusammenfassen lassen:

- Bioökonomische Lösungen für die Nachhaltigkeitsagenda entwickeln
- Potenziale der Bioökonomie innerhalb ökologischer Grenzen erkennen und erschließen
- Biologisches Wissen erweitern und anwenden
- Ressourcenbasis der Wirtschaft nachhaltig ausrichten
- Deutschland zum führenden Innovationsstandort der Bioökonomie ausbauen
- Gesellschaft einbinden, nationale und internationale Kooperationen intensivieren

Für die strategischen Ziele werden konkrete Umsetzungsziele in der Forschungsförderung, der Gestaltung von Rahmenbedingungen und bei übergreifenden Instrumenten festgelegt.



Akteuren und die gesellschaftliche Teilhabe ein (vgl. Kap. *Der gesellschaftliche Dialog*).

Bioökonomie in den Bundesländern

Nicht zuletzt dank der breiten bundespolitischen Unterstützung ist die Bioökonomie inzwischen auch von

einzelnen Bundesländern als Thema der Forschungsförderung aufgegriffen worden. **Baden-Württemberg** zählte 2013 zu den ersten Bundesländern mit einer eigenen Bioökonomie-Forschungsstrategie sowie einem landeseigenen Forschungsprogramm. Im Juni 2019 beschloss die Landesregierung die ressortübergreifende Landesstrategie „Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg“. Für die Umsetzung der geplan-

Forschungslandschaft zur Bioökonomie in Deutschland



Die Forschungslandschaft zur Bioökonomie in Deutschland ist breit aufgestellt: An insgesamt 73 Universitäten und 64 Fachhochschulen gibt es entsprechende Aktivitäten. Hinzu kommen 156 außeruniversitäre Institute wie die der Fraunhofer-Gesellschaft, der Max-Planck-Gesellschaft, der Leibniz-Gemeinschaft und Helmholtz-Gemeinschaft sowie 40 Einrichtungen der

Ressortforschung. Die Forschungsaktivitäten in der Bioökonomie sind nicht auf eine Fachdisziplin beschränkt. Sie umfassen u. a. die Agrarwissenschaften, die Lebenswissenschaften, den Maschinen- und Anlagenbau sowie zu Teilen die Sozialwissenschaften. Zunehmend werden Studiengänge zum Thema Bioökonomie und Nachhaltigkeit angeboten (vgl. Kap. Karriere in der Bioökonomie).

ten Maßnahmen stellt die Landesregierung von 2020 bis 2024 insgesamt 50 Mio. Euro bereit.

Als erstes Bundesland berief **Bayern** 2015 einen eigenen Sachverständigenrat Bioökonomie ein. Im November 2020 stellte der Freistaat seine neue „Bio-ökonomiestrategie Bayern“ vor. Die Strategie nennt acht Hauptziele und 50 konkrete Maßnahmen auf dem Weg in eine zirkuläre, nachhaltige Bioökonomie.

Bereits im Jahr 2013 hat **Nordrhein-Westfalen** eine eigene Bioökonomie-Strategie beschlossen. Zentraler Akteur der Forschung ist das interdisziplinär aufgestellte Kompetenzzentrum „Bioeconomy Science Center“ (BioSC), an dem maßgeblich die Universitäten in Aachen, Bonn und Düsseldorf sowie das Forschungszentrum Jülich beteiligt sind.

Zudem hat sich **Mitteldeutschland** zu einem Bioökonomie-Zentrum entwickelt. Am geschichtsträchtigen Chemiestandort Leuna hat die Fraunhofer-Gesellschaft ein Bioraffinerie-Forschungszentrum für „Chemisch-Biotechnologische Prozesse“ (CBP) errichtet, das im Oktober 2012 eingeweiht wurde. Für den Aufbau des CBP haben das Land Sachsen-Anhalt und der Bund insgesamt rund 50 Mio. Euro bereitgestellt. Von 2012 bis 2017 wurde die Region über die Förderung des Spitzenclusters BioEconomy vom BMBF mit 40 Mio. Euro gefördert. Aus dem Spitzencluster ist der BioEconomy e.V. hervorgegangen, der vom Land Sachsen-Anhalt als Innovationscluster bis ins Jahr 2026 gefördert wird. Das Cluster BioEconomy ist weit über das Kerngebiet Sachsen und Sachsen-Anhalt vernetzt.

Bioökonomie als Wirtschaftsfaktor

Die Bioökonomie ist eine Querschnittsbranche: Sie umfasst alle Wirtschaftszweige und zugehörige Dienstleistungsbereiche, die biologische Ressourcen wie Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen und deren Produkte erzeugen, be- und verarbeiten, nutzen und damit handeln. Dazu zählen insbesondere die Land- und Forstwirtschaft, Chemie und Pharmazie, die Nahrungsmittelindustrie, die industrielle Biotechnologie, die Kosmetik- sowie die Papier- und Textilindustrie. Einige Sektoren sind nahezu komplett biobasiert, so die Land- und Forstwirtschaft sowie die Nahrungsmittelbranche. Andere wiederum basieren nur zum Teil auf

biologischen Ressourcen und biobasierten Prozessen, etwa die Chemie- und Konsumgüterindustrie. Diese Situation macht es herausfordernd, wirtschaftliche Kennzahlen zur Bioökonomie zu ermitteln. Dass es sie dennoch gibt, ist ein Ergebnis des deutschen Bioökonomie-Monitorings, das gemeinsam von den drei Bundesministerien für Bildung und Forschung, Landwirtschaft und Wirtschaft auf den Weg gebracht wurde. Mehr als ein Dutzend Forschungseinrichtungen haben im Verbund Werkzeuge entwickelt, mit denen sich eine biobasierte Wirtschaft messen und bewerten lässt. Laut dem 2020 veröffentlichten „Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie“ waren im Jahr 2017 etwa 4,4 Mio. Erwerbstätige in der deutschen Bioökonomie beschäftigt, das sind rund 10 % der Erwerbstätigen in Deutschland.

Je nach Abgrenzung der Bioökonomie und Modellierungsansatz lag die Bruttowertschöpfung in der Bioökonomie 2017 zwischen 165 Mrd. und 265 Mrd. Euro. Das sind knapp 6 % des deutschen Bruttoinlandsprodukts. Mehr als zwei Drittel der Wertschöpfung gehen auf traditionelle Bereiche wie Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei und Aquakultur, Holzmöbel, Papierherstellung sowie die Lebensmittel-, Futtermittel- und Getränkeherstellung und das Gastgewerbe zurück. Bereiche, die der sogenannten industriellen Bioökonomie zuzurechnen sind, machten zum Zeitpunkt der Erhebung hingegen noch einen vergleichsweise geringen Anteil an der Bioökonomie aus. Dazu zählen biobasierte Textilien, Chemikalien, Pharmazeutika oder Kunststoffe.

Beitrag zu nachhaltigen Innovationen

Sowohl in ihrer Zielstellung als auch in ihrer Reichweite ist die Bioökonomie ein umfassender Ansatz. Sie wirft auf Seiten der Forschung Fragen für viele Disziplinen in den Natur-, Technik-, Sozial- und Geisteswissenschaften auf und erstreckt sich auf Anwendungen, die viele Lebensbereiche und nahezu die gesamte Wirtschaft betreffen. In dieser Hinsicht ist Bioökonomie mehr als ein technisches oder wirtschaftliches Programm. Es geht ihr um die Nutzung biologischen Wissens und biogener Ressourcen im Dienste der Nachhaltigkeit. Das erfordert neue Formen der interdisziplinären Zusammenarbeit und den Aufbau von neuartigen Wertschöpfungsnetzen, eröffnet zugleich interessante berufliche Perspektiven (vgl. Kap. *Karriere in der Bioökonomie*).



Nachhaltige Bioökonomie als Ziel

Biobasiertes Wirtschaften kann einen wichtigen Beitrag leisten, um die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen – die Sustainable Development Goals (SDGs) – zu erreichen. Die Nationale Bioökonomiestrategie adressiert insbesondere elf SDGs, um damit eine nachhaltige Entwicklung unterstützen. Wichtig sind ein ganzheitlicher Blick und internationale Zusammenarbeit. Denn eine nachhaltige Bioökonomie kann angesichts globaler Herausforderungen und Märkte nur im internationalen Kontext gelingen.

Das Prinzip der Nachhaltigkeit, nach dem nicht mehr Holz gefällt werden darf, als nachwachsen kann, wird in der Forstwirtschaft bereits seit langer Zeit angewandt. Mit dieser Forderung legte Hans Carl von Carlowitz schon 1713 den Grundstein für eine nachhaltige Forstwirtschaft.

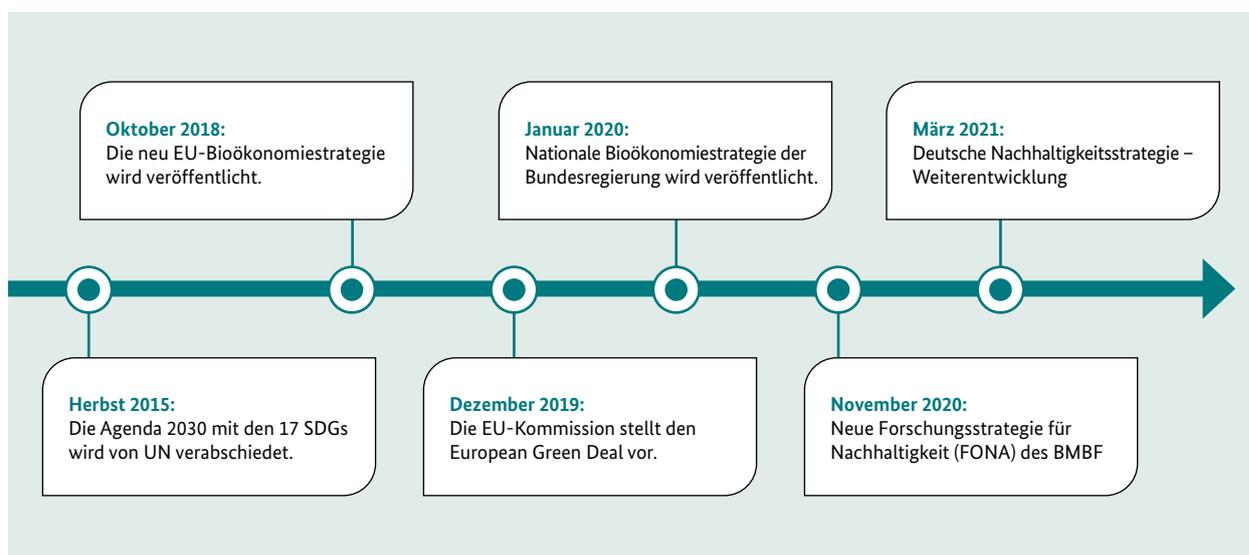
Die Grundlagen für den heute verwendeten, deutlich umfassenderen Begriff der nachhaltigen Entwicklung als politisches Leitprinzip wurden im Brundtland-Bericht 1987 gelegt. „Nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen.“ Nachhaltigkeit bedeutet somit Verantwortung gegenüber der Zukunft.

Es gibt drei Dimensionen von Nachhaltigkeit, die voneinander abhängen: die ökonomische, die ökologische und die soziale. Sie müssen gemeinsam betrachtet werden, um so Zielkonflikte frühzeitig zu erkennen und unter sorgfältiger Abwägung den jeweils nachhaltigsten Lösungsweg zu finden. Wichtig ist, dass eine nachhaltige Entwicklung nur zu erreichen ist, wenn umweltbezogene, wirtschaftliche und soziale Ziele gleichzeitig und gleichberechtigt umgesetzt werden. Darüber hinaus stellen die Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen in globaler Perspektive und im Rahmen der planetaren Grenzen sowie auch ein Leben in Würde Maximen dar.

Die UN-Nachhaltigkeitsziele als Richtschnur

Die Ernährung einer stark wachsenden Weltbevölkerung, der Klimawandel, der Rückgang der Biodiversität, eine häufig noch zu ressourcenintensive Wirtschaftsweise: Als Antwort auf die zunehmend komplexer werden globalen Herausforderungen unserer Zeit haben die Vereinten Nationen (UN) im Jahr 2015 die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung verabschiedet. Mit der Agenda 2030 hat die internationale Staatengemeinschaft 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals – SDGs) mit 169 Unterzielen festgelegt. Die UN-Nachhaltigkeitsziele streben eine wirtschaftlich leistungsfähige, sozial gerechte und ökologisch verträgliche Entwicklung an. Alle Staaten sind aufgerufen, die universellen Maßgaben der Agenda bis ins Jahr 2030 umzusetzen.

Zahlreiche politische Initiativen auf nationaler und EU-Ebene sind mittlerweile an der Agenda 2030 ausgerichtet: Mit der „Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie“ verpflichtet sich die Bundesregierung, zu einer raschen und ambitionierten Umsetzung der 17 UN-Nachhaltigkeitsziele beizutragen. Als übergreifende nationale Innovationsstrategie definiert die Hightech-Strategie 2025 der Bundesregierung ein eigenes Handlungsfeld und verschiedene Missionen zum Thema Nachhaltigkeit. Die im Jahr 2020 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) veröffentlichte neue Strategie





Zu elf der insgesamt 17 UN-Nachhaltigkeitszielen kann die Bioökonomie aus Sicht der Bundesregierung unmittelbar Beiträge leisten.

Forschung für Nachhaltigkeit (FONA) ist ebenfalls stark an den SDGs ausgerichtet. Im Jahr 2018 stellte die Europäische Union ihre neue Bioökonomiestrategie vor. Ein Jahr darauf brachte die EU-Kommission mit dem European Green Deal ein transformatives Politikvorhaben auf den Weg, durch das Europa bis 2050 der erste treibhausgasneutrale und nachhaltige Kontinent werden soll. Als nachhaltige Wachstumsstrategie setzt der European Green Deal darauf, das Wirtschaftswachstum von Ressourcenverbrauch und Umweltbelastung zu entkoppeln. Angestrebt wird eine klimaneutrale, ressourceneffiziente und wettbewerbsfähige Wirtschaft.

Die Nationale Bioökonomiestrategie und die SDGs

Mit der 2020 in Kraft gesetzten Nationalen Bioökonomiestrategie hat die Bundesregierung auch ihre Bioökonomiepolitik noch stärker am übergeordneten Ziel der nachhaltigen und klimaneutralen Entwicklung ausgerichtet (vgl. Kap. Einführung). Die Leitlinien und Ziele der Strategie nehmen deshalb Bezug auf die UN-Nachhaltigkeitsziele. Die Bundesregierung hat unter den 17 SDGs elf identifiziert, zu deren Erreichung die Bioökonomie insbesondere beitragen kann.

Priorität hat dabei stets die Ernährungssicherheit (SDG 2: **Kein Hunger**). Die Bioökonomie stellt gesunde Lebensmittel und Biopharmazeutika bereit (SDG 3: **Gesundheit und Wohlergehen**). Nachhaltige biobasierte Produkte sind eine wünschenswerte Alternative zu erdölbasierten Gütern (SDG 12: **Nachhaltige/r Konsum und Produktion**). Darüber hinaus ermög-

lichen bioökonomische Innovationen neuartige und ressourcenschonende Verfahren und Produkte in allen Wirtschaftssektoren (SDG 9: **Industrie, Innovation und Infrastruktur**). Aufgrund ihrer natürlichen Eigenschaften sind biogene Rohstoffe in besonderer Weise geeignet, in Kreisläufen geführt und in Kaskaden genutzt zu werden. Am Ende einer Nutzungskette kann Biomasse auch energetisch verwendet werden (SDG 7: **Bezahlbare und saubere Energie**).

Eine nachhaltige Bioökonomie ist auf funktionierende Ökosysteme und biologische Vielfalt angewiesen. Sie trägt selbst zur Wahrung von Ökosystemleistungen bei. Leben unter Wasser und Leben an Land sind elementar für die Bioökonomie (SDG 14 und 15). Neben gesunden Böden spielt Wasser beim Leben an Land und beim Anbau von Biomasse eine zentrale Rolle. Agrarische Produktionssysteme sollten möglichst ressourcenschonend ausgerichtet sein, gleichzeitig schafft die Bioökonomie Lösungen zur Wasseraufbereitung (SDG 6: **Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen**).

Biomasse bindet Kohlenstoff, pflanzliches Wachstum entzieht der Atmosphäre Kohlendioxid. Diese Senkenfunktion wird künftig in der agrarischen und forstlichen Produktion ein größeres Gewicht erhalten. In der Industrie trägt die Bioökonomie durch die Substitution fossiler Rohstoffe und ressourcenmindernde Verfahren zur Einsparung von Treibhausgas-Emissionen bei (SDG 13: **Maßnahmen zum Klimaschutz**).

Die Bioökonomie erstreckt sich auf alle wirtschaftlichen Sektoren, ermöglicht dabei aber regional

angepasste und vorteilhafte Formen der Wertschöpfung, sowohl in ländlichen Räumen als auch in der urbanen Bioökonomie (**SDG 11: Nachhaltige Städte und Gemeinden**). Übergeordnetes Ziel ist es, Ökologie und Ökonomie zu verbinden und die Transformation zu einem nachhaltigen Wirtschaftssystem zu unterstützen (**SDG 8: Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum**).

Die genannten SDGs sind untereinander verknüpft; teils bedingen sie einander, teils stehen sie in einem Spannungsverhältnis. Diese Zusammenhänge und Herausforderungen stehen im Zentrum der Nationalen Bioökonomiestrategie.

Ganzheitliche Lösungsansätze gefragt

Die Transformation der Wirtschaft hin zu einer Bioökonomie ist ein komplexer Prozess. Welche Entwicklungen gehen in die richtige Richtung? Und wo müssen eingeschlagene Pfade verlassen werden, weil diese sich als nicht nachhaltig erweisen? Solche Fragen lassen sich nur beantworten, wenn umfassende und zuverlässige Daten zur Nutzung natürlicher Ressourcen und den damit verbundenen Effekten vorliegen.

Angesichts der komplexen gesellschaftlichen Herausforderungen und der Vielzahl der damit verbundenen Ziele können Zielkonflikte entstehen. Um tragfähige und nachhaltige Lösungen mithilfe einer biobasierten Wirtschaft zu entwickeln, ist ein ganzheitlicher Blick auf Systeme gefragt – von der Zelle zum Organismus bis zum Produktions- oder Ökosystem. Systemisches Denken und ganzheitliche Ansätze helfen dabei, Konflikte zu erkennen und auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse zu mindern.

Um den Transformationsprozess hin zu einer biobasierten Wirtschaft zu beobachten, zu messen und bewertbar zu machen, hat die Bundesregierung seit 2016 den Aufbau eines umfassenden Bioökonomie-Monitorings unterstützt. Es soll kontinuierlich weiterentwickelt werden und so eine Informations- und Entscheidungsgrundlage liefern, auf deren Basis auch politisches Handeln ausgerichtet und ein öffentlicher Diskurs geführt werden kann (vgl. *Kasten S. 12*).

Der Wandel hin zu einer biobasierten Wirtschaft ist nicht nur eine technologische und wirtschaftliche

Transformation, sondern auch eine gesellschaftliche. Es ist das Zusammenspiel vieler Faktoren, die sowohl regional als auch im globalen Kontext betrachtet werden müssen. Für die Bioökonomie-Forschung bedeutet es, dass biologisches Wissen und technologische Lösungen verknüpft werden müssen mit der Forschung über die sozialen und ökologischen Systeme, in die die Bioökonomie eingebettet ist.

Die Transformation zur Bioökonomie aus sozial-, politik- und wirtschaftswissenschaftlicher Perspektive zu erforschen, steht im Zentrum des BMBF-Förderkonzepts „Bioökonomie als gesellschaftlicher Wandel“. Das BMBF hat zudem ein Konzept für die Förderung des wissenschaftlichen und unternehmerischen Nachwuchses im Bereich der Bioökonomie mit der in der Bioökonomiestrategie verankerten Nachhaltigkeitsagenda eng verknüpft (vgl. *Kap. Karriere in der Bioökonomie*).

Der neue Bioökonomierat

Im Herbst 2020 hat der dritte Bioökonomierat seine Beratungsarbeit aufgenommen. Das 20-köpfige Fachgremium berät die Bundesregierung zunächst für drei Jahre insbesondere bei der Umsetzung der Nationalen Bioökonomiestrategie. Die Expertise der Mitglieder repräsentiert das Thema Bioökonomie in seiner gesamten inhaltlichen Breite und umfasst die Bereiche Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft.

Biökonomiestrategien weltweit

Der Global Bioeconomy Policy Report wird vom International Advisory Council on Global Bioeconomy (IACGB) erstellt und herausgegeben und gibt einen Überblick über die globale Bioökonomie-Politik. Demnach hatten im Jahr 2020 genau 19 Länder oder Makroregionen dedizierte Bioökonomiestrategien aufgelegt: Es sind in alphabetischer Reihenfolge: Costa Rica, Deutschland, die Europäische Union, Finnland, Frankreich, Großbritannien, Irland, Italien, Japan, Lettland, Malaysia, die Nordischen Länder, Norwegen, Ostafrika, Österreich, Südafrika, Spanien, Thailand und die USA. Etwa 60 Länder weltweit haben für die Bioökonomie relevante politische Strategien aufgelegt.

Monitoring – Den ökologischen Fußabdrücken der deutschen Bioökonomie auf der Spur



Unter Monitoring versteht man das systematische Erfassen, Messen und Beobachten eines Prozesses mithilfe geeigneter Werkzeuge. Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Bioökonomie liefert das Monitoring eine wichtige Informations- und Entscheidungsgrundlage, um Veränderungen bewerten und steuern zu können. Auf dieser Datenbasis lassen sich Fortschritte, aber auch Fehlentwicklungen sichtbar machen. Deshalb wurde 2016 gemeinsam von den Bundesministerien für Forschung, Wirtschaft und Landwirtschaft ein deutsches **Bioökonomie-Monitoring** gestartet.

Das BMBF fördert dazu den Forschungsverbund „Systemisches Monitoring und Modellierung der Bioökonomie“, kurz SYMOBIO. Im Jahr 2020 wurde der erste Pilotbericht vorgestellt. Im Rahmen des Monitorings wurden umfassend Stoffströme von biobasierten Wirtschaftssektoren erfasst (etwa Getreide, Fisch, Holz) und wirtschaftliche Kennzahlen und Trends ermittelt. Berücksichtigt wurden auch internationale Verflechtungen.

Eine zentrale Herausforderung beim Aufbau eines Bioökonomie-Monitorings ist es, Indikatoren zu

identifizieren, mit deren Hilfe sich ermitteln lässt, in welchem Ausmaß bestimmte UN-Nachhaltigkeitsziele erreicht werden. Für das Monitoring der Bioökonomie wurden zudem sogenannte Ressourcen- und Klima-Fußabdrücke berechnet. Sie zeigen an, welche Menge an natürlichen Ressourcen von Menschen verbraucht wird und welche Effekte die Bioökonomie auf Klima und Umwelt hat.

Deutschland nutzte 2015 für die Produktion weit mehr Agrarfläche weltweit (50 Mio. Hektar), als auf der in Deutschland verfügbaren Landwirtschaftsfläche (17 Mio. Hektar) erzeugt werden können. Der Klimafußabdruck des deutschen Konsums biobasierter Produkte beträgt knapp ein Fünftel (18 %) des gesamten Klimafußabdrucks. Der Konsum landwirtschaftlicher Produkte hat den größten Anteil der Klimagas-Emissionen der Bioökonomie. Das BMBF fördert seit 2022 das Nachfolgeprojekt SYMOBIO 2.0 zur Weiterentwicklung des Bioökonomie-Monitorings. Die Forschenden wollen noch stärker Klima- und Biodiversitätseffekte sowie die Entwicklungen in der Landwirtschaft berücksichtigen.

Neben der Erarbeitung von Stellungnahmen soll der Bioökonomierat auch die öffentliche Debatte fördern (vgl. Kap. *Der gesellschaftliche Dialog*), und hier etwa Konflikte thematisieren, die bei der Umsetzung der mit der Bioökonomie verknüpften Nachhaltigkeitsziele auftreten können. Eine weitere Aufgabe des Rates ist es, Empfehlungen für einen Umsetzungsplan zur Nationalen Bioökonomiestrategie zu entwerfen und diese während der Laufzeit der Strategie kontinuierlich fortzuschreiben.

Internationale Kooperationen

Bioökonomie wird in immer mehr Ländern als Baustein zur Gestaltung eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems betrachtet und gewinnt politisch immer mehr an Bedeutung: Laut dem Global Bioeconomy Policy Report von 2020 haben 19 Länder weltweit eine dezidierte Bioökonomiestrategie verabschiedet, ähnlich viele haben ein entsprechendes Konzept in Arbeit (vgl. *Kasten S.11*). Die Programme unterscheiden sich je nach den national zur Verfügung stehenden Ressourcen sowie politischen, sozialen und technologischen Rahmenbedingungen.

Zwar muss eine Bioökonomie immer regional umgesetzt werden. Klar ist aber auch: Angesichts globaler Herausforderungen, Märkte und Handelsbeziehungen ist internationale Zusammenarbeit für das Gelingen einer nachhaltigen Bioökonomie unverzichtbar. Die Bundesregierung hat den Aufbau dieser Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren maßgeblich mit unterstützt.

Solche Kooperationen sollen auch im Rahmen der Nationalen Bioökonomiestrategie weiter ausgebaut werden, um international voneinander zu lernen und miteinander zu forschen. Ein wichtiges europäisches Instrument der Forschungsförderung bietet etwa die European Research Area (ERA)-Net-Initiative. Verschiedene Bundesministerien, so auch das BMBF oder das BMEL, beteiligen sich als Fördermittelgeber für die deutschen Partner in den europäischen Forschungsverbänden.

Die Europäische Kommission setzt nachdrücklich auch auf Partnerschaften mit Unternehmen aus der biobasierten Wirtschaft. Zu diesem Zweck wurde 2014 die Public Private Partnership „Bio-based Industries

Joint Undertaking“ (BBI JU) ins Leben gerufen. Hier kooperieren öffentliche Forschungseinrichtungen, kleine und mittlere Unternehmen sowie Industriekonzerne entlang der gesamten Wertschöpfungskette, um nachhaltige Innovationen zügig auf den Markt zu bringen.

Die Initiative wird künftig im Circular Bio-based Europe Joint Undertaking fortgeführt. Zumeist bilaterale Kooperationen deutscher Forschungsinstitutionen über Europa hinaus werden von Seiten des BMBF mit der Fördermaßnahme „Bioökonomie International“ unterstützt. Hier werden modellhafte Projekte internationaler Forschungs- und Entwicklungspartnerschaften mit Nicht-EU-Ländern gefördert. Zu den bisherigen Partnerländern zählen Vietnam, Brasilien, Kanada, Russland, China und Chile.

Global Bioeconomy Summit

Seit seinem Debüt im Jahr 2015 hat sich der Global Bioeconomy Summit (GBS) zum wichtigsten internationalen Forum zum Thema Bioökonomie entwickelt. Der mehrtägige Kongress entstand auf Initiative des von 2012 bis 2019 amtierenden Bioökonomierates und wurde von der Bundesregierung gefördert. Das hochrangig besetzte Gipfeltreffen hat sich zu einer Institution entwickelt, die wichtige Impulse für die Entwicklung der globalen Bioökonomie liefert. 2020 fand bereits der dritte GBS mit Bioökonomie-, Innovations- und Nachhaltigkeitsexpertinnen und -experten aus aller Welt statt. Organisiert und veranstaltet wird der GBS mittlerweile durch das International Advisory Council on Global Bioeconomy (IACGB), einem internationalen Thinktank von Bioökonomie-Fachleuten.





Die Rohstoffquellen der Bioökonomie

Pflanzen, Tiere sowie Mikroorganismen dienen als vielfältige Rohstoffquellen für die biobasierte Wirtschaft. Hierbei geht es nicht nur um Biomasse, die in der Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft oder der mikrobiellen Produktion neu entsteht. Zunehmend rücken auch organische Rest- und Abfallstoffe in den Fokus als wertvolle Ressourcen. Ziel und Herausforderung ist, möglichst geschlossene Stoffkreisläufe zu erreichen.

Das Besondere an der Bioökonomie ist ihre nachwachsende Rohstoffbasis: Biologische Ressourcen – damit sind Lebewesen wie Pflanzen, Tiere sowie Mikroorganismen gemeint – wachsen und gedeihen und produzieren durch ihren Stoffwechsel eine große Vielfalt organischer Substanzen. Der Oberbegriff, unter dem sich solche nachwachsenden Ressourcen fassen lassen, ist Biomasse. In der Bioökonomie wird Biomasse vielfältig genutzt, vorrangig als Nahrungs- und Futtermittel, aber zunehmend auch als Stoff- und Energielieferant für die Industrie. Nachhaltig erzeugte nachwachsende Rohstoffe tragen zur Schonung der fossilen Ressourcen bei und mindern den Ausstoß klimaschädlicher Gase. Zugleich schaffen sie Arbeitsplätze und Wertschöpfung im ländlichen Raum.

Biomasse von Äckern und Wiesen

Pflanzen sind die bedeutendsten Biomasse-Produzenten der Erde: Sie betreiben Photosynthese und wandeln CO₂ aus der Luft und Sonnenlicht in Sauerstoff und organische Verbindungen um. Biomasse enthält ein komplexes Stoffgemisch aus Kohlenhydraten, Lipiden (etwa Fette, Öle) und Proteinen. Grüne Pflanzen sorgen für die Hauptmenge der primären Biomasseproduktion der Landfläche der Erde. Pflanzen stehen am Beginn der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette und sind damit für die Bioökonomie von elementarer Bedeutung. Die pflanzliche Erzeugung in Deutschland ist breit aufgestellt und vielfältig: Sie reicht von Acker- und Pflanzenbau über Waldbau, Garten- und Obstbau bis hin zum Anbau von Sonderkulturen wie Wein oder Hopfen. Landwirte bewirtschaften und pflegen knapp die Hälfte der Fläche Deutschlands. Kulturpflanzen werden hauptsächlich als Nahrungsmittel bzw. Futtermittel angebaut. Für den menschlichen Verzehr produziert die Landwirtschaft – neben den tierischen Produkten – vor allem Brotgetreide, Kartoffeln, Zuckerrüben, Pflanzenöle, Obst und Gemüse.

Heute ist Getreide das wichtigste pflanzliche Erzeugnis der deutschen Landwirtschaft. Auf gut einem Drittel der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland wächst Getreide, die Mehrheit davon landet in den Futtertrögen von Nutztieren. Weizen ist das mit Abstand am häufigsten angebaute Getreide in Deutschland. Auf Rang zwei folgt Gerste, die insbesondere als Viehfutter, aber auch als Brau-

gerste zum Bierbrauen verwendet wird. Traditionell hat im Brotland Deutschland auch der Roggen eine große Bedeutung. Weitere wichtige in Deutschland angebaute Stärkepflanzen sind Kartoffeln und Mais. Zuckerrüben sind wiederum die wichtigsten Lieferanten für den „Haushaltszucker“ Saccharose. Aus Raps gewonnene Pflanzenöle werden hierzulande besonders häufig eingesetzt, mehrheitlich in der Nahrungsmittelindustrie.

Nutzpflanzen wie Weizen oder Raps sind zudem wichtige Proteinlieferanten. Neuerdings rücken auch Hülsenfrüchte wie Lupinen, Ackerbohnen und Erbsen verstärkt in den Fokus. Entsprechende Forschungsbemühungen zielen darauf ab, die Leistungsfähigkeit dieser heimischen Proteinlieferanten zu verbessern, um Abhängigkeiten von internationalen Importen zu senken. Innerhalb der Bioökonomie werden nun insbesondere Ansätze verfolgt, Anbau und Nutzung von Pflanzen ressourceneffizienter und nachhaltiger zu gestalten. Berücksichtigt werden soll dabei auch ein bestmögliches Nebeneinander von konventioneller Landwirtschaft und Ökolandbau sowie neue Mög-

Biomasseproduktion und -nutzung in Deutschland



In Deutschland wurden 2015 laut dem Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie knapp 185 Mio. Tonnen Biomasse (Trockengewicht) in Land- und Forstwirtschaft und Fischerei erzeugt. Die Landwirtschaft trug 137 Mio. Tonnen, die Forstwirtschaft 48 Mio. Tonnen bei. Bei Getreide wurden 60 % als Tierfutter verwendet, 17 % gelangten in Nahrungsmittel, 10 % wurden stofflich und 8 % energetisch genutzt. Von produziertem Zucker wurden 87 % als Nahrungsmittel verwendet und 10 % energetisch genutzt. Pflanzenöle und -fette wurden schwerpunktmäßig (34 %) energetisch eingesetzt, in der Industrie stofflich genutzt (28 %) und zu gut einem Viertel als Nahrungsmittel verwendet.

lichkeiten für Pflanzen als nachwachsende Rohstoffe außerhalb der Nahrungs-, Futter- und Lebensmittelindustrie. So spielen Getreide, Raps, Zuckerrüben und andere Kulturen auch für die Erzeugung erneuerbarer Energien (vgl. Kap. Energie) und als Rohstoffe für die Chemieindustrie (vgl. Kap. Chemie) eine wichtige Rolle.

Während Pflanzen als Biomasse-Produzenten auf dem Land im Mittelpunkt stehen, übernehmen Algen und andere Primärproduzenten diese Aufgabe in Gewässern. Ob im Meer oder im Süßwasser: Algen produzieren große Mengen Zuckermoleküle oder Öle und können somit zur Gewinnung von interessanten Inhaltsstoffen für die Industrie genutzt werden. In Europa werden Algen in der Lebensmittelindustrie als Emulgator, Verdickungsmittel oder Nahrungsergänzungsmittel eingesetzt.

Algen können in offenen oder geschlossenen Systemen auf degradierten und nicht fruchtbaren Flächen kultiviert werden. Damit steht die Produktion nicht in direkter Nutzungskonkurrenz zur Herstellung von Lebens- und Futtermitteln. Im Vergleich zu Nutzpflanzen haben Algen eine um den Faktor zehn höhere Biomasseproduktion, allerdings setzt ihr Anbau im Rahmen von Photobioreaktoren auf eine hohe Verfügbarkeit von Sonnenlicht. Um Algen als Ressource auch für Deutschland besser zu erschließen, wird hierzulande daran geforscht, Mikroalgen als Produzenten für Farbstoffe, Proteine und Vitamine zu

Forschung für den Ökologischen Landbau

Das Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft (BÖLN) zielt darauf ab, die Rahmenbedingungen für die ökologische Land- und Lebensmittelwirtschaft und andere Formen nachhaltiger Landbewirtschaftung in Deutschland zu verbessern und die Voraussetzungen für ein gleichgewichtiges Wachstum von Angebot und Nachfrage zu erzielen. Das Programm wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) finanziert und in der Geschäftsstelle BÖLN in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) in Bonn koordiniert. Inzwischen wurden ca. 1.300 Forschungs- und Entwicklungsprojekte umgesetzt, jährlich fließen über 20 Mio. Euro in die Vorhaben.

entwickeln, die in der Kosmetik- oder Lebensmittelindustrie genutzt werden könnten (vgl. Kap. Ernährung; Konsumgüter).

Biomasse aus Stall und Weide

Eine wichtige Basis für die Bioökonomie sind die landwirtschaftlichen Nutztiere. Die deutsche Landwirtschaft hält bei tierischen Erzeugnissen eine Spitzenposition: Nirgendwo in Europa wird mehr Milch und mehr Schweinefleisch erzeugt. Deutschland ist nach Frankreich der zweitgrößte Erzeuger von Rind- und Kalbfleisch sowie von Geflügelfleisch. Insgesamt gibt es knapp 200 Mio. Nutztiere, die wiederum rund 80 Mio. Tonnen Futter pro Jahr verbrauchen. Viehwirtschaft und Landwirtschaft sind eng miteinander verknüpft.

So liefert der Futterbau – unterteilt in die zwei Formen Ackerfutterbau und Grünlandnutzung – einen Großteil des für die Ernährung der Nutztiere notwendigen Grundfutters wie Gras- und Maissilage. Hinzukommen Nebenprodukte, die in Zuckerfabriken, Getreidemöhlen oder Molkereien der Ernährungswirtschaft anfallen, und ebenfalls zu Futtermitteln weiterverarbeitet werden. Die Sicherung mit eiweißhaltigen Futtermitteln wird größtenteils mit ergänzenden Importen gewährleistet, da innerhalb von Europa nicht genügend eiweißhaltige Pflanzen produziert werden. Wiesen und Weiden stellen ebenfalls einen wichtigen Faktor dar: Sie versorgen Rinder mit Futter und sind damit eine wichtige Säule der Milchwirtschaft. Mit ihrer hohen Biodiversität leisten sie zudem einen Beitrag zum Umweltschutz. Im Rahmen der Bioökonomie geht es vor allem darum, Tierzucht, Tierhaltung, Nahrungs- und Lebensmittelproduktion sowie Nachhaltigkeit und Umweltschutz miteinander in Einklang zu bringen (vgl. Kap. Land- und Forstwirtschaft).

Holz – nachhaltiger Rohstoff

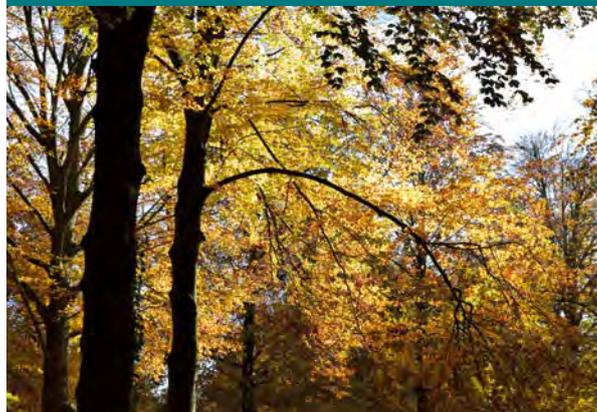
Eine wichtige Rolle bei der Bereitstellung nachwachsender Rohstoffressourcen in Deutschland nimmt der Wald ein. Er ist zugleich wertvolles Ökosystem, Kohlenstoffspeicher, Erholungsraum und Lieferant für den wichtigen Rohstoff Holz. Mit einem Holzvorrat von 3,7 Mrd. Kubikmetern oder 336 Kubikmetern pro Hektar nimmt Deutschland eine Spitzenposition im Vergleich mit anderen Ländern Europas ein.

Stellenwert, Nachfrage und Nutzung von Holz als nachwachsenden Roh-, Bau- und Werkstoff sowie als Energieträger wachsen aufgrund seiner positiven Materialeigenschaften und der günstigen Ökobilanz weiter an. Der inländische Verbrauch von Holzrohstoffen hat in den vergangenen zwei Jahrzehnten kontinuierlich zugenommen. So ist beispielsweise die Holzbauquote in Deutschland im Jahr 2020 erstmals über 20 % gestiegen (vgl. Kap. Bau). Der Wald stellt neben dem Rundholz aus der Forstwirtschaft auch sonstige Holzrohstoffe wie Hackschnitzel oder Scheitholz unter anderem aus Waldrestholz zu Verfügung. Daneben liefern Nebenprodukte aus der Holzwirtschaft wie Hackschnitzel, Sägespäne und Rinde wichtige Rohstoffe für die holzbasierte Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland.

Die vom BMEL initiierte „Charta für Holz 2.0“ gilt als Meilenstein und als politischer Handlungsrahmen zum Erreichen der Ziele aus dem „Klimaschutzplan 2050“ der Bundesregierung. Die Charta ist ein von Bund, Ländern, Wirtschaft und Wissenschaft getragener gesamtgesellschaftlicher Dialogprozess zur Verwendung des klimafreundlichen Rohstoffes Holz. Dabei steht die Charta für Holz unter dem Motto „Klima schützen – Werte schaffen – Ressourcen effizient nutzen“ und verfolgt drei Ziele: Die Stärkung des Klimaschutzbeitrages durch mehr Holzverwendung aus nachhaltiger Forstwirtschaft. Den Erhalt und die Stärkung von Wertschöpfung und Wettbewerbsfähigkeit des Clusters Forst & Holz. Und die Schonung endlicher Ressourcen durch nachhaltige und effiziente Nutzung von Wäldern und Holz. Die Charta für Holz ist ein Gemeinschaftswerk – die unterschiedlichen Akteure sind aufgerufen, eigene Aktivitäten im Sinne der Zielsetzung der Charta umzusetzen (charta-fuer-holz.de).

Über das Förderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“ unterstützt das BMEL Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur dauerhaften Sicherung der Rohholzversorgung, zur Steigerung der stofflichen Holzverwendung sowie zur konsequenten Umsetzung von Kreislaufwirtschaft, Material- und Ressourceneffizienz. Im Züchtungsbereich gibt es zahlreiche Forschungsanstrengungen mit dem Ziel, das Ökosystem Wald mittels heimischer klimaresilienterer Baumarten dauerhaft zu erhalten. Anhand von ökonomischen, ökologischen und soziologischen Analysen werden neuer Managementkonzepte entwickelt und die Grenzen der Waldbewirtschaftung ausgelotet. Zudem wird mithilfe neuester Technologien versucht,

Waldholz als Ressource



In Deutschland gibt es derzeit mehr als 11 Mio. Hektar Wald. Das entspricht 32 % der Landesfläche. Der Wald erbringt zahlreiche Ökosystemleistungen und ist überdies ein bedeutender Rohstofflieferant: Inklusive der mehrfachen Nutzung von Rest- und Recyclinghölzern (Kaskadennutzung) werden pro Jahr insgesamt 127 Mio. Kubikmeter Holzrohstoffe verwendet – als Bau- und Werkstoff sowie als Energieträger. Zugleich ist der Wald wertvoller Lebensraum für Flora und Fauna, Trinkwasserreservoir, Kohlenstoffspeicher und Ort der Erholung. Die Walderhaltung und -mehrung, eine nachhaltige, naturnahe Waldbewirtschaftung sowie die Substitution energieintensiver Materialien mit nachteiliger CO₂- und Ökobilanz durch Holz tragen zur Verminderung der Treibhausgasemissionen und zum Klimaschutz bei. Die Folgen des Klimawandels, wie zunehmende Trockenperioden und Witterungsextreme, setzen dem Ökosystem Wald zu. Jährlich stellt der Bund über den Waldklimafonds ca. 30 Mio. Euro für Forschungs- und Entwicklungsprojekte, bei denen die Anpassung der Wälder an den Klimawandel im Vordergrund steht, zur Verfügung. Stand 2022 werden mehr als 250 Forschungs- und Entwicklungsprojekte gefördert. Auf Initiative des BMEL wurden für die Jahre 2020 bis 2023 in der GAK 480 Mio. Euro zusätzliche Bundesmittel für den Wald bereitgestellt – mit Co-Finanzierung der Länder sind das knapp 800 Mio. Euro. Im Rahmen des im Juni 2020 geschnürten Konjunkturpakets der Bundesregierung wurden weitere 700 Mio. Euro für Wald und Holz zur Verfügung gestellt, unter anderem für die Bundeswaldprämie, mit der eine besonders nachhaltige Forstwirtschaft im Privat- und Kommunalwald unterstützt wurde.

die Eigenschaften für Holz als Ausgangsstoff für die stofflichen Nutzungsmöglichkeiten in der Industrie weiter zu verbessern. Besonderes Augenmerk liegt auf der verstärkten Verwendung von Laubholz. Hierfür ergeben sich vielversprechende Einsatzmöglichkeiten als Werkstoffe oder als Rohstoff für die Produktion von biobasierten Chemikalien (vgl. Kap. Bau; Chemie).

Mikroorganismen und Insekten

Eine weitere zentrale biologische Ressource sind Mikroorganismen wie Bakterien, Hefen und Schimmelpilze. Sie werden bereits seit Jahrtausenden als winzige Helfer bei der Herstellung von Lebensmitteln wie Bier oder Käse eingesetzt. Mikroorganismen sorgen aber auch in Klärwerken oder in Biogasanlagen für den Abbau von organischen Stoffen. In der chemischen und pharmazeutischen Industrie sind Mikroorganismen inzwischen bedeutende „Arbeitstiere“ (vgl. Kap. Chemie; Pharma). Wichtige mikrobielle Zellfabriken sind etwa das Bakterium *Escherichia coli*, das in der Aminosäureproduktion eingesetzte *Corynebacterium glutamicum* oder der Schimmelpilz *Aspergillus niger* als wichtiger Zitronensäurelieferant. Eine alternative tierische Proteinquelle stellen Insekten dar. Etwa 1.500 bis 2.000 Insektenarten werden in mehr als 100 Ländern der Welt verzehrt. Wie andere tierische Lebensmittel zeichnen sich Insekten durch ihren hohen Proteingehalt aus, zugleich

können sie ressourcenschonend in großen Mengen gezüchtet werden. In Europa fallen Insektenprodukte unter die Novel-Food-Verordnung. 2021 wurden Mehlwürmer als „neuartige Lebensmittel“ in der EU zugelassen. Während Insekten-Food noch eine Marktnische ist, wird Insektenprotein als Tierfutterzusatz großes Potenzial eingeräumt – so etwa in der Aquakultur. Auch als Rohstofflieferanten kommen Insekten infrage.

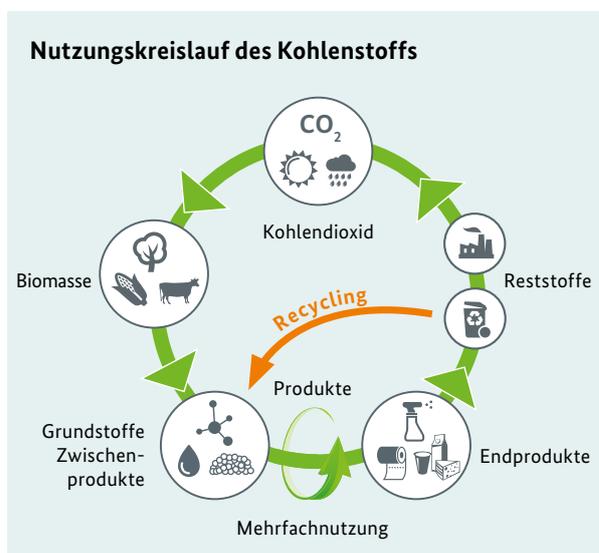
Herausforderung Kreislaufwirtschaft

Die Bioökonomie zeichnet sich dadurch aus, dass nicht nur die in Land- und Forstwirtschaft erzeugten, geernteten und primär verarbeiteten Biomasseanteile genutzt werden. Immer stärker rückt der Fokus auch auf das bisher weitgehend ungenutzte Potenzial aus Ernterückständen und Reststoffen wie Stroh, Waldrestholz oder Gülle. Hinzukommen Reststoffe, die in der industriellen Produktion und Weiterverarbeitung anfallen: Hierzu zählen klassische Abfallstoffe wie Rapspresskuchen, Algenrestbiomasse, Gärreste, Molke oder Fruchtschalen. Um die anfallenden Abfallstoffmengen abschätzen zu können, hat das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) im Rahmen des nationalen Bioökonomie-Monitorings eine Sammlung zum Ressourcenangebot und zur -nutzung von biogenen Reststoffen, Nebenprodukten und Abfällen aus fünf Sektoren erarbeitet. Zudem rückt das Treib-

Nachwachsende Rohstoffe im Fokus

Mit dem Förderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“ verfolgt das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) das Ziel, den Einsatz land- und forstwirtschaftlicher Rohstoffe pflanzlichen oder tierischen Ursprungs in der Industrie voranzutreiben. Dies umfasst sowohl stoffliche als auch energetische Verfahren und beinhaltet mehrere Schwerpunkte (z. B. Bauen und Wohnen, Biowerkstoffe und Holz, nachhaltige Bioenergieträger sowie Rohstoffpflanzen und biogene Reststoffe). Die Vorhaben werden durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) betreut. Stand 2022 werden fast 900 Forschungs- und Entwicklungsprojekte betreut, in die jährlich ca. 90 Mio. Euro fließen.





hausgas Kohlendioxid in den Fokus, auch wenn seine Auf- und Weiterverarbeitung erst in jüngster Zeit von Seiten der Forschung erschlossen wird. Vielversprechende Entwicklungen in der Biotechnologie gibt es bei der direkten Nutzung von CO₂ oder dem in der Industrie anfallenden Synthesegas als Kohlenstoffquelle. So können mithilfe von Mikroorganismen kohlenstoffhaltige Gase aus Stahlwerken oder Biogasanlagen genutzt werden, um daraus biobasierte Chemikalien herzustellen.

Das Konzept der Bioökonomie zielt insbesondere darauf ab, geschlossene Stoffkreisläufe zu etablieren und vorhandene Ressourcen möglichst effizient im Sinne einer Kaskadennutzung einzusetzen. Zentrales Ziel dabei ist eine Mehrfachnutzung von Biomasse. Zunächst erfolgt eine stoffliche Nutzung des in biobasierten Produkten gebundenen Kohlenstoffs. Dabei sollte die stoffliche Nutzung möglichst mehrfach erfolgen, bis am Ende einer möglichst langen stofflichen Nutzungsphase der Kohlenstoff bei der energetischen Nutzung in Form von CO₂ wieder freigesetzt wird. Das Beispiel Holz: Aus Cellulose wird Papier, benutztes Papier wird erneut zu Papier, danach zu Dämmmaterial für Gebäude weiterverarbeitet und wenn es hier ausgedient hat, wird es als Material zur Energiegewinnung verheizt. Ähnliche Kaskadennutzungen sind bei der Verwertung von Stroh denkbar. Aktuell fallen hiervon in Deutschland schätzungsweise etwa 43 Mio. Tonnen (Frischmasse) an, überwiegend als Getreidestroh. Für die energetische und stoffliche Nutzung stehen zwischen 20 % und 30 % des anfallenden Strohs zur Verfügung,

werden aber noch nicht in dem Umfang abgerufen. Bei tierischen Reststoffen hingegen sind bestehende Stoffkreisläufe bereits eng miteinander verzahnt, allerdings ergibt sich hier noch weiteres Potenzial mit Blick auf höherwertige Anwendungen oder eine mehrfache stoffliche Nutzung.

Die Nationale Bioökonomiestrategie der Bundesregierung setzt darauf, den Kohlenstoff-Kreislauf der Natur in einer künftigen biobasierten Industrie abzubilden. Das bedeutet: Es geht nicht einfach darum, fossile Ressourcen durch nachwachsende Rohstoffe zu ersetzen. Vielmehr gilt es, das in Biomasse steckende Potenzial wesentlich effektiver auszuschöpfen und die resultierenden Stoffströme ressourceneffizient und nachhaltig für unterschiedliche Industriezweige zu erschließen. Hier gibt es in den verschiedensten Branchen bereits vielversprechende Ansätze. Auf Verfahrensebene sind Konzepte der Bioraffinerie in der Erprobung (vgl. Kap. *Kreislaufbasierte Bioproduktion*). Gleichzeitig müssen die biologischen Ressourcen in ihrer Gesamtheit in den Blick genommen werden. Denn eine ideale Kreislaufwirtschaft stellt alle Beteiligten vor große Herausforderungen: So erfordert die stoffliche und energetische Nutzung von Biomasse im Detail andere Anforderungen an die Quantität und Qualität von Rohstoffen als ihre Verwendung im Nahrungs- und Futtermittelbereich. Darüber hinaus ergeben sich sowohl im Vergleich der stofflichen und energetischen Nutzung von Biomasse als auch bei den dort vorhandenen, verschiedenen Nutzungspfaden selbst jeweils andere relevante Parameter.

Ein wichtiger Aspekt ist die Flächenverfügbarkeit. Denn Biomasse ist zwar prinzipiell erneuerbar, aufgrund begrenzter Anbauflächen jedoch eine limitierte Ressource. Gefragt ist daher ein intelligenter Umgang mit Biomasse. Die Bioökonomie liefert den Rahmen, um auf der Basis von Hightech-Werkzeugen und biobasierten Produktionsverfahren die Aspekte Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit in der Wirtschaft abzubilden. Nur so kann es gelingen, die Konkurrenz verschiedener Nutzungspfade von nachwachsenden Ressourcen, ein Nebeneinander von Ökolandbau und konventioneller Land- und Forstwirtschaft zu gewährleisten. Gleichzeitig bietet die Bioökonomie die Chance, die mit Biomasse erzeugte Wertschöpfung am Standort Deutschland zu steigern und auch für ländliche Räume eine nachhaltige Weiterentwicklung zu ermöglichen.



Kreislaufbasierte Bioproduktion

Biobasierte Produktionsprozesse können einen wichtigen Beitrag zu einem nachhaltigen, klimaneutralen Wirtschaften leisten. Dabei sollen Ressourcen geschont und Biomasse effizient produziert und genutzt werden. Die Etablierung einer biobasierten Kreislaufwirtschaft ist das zentrale Ziel der Nationalen Bioökonomiestrategie. Der Biotechnologie kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. Viele weitere Technologien helfen, neue Wertschöpfungskreisläufe aufzubauen.

Biomasse ist im Vergleich zu anderen Rohstoffformen besonders dafür geeignet, um in Kreisläufen nachhaltig genutzt zu werden. Die Bioökonomie orientiert sich an diesen natürlichen Stoffkreisläufen und entwickelt innovative Lösungen, um die Produktion und Nutzung von Biomasse nachhaltig zu gestalten.

Da die natürlichen Grundlagen für die Biomasse-Produktion, insbesondere Agrarflächen, begrenzt sind, liegt ein Schlüssel im effizienten und schonenden Umgang mit biologischen Ressourcen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Angestrebt wird eine Kreislaufwirtschaft, in der möglichst wenig Abfall und Reste entstehen und auch Nebenströme genutzt werden. Auf dem Weg in eine biobasierte Wirtschaft kommt ebenso ressourceneffizienten und innovativen Technologien und Produktionsprozessen eine große Bedeutung zu.

Biobasiertes Wirtschaften ist eine wichtige Strategie, um den Verbrauch fossiler Ressourcen und den Ausstoß von CO₂ zu reduzieren und die Umweltverträglichkeit industrieller Prozesse zu steigern. Damit kann die Bioökonomie zu einer nachhaltigen und klimaneutralen Wirtschaftsweise einen wichtigen Beitrag liefern.

Nachhaltiges Bodenmanagement

Ganz am Anfang der Wertschöpfungsketten in der Bioökonomie steht die Primärproduktion – und damit die Erzeugung von Biomasse. Der nachhaltige Anbau der dafür notwendigen Pflanzen kann nur auf dafür geeigneten Böden gelingen. In Deutschland werden rund 46 % der gesamten Fläche landwirtschaftlich genutzt. Hinzu kommen weitere 30 % an Waldfläche. Mit 27,2 Mio. Hektar Fläche ist der Boden der wichtigste Produktionsfaktor für Land- und Forstwirtschaft (vgl. Kap. Land- und Forstwirtschaft).

Böden sind sensible Ökosysteme, die ihrerseits sogenannte Ökosystem-Dienstleistungen vollbringen. Dazu zählt beispielsweise das Speichern von Wasser oder Kohlenstoff, was direkte Auswirkungen auf klimatische Veränderungen hat. Welche genau das sein können, hat die erste deutschlandweite „Bodenzustandserhebung Landwirtschaft“ offenbart, für die das Thünen-Institut für Agrarklimaschutz Bodenproben von mehr als 3.000 Standorten untersuchte.

Demnach enthalten die landwirtschaftlich genutzten Böden im oberen Meter 2,5 Mrd. Tonnen organischen Kohlenstoff. Zwei Drittel des Kohlenstoffs sind dabei in den oberen 30 Zentimetern gespeichert. Moorböden und andere wasserbeeinflusste Böden in Norddeutschland und dem Alpenvorland speichern hierbei besonders viel Kohlenstoff. Die vom BMEL geförderte Bodenzustandserhebung soll künftig alle zehn Jahre stattfinden. Dieses Monitoring liefert wichtige Daten für ein nachhaltiges Bodenmanagement und den Klimaschutz.

Böden bilden sich in langandauernden Prozessen und lassen sich daher nicht kurzfristig erneuern oder ersetzen. Vor diesem Hintergrund ist es kaum verwunderlich, dass sich die Wissenschaft immer mehr der Frage zuwendet, wie die Leistungsfähigkeit agrarisch genutzter Böden dauerhaft erhalten und verbessert werden kann. Zum Aufbau von Humus und einem ausgewogenen Nährstoffkreislauf tragen beispielsweise eine vielfältige Fruchtfolge, der Anbau von Zwischenfrüchten, die Zufuhr organischer Reststoffe und die organische Düngung bei. Wichtig ist auch ein aktives Bodenleben, welches von Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen geprägt wird.

Forschungsaktivitäten zur nachhaltigen Bodennutzung unterstützt beispielsweise das BMBF gezielt mit der langfristig ausgelegten Fördermaßnahme „Böden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie – BonaRes“. Hier arbeiten zehn Forschungsverbände daran, das wissenschaftliche Verständnis von Bodenökosystemen zu erweitern und die Produktivität der Böden und ihre anderen Funktionen zu verbessern



Leguminosen spielen als Stickstoffsammler eine wichtige Rolle für ein nachhaltiges Bodenmanagement.

sowie neue Strategien für eine nachhaltige Nutzung und Bewirtschaftung von Böden zu entwickeln.

Zellen als Bio-Fabriken

Als wichtigen Schritt der biobasierten Wertschöpfungskette kommen häufig die Verfahren der industriellen Biotechnologie ins Spiel: Mikroorganismen, Zellen und Enzyme werden hier als biologische Helfer eingesetzt, um nachwachsende Rohstoffe in hochwertige Zwischen- oder Endprodukte zu verwandeln.

Mikroorganismen sind Multitalente der Stoffumwandlung. Ihre in der industriellen Biotechnologie gefragten Fähigkeiten gründen auf der Fermentation: Durch diesen Stoffwechselprozess wandeln die Mikroorganismen Biomasse in andere Moleküle um – das können organische Säuren, Aminosäuren, Alkohole, Biopolymere oder therapeutische Proteine sowie Enzyme sein. Mikrobiell hergestellte Enzyme lassen sich wiederum als Spezialwerkzeuge nutzen, um biobasierte Produkte umzubauen, abzubauen oder zu veredeln. In der Lebensmittelindustrie, der Futtermittel- und der Konsumgüterindustrie sind die Biokatalysatoren als „Produktionsassistenten“ heute nicht mehr wegzudenken. Für die industrielle Produktion werden bisher nur wenige Dutzend Produktionsorganismen genutzt. Neben Bakterien, Hefen und Schimmelpilzen gehören dazu auch tierische und pflanzliche Zellkulturen. Für ihren Einsatz in biotechnologischen Produktionsprozessen werden sie zu leistungsfähigen Zellfabriken umfunktioniert. Damit die empfindlichen Zellfabriken Spitzenleistungen erbringen und sich optimal vermehren können, werden sie unter möglichst idealen Bedingungen herangezüchtet. Bioreaktoren – auch Fermenter genannt – sind das Kernstück jeder



Die Bäckerhefe ist ein gefragter Produktionsorganismus der Bioindustrie.

biotechnologischen Produktionsanlage. Damit diese betrieben werden können, ist innovative Bioprozesstechnik gefragt (vgl. Kap. Maschinenbau; Pharma).

Kaskaden und Kreisläufe

Produzieren, konsumieren, wegwerfen – in der Wirtschaft sind viele klassische Wertschöpfungsketten Einbahnstraßen. Ein Ziel der Bioökonomie ist es, in sich geschlossene Kreislaufsysteme aufzubauen, in denen möglichst wenig Substanzen aus dem Kreislauf abgegeben werden. Das wird erreicht, indem natürliche Roh- und Abfallstoffe nicht nur be- und verarbeitet, sondern im Idealfall auch mehrfach genutzt und weiterverarbeitet oder vollständig recycelt werden.

In der Natur gehen biologische Ressourcen Stoffkreisläufe ein. Der Stoffwechsel der Lebewesen ist Teil des größeren Kohlenstoffkreislaufs oder Stickstoffkreislaufs. Die Nutzung und die Neubildung von Ressourcen stehen im Gleichgewicht. Dabei entsteht möglichst kein Abfall und keine Reste. Biomasse ist besonders dafür geeignet, um in Kreisläufen nachhaltig genutzt zu werden. Das schließt sowohl eine stoffliche Verwendung als auch die Kompostierung ein. Am Ende einer Nutzungskette kann Biomasse zudem energetisch verwendet werden.

Dabei wird im Prinzip nicht mehr CO₂ freigesetzt als während der Wachstumsphase der Atmosphäre entzogen wurde. Biologische Ressourcen und biobasierte Produkte können somit eine klima- und ressourcenschonende Alternative zu fossilen Rohstoffen und Erzeugnissen sein. Biobasierte Kreisläufe sind dort möglich, wo bisher schon organische Rohstoffe Verwendung finden. Hinzu können biobasierte Alternativen zu konventionellen Materialien und Produktionsprozessen entwickelt werden. Ein Schlüssel zur Kreislaufwirtschaft ist der effiziente Umgang mit Ressourcen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Aus weniger mehr erzeugen – das gilt für Produktdesign, die Produktion, den Konsum und für die Verwertung von Abfällen. Ziel ist es, Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch zu entkoppeln. Das zentrale Konzept der Kaskadennutzung zielt darauf ab, vorhandene biobasierte Ressourcen nachhaltig und möglichst vollständig – das heißt mit allen ihren Bestandteilen – zu verwerten. Immer stärker rückt der Fokus auf das bisher weitgehend ungenutz-

Hier wird das Konzept Bioraffinerie erforscht und weiterentwickelt



Bioraffinerien sind technische Anlagen, in denen pflanzliche Biomasse in ihre Bestandteile zerlegt und möglichst vollständig genutzt wird – analog zu einer Erdölraffinerie. Eine Auswahl von Pilot- und Demonstrationsanlagen an fünf Standorten, an denen bundesweit das Konzept Bioraffinerie erforscht und weiterentwickelt wird:

Aachen: Im Center for Next Generation Processes and Products (NGP²) der Aachener Verfahrenstechnik an der RWTH wurde eine Bioraffinerie im Technikumsmaßstab errichtet: In dem 2017 bezogenen modularen Anlagenkomplex, gefördert von Bund und Land Nordrhein-Westfalen, werden neuartige Prozesse zur Umwandlung grüner oder hölzerner Biomasse zu Plattformchemikalien und Kraftstoffkomponenten erforscht. Die RWTH ist Kooperationspartner im Bioeconomy Science Center.

Leuna: Ein Spitzenzentrum für Bioraffinerie-Forschung ist das Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse (CBP). Bund und Land Sachsen-Anhalt haben 53 Mio. Euro in den Aufbau des Zentrums investiert, das 2012 seinen Betrieb aufnahm. Der Gebäudekomplex in Deutschlands zweitgrößtem Chemiapark bietet Platz für mehrere Prozessanlagen (vgl. Foto S.20). Im Fokus steht die stoffliche Nutzung pflanzlicher Öle, der Aufschluss und die Verwertung von Lignocellulose aus Holz und die Produktion technischer Enzyme. Kooperationspartner aus Forschung und Industrie können hier Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit biotechnischer und chemischer Prozesse zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe testen.

Straubing: Das Unternehmen Clariant hat in Straubing für 28 Mio. Euro eine Demonstrationsanlage zur biotechnologischen Gewinnung von Biokraftstoffen der zweiten Generation errichtet, gefördert vom BMBF und dem Freistaat Bayern. Aus Weizenstroh und anderen Feldabfällen entstehen jährlich 1.000 Tonnen Cellulose-Ethanol. In Rumänien hat Clariant im Herbst 2021 eine kommerzielle Anlage auf Basis des sunliquid-Verfahrens fertiggestellt. Bis zu 250.000 Tonnen Stroh werden hier jährlich zu 50.000 Tonnen Cellulose-Ethanol umgewandelt (vgl. Foto oben).

Karlsruhe: Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erforscht in der bioliq-Pilotanlage die Erzeugung von synthetischen Biokraftstoffen. Stroh und andere lignocellulosebasierte Biomasse wird hier zu Synthesegas verarbeitet. Aus trockener Biomasse werden synthetische Kraftstoffe und chemische Grundprodukte hergestellt. Als Nebenprodukte entstehen Wärme und Strom, die den Energiebedarf des Prozesses decken.

Hohenheim: In der landwirtschaftlichen Versuchsstation der Universität Hohenheim „Unterer Lindenhof“ wird das Konzept einer Bioraffinerie-Farm erprobt. Zusammen mit dem KIT wird am Standort eine Lignocellulose-Bioraffinerie im Technikumsmaßstab etabliert. Als pflanzlicher Rohstoff dient das Gras Miscanthus. Daraus wird unter anderem die Basischemikalie Hydroxymethylfurfural (HMF) gewonnen, ein Synthesebaustein für Kunststoffe und Kraftstoffe. Reststoffe aus dem Prozess werden wiederum in einer Biogasanlage energetisch verwertet und landen als Dünger wieder auf dem Feld.

te Potenzial von Ernterückständen und Reststoffen wie Stroh, Waldrestholz oder Gülle. Hinzukommen Reststoffe, die in der industriellen Produktion und Weiterverarbeitung anfallen: Hierzu zählen klassische biologische Abfallstoffe wie Raps-Presskuchen, Algen-Restbiomasse, Gärreste, Molke oder Fruchtschalen. Aber auch Abfallströme wie CO₂ oder Klärschlämme gehören dazu. Vielversprechende Entwicklungen in der Biotechnologie gibt es bei der direkten Nutzung von CO₂ oder dem in der Industrie anfallenden Synthesegas als Kohlenstoffquelle. So können mithilfe von Mikroorganismen kohlenstoffhaltige Gase aus Stahlwerken oder Biogasanlagen genutzt werden, um daraus biobasierte Chemikalien herzustellen. Mit dieser mikrobiellen CO₂-Verwertung wird es möglich, den Kohlenstoffkreislauf durch industrielle Verfahren zu schließen und klimaneutral zu gestalten.

Mikroorganismen und Enzyme können auch helfen, seltene Metalle oder Phosphor zurückzugewinnen. In dem sie Kunststoffe in ihre Grundbausteine zerlegen können, weisen sie den Weg in biotechnologisches Plastikrecycling (vgl. Kap. Chemie). Geschlossene Nährstoff- und Wertstoffkreisläufe spielen zudem in innovativen Agrarsystemen wie den sogenannten Indoor-

Farmen eine wesentliche Rolle. Hier werden moderne Anbautechnologien klug miteinander kombiniert und organische Abfall- und Restströme gezielt genutzt (vgl. Kap. Land- und Forstwirtschaft).

Bioraffinerie als Zukunftskonzept

Bioraffinerien sind die großen industriellen Fabriken der Bioökonomie. Vergleichbar mit einer Erdölraffinerie wird hier Biomasse so effizient wie möglich in ihre chemischen Einzelteile zerlegt und verwertet. Biomasse eignet sich als komplexer Rohstoff nicht nur als Energieträger, sondern auch als Ausgangsstoff für die Gewinnung von Chemikalien und Werkstoffen. Moderne Bioraffinerien setzen das Prinzip der Kaskadennutzung besonders konsequent um: Das pflanzliche Stoffgemisch Biomasse wird mithilfe verschiedener Technologien in ein breites Spektrum aus Zwischen- und Endprodukten umgewandelt und somit möglichst vollständig verwertet.

Zudem koppelt man in der Regel stoffliche und energetische Nutzung miteinander. In sämtlichen Prozessschritten ist biotechnologisches Know-how gefragt.

Innovative Wertschöpfungsketten für die Bioökonomie

Verschiedene Bundesministerien fördern die Entstehung von bioökonomischen Wertschöpfungsketten. So werden Schnittstellen zwischen Forschung und Anwendung geschaffen und Akteure im Innovationsprozess vernetzt:

Das **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)** fördert vier Innovationsräume Bioökonomie mit jeweils bis zu 20 Mio. Euro. Diese branchenübergreifenden Netzwerke vernetzen Unternehmen und Forschungseinrichtungen, damit Innovationen für die Bioökonomie schneller in die Anwendung gelangen. Es gibt Innovationsräume zum Thema biobasierte Textilwirtschaft (BIOTEXFUTURE), Metropolregion Frankfurt-Rhein-Main (BioBall), neue Lebensmittelsysteme (NewFoodSystems) und Blaue Bioökonomie (BaMS).

Auch im Rahmen der Innovationsinitiative Industrielle Biotechnologie wird der Aufbau von industriegeführten strategischen Allianzen gefördert. Den biobasierten

Strukturwandel des Rheinischen Braunkohlereviere loten die Forschungsnetzwerke in der Modellregion Bioökonomie im Rheinischen Revier aus.

Das **Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)** fördert Maßnahmen u.a. im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung oder des Förderprogramms Nachwachsende Rohstoffe – zum Beispiel den Ideenwettbewerb „Modellbetriebe Bioökonomie in Mittelgebirgen“ des Deutschen Verbandes für Landschaftspflege (DVL) e.V. und das Projekt „Modellregionen Bioökonomie im Mitteldeutschen Revier und im Lausitzer Revier (MoreBio)“.

Das **Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)** unterstützt den Aufbau einer industriellen Bioökonomie etwa durch die Förderung von Modellregionen und Demonstrationsanlagen. Beraten wird das BMWK dabei von der Dialogplattform Industrielle Bioökonomie.

BMBF-Broschüre: Die Werkzeuge der Bioökonomie

Die Broschüre „Die Werkzeuge der Bioökonomie“, die das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im März 2021 herausgegeben hat, gibt einen kompakten Überblick über die wichtigsten Werkzeuge und Verfahren, die auf dem Weg in eine nachhaltige, biobasierte Wirtschaft zum Einsatz kommen. 40 bebilderte Steckbriefe machen die Werkzeugkiste der Bioökonomie anschaulich. Es geht um Biomoleküle und Zellen, Pflanzenzüchtung und Bioanalytik, industrielle Biotechnologie und die Agrarproduktion der Zukunft. Die Basiswissen-Broschüre richtet sich an alle, die sich für das Thema Bioökonomie interessieren und ist auch für den Einsatz an Schulen und Hochschulen geeignet.

biooekonomie.de/service/publikationen



Enzyme und Mikroorganismen werden als Werkzeuge für die Stoffumwandlung eingesetzt. Meist sind auch physikalisch-chemische Methoden notwendig.

Um Biomasse nachhaltig zu nutzen und nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion zu treten, basieren viele moderne Bioraffinerie-Konzepte auf der Nutzung von Reststoffen wie Stroh oder Holzabfällen. In Deutschland sind einige große Pilot- und Demonstrationsanlagen entstanden, in denen erforscht wird, ob Bioraffinerien nachhaltig und effizient sind, und wie sie im großindustriellen Maßstab betrieben werden können (vgl. Kasten S. 23 und Kap. Chemie,; Energie). Welche Herausforderungen mit dem Aufbau von Bioraffinerien verbunden sind, haben Fachleute im Auftrag von BMEL und BMBF in der 2012 erschienen „Roadmap Bioraffinerien“ zusammengefasst. Bioraffinerien können demnach einen Beitrag zur Rohstoffwende, Ressourceneffizienz und zum Klimaschutz leisten und völlig neue Produkte als Teil neuer Wertschöpfungsketten hervorbringen.

Neue Wertschöpfungsnetze

Großes Potenzial für die Entwicklung innovativer Prozesse und Produkte in der Bioökonomie entsteht insbesondere, wenn das Know-how unterschiedlicher Technologiebereiche zusammenkommt – etwa wenn

Biologie auf Technik und Informatik trifft. Für den Aufbau einer biobasierten Kreislaufwirtschaft sind neben der Biotechnologie noch weitere Schlüsseltechnologien wesentlich: Von den Gewinnungs-, Aufbereitungs-, Produktions- und Recyclingtechnologien bis hin zu digitalen Technologien für die Steuerung von Stoffströmen oder den Austausch von Daten entlang des Produktlebenszyklus.

Nicht nur Technologien konvergieren, sondern ganze Wertschöpfungsketten. Branchen kooperieren, die vorher nicht oder kaum zusammengearbeitet haben. In diesem Zuge entstehen neue Wertschöpfungsnetze, aus denen innovative und nachhaltige Produkte oder Dienstleistungen hervorgehen. Die Bundesregierung schafft die Rahmenbedingungen, damit solche Formen der Vernetzung an der Schnittstelle von Wissenschaft und Wirtschaft entstehen können und der Transfer von der Forschung in die Anwendung gelingt (vgl. Kasten S. 24).

Zu den öffentlich geförderten Formaten in diesem Bereich gehören die Innovationsräume Bioökonomie, strategische Allianzen, Reallabore und Modellregionen. Auch der innovative Mittelstand wird gefördert, unter anderem im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „KMU-innovativ: Bioökonomie“.



Branchen und Produkte

Wie lässt sich eine biobasierte und nachhaltige Wirtschaftsweise erreichen? Welche Herausforderungen gibt es, und wo existieren bereits vielversprechende Ansätze? In diesem Kapitel werden in alphabetischer Reihenfolge die wichtigsten Branchen für den Standort Deutschland beleuchtet, in denen biobasierte Produktionsprozesse bereits Realität sind. Zugleich werden wichtige Entwicklungen aus Forschung und Innovation erläutert. Viele dieser Aktivitäten werden öffentlich gefördert. Anhand unterschiedlichster Beispiele biobasierter Produkte und Verfahren wird klar: Die Bioökonomie ist bereits in unserem Alltag angekommen.

Automobilbranche



Beispiele aus der Bioökonomie:
Naturfaserverstärkte Karosserieteile, Biokunststoff-basierte Innenverkleidung und Autositze, Reifen aus Löwenzahn-Kautschuk

Maschinenbau



Beispiele aus der Bioökonomie:
Bioreaktoren, Bioprozesstechnik, Biogasanlagen, Landtechnik und Landmaschinen, Gewächshaus-technik, Bioschmierstoffe

Bau



Beispiele aus der Bioökonomie:
Holzbau, naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe, Dämmstoffe, Biodübel, biobasierter Beton-zusatz

Ernährungsindustrie



Beispiele aus der Bioökonomie:
Enzyme, Aromen und Aminosäuren, natürliche Lebensmittel-zusätze, Probiotika, Lebensmittel aus Lupinenprotein

Chemie



Beispiele aus der Bioökonomie:
Biokunststoffe, biobasierte Plattformchemikalien

Pharma



Beispiele aus der Bioökonomie:
Biopharmazeutika, Arzneipflanzen

Energie



Beispiele aus der Bioökonomie:
Holzpellettheizungen, Biogas, Biodiesel, Bioethanol, Synthesekraftstoffe, Algenkerosin, Bio-wasserstoff

Konsumgüter



Beispiele aus der Bioökonomie:
Biobasierte Tenside, bioaktive Inhaltsstoffe für Kosmetik, enzymbasierte Reinigungszusätze

Land-/Forstwirtschaft



Beispiele aus der Bioökonomie:
Präzisionslandwirtschaft, Pflanzen- und Tierzucht, Kurzumtriebsplantagen, Aquakultur, Indoor-Farming

Textilien/Bekleidung



Beispiele aus der Bioökonomie:
natürliche Rohstoffe für synthetische Fasern, Hightech-Fasern aus Spinnenseideprotein, pflanzliche Gerbstoffe, veganer Leder-Ersatz



Automobilbranche

Das Auto ist auch in Zukunft wichtiger Baustein der Mobilität. Mit Blick auf Klimaziele und internationale Wettbewerbsfähigkeit sind alternative Antriebstechnologien gefragt. Die Hersteller setzen auf Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe, um immer leichtere Fahrzeuge zu bauen, Ressourcen zu schonen und eine Kreislaufwirtschaft zu realisieren.



Der Verkehrssektor ist für rund ein Fünftel der deutschen Treibhausgas-Emissionen verantwortlich, davon gehen wiederum mehr als 95 % auf das Konto des Straßenverkehrs. Auf dem Weg zur Klimaneutralität steht der Mobilitätssektor vor einem grundlegenden Wandel. Mittendrin in dieser Transformation: das Auto. In Deutschland gab es nach Angaben des Verbands der Automobilindustrie 2020 mehr als 48 Mio. Pkw. Zwar ist die Inlandsproduktion deutscher Hersteller seit 2017 rückläufig, sie lag 2020 aber immer noch bei rund 3,5 Mio. Fahrzeugen. Der Umsatz im In- und Ausland betrug 2020 insgesamt 378,2 Mrd. Euro, erwirtschaftet von rund 809.000 Beschäftigten. Die internen Ausgaben für Forschung und Entwicklung lagen 2018 bei etwa 27 Mrd. Euro. Im Mai 2021 überschritt der Anteil von Elektroautos an der Produktion erstmals 20 %.

Alternative Antriebe der Zukunft

Einer der wichtigsten Treiber des Strukturwandels in der Automobilindustrie ist die Umstellung auf alternative Antriebstechnologien. Eindeutig im Fokus der Branche stehen Elektromotoren, die entweder durch Batterien oder Wasserstofftechnologien (Brennstoffzellen) angetrieben werden. Doch klar ist auch, dass der Verbrennungsmotor zumindest in Teilen der Automobilbranche auch in Zukunft eine Rolle spielt. Das gilt insbesondere bei Nutzfahrzeugen mit großer Reichweite oder solchen, die im Gelände abseits von Straßen unterwegs sind – also etwa in der Landwirtschaft. Als grüne Kraftstoffe kommen hier unter anderem Biokraftstoffe infrage oder synthetische Kraftstoffe (vgl. Kap. Energie).

Erdöl wird hier nicht nur in Form von Benzin, Diesel oder Schmierstoff gebraucht, sondern auch als Ausgangsstoff für viele Autoteile genutzt – angefangen vom Autolack über weite Teile des Interieurs, elektronische Bauteile bis hin zu Displays. Heute gehen etwa 10 % der Kunststoffe, die jährlich in Deutschland produziert werden, in die Automobilindustrie. Dies liegt vor allem daran, dass diese Materialien leicht, gut formbar sind und eine gute Wärme- und Geräuschdämmung aufweisen. Aber auch Hybridteile, die aus Metall und Kunststoff zusammengesetzt sind, kommen zum Einsatz. Einige Kunststoffe sind sogar so robust, dass sie als Ersatz für Metall dienen.

Biowerkstoffe für den Leichtbau

Ressourceneffizienz, Leichtbau und Kreislaufwirtschaft sind Topthemen in der Fahrzeugindustrie. Nicht nur, um ressourcensparende Fahrzeuge zu konstruieren, sondern auch um Produktionsprozesse nachhaltiger zu gestalten, rücken bei den Autobauern immer stärker biobasierte Alternativen in den Fokus. Im Interieur und bei der Karosserie kommen Pflanzenfasern, biobasierte Kunststoffe sowie naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe für den Leichtbau zum Einsatz.

Die Verwendung von Naturfasern hat im Automobilbau Tradition. Armauflagen, Gepäckraum-Ladeböden und Isolierungen werden daraus gefertigt. Fasern aus Kokosnuss, Rüben oder Kaffeesatz lassen sich als Füllstoffe nutzen. Bei der Herstellung des Armaturenbretts und des Innenraums – etwa in Kofferraum und Türen – nutzen Autobauer Naturfasern hingegen als Verstärkungsmaterial für Leichtbauteile und die Fahrzeugkarosserie. Ein Pluspunkt der Werkstoffe aus Flachs, Sisal und Co. ist ihre geringe Splitterneigung, die bei der Verarbeitung und beim Auftreten von Unfällen von Vorteil ist. In solchen Bioverbundwerkstoffen sind Pflanzenfasern in eine Kunststoffmatrix eingebettet, die erdölbasiert oder biobasiert sein kann.

Im Jahr 2018 wurden nach Zahlen des nova-Instituts etwa 150.000 Tonnen solcher Bioverbundwerkstoffe im europäischen Automobilssektor verbaut. Zum Beispiel erprobt die Volkswagentochter Seat in einem Pilotprojekt einen Bioverbundwerkstoff namens Oryzite, der aus Reishülsen, Polyurethan und Polypropylen besteht. Dieser Werkstoff soll in Heckklap-

pen, im Ladeboden oder im Dachhimmel zum Einsatz kommen.

Autohersteller setzen zudem auf Biokunststoffe. Hierbei handelt es sich entweder um sogenannte Drop-in-Lösungen oder neuartige und biologisch abbaubare Biokunststoffe (vgl. Kap. Chemie). Biobasierte Polyamide aus Rizinusöl werden in Hochleistungsbauteilen eingesetzt, Polymilchsäure (PLA) in Türinnenverkleidungen, sojabasierte Schäume in Sitzpolstern und Armlehnen.

Eine Herausforderung beim Einsatz von Biokunststoffen im Automobilbau liegt in ihrer Verarbeitungsfähigkeit. Entsprechend widmen sich viele Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der Frage, wie bestehende Spritzgussverfahren für die Herstellung von biobasierten Autoteilen angepasst werden können. Auch die Recyclingfähigkeit von Biokunststoffen wird immer intensiver erforscht.



Selbsteheilende Lacke werden in der Nanotechnologie seit mehr als einem Jahrzehnt entwickelt. In einem vom BMBF geförderten Projekt haben Saarbrücker Forschende vom Leibniz-Institut für Neue Materialien mit der Universität des Saarlandes einen selbstheilenden Fahrzeuglack entwickelt. Sie verwendeten ringförmige Abkömmlinge der Maisstärke, sogenannte Cyclodextrine, die zu einer Kette aufgefädelt sind. Bei Wärme sind sie beweglich und können oberflächliche Kratzer ausgleichen. Auch die Universität Paderborn hat mit der PPG Hemmelrath Lackfabrik an einem biobasierten, kratzfesten und selbstheilenden Lack geforscht. Gefördert wurden sie vom BMEL.



Aus biogenen Fasern, Harzen und Lacken entstehen am Fraunhofer-Institut für Holzforschung Leichtbauteile für das Bioconcept-Car.

Dies passiert unter anderem an der Hochschule Hannover im Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (IfBB), das mit allen großen Automobilherstellern und Firmen entlang der Wertschöpfungskette zusammenarbeitet, um biobasierten Materialien sowie deren industrieller Produktion den Weg zu bereiten. In einem neuen vom BMEL geförderten Projekt wird zum Beispiel untersucht, inwiefern sich Biokunststoffe für Teile eignen, die hohen Temperaturen und Belastungen ausgesetzt sind.

Rasendes Testlabor für biobasierte Werkstoffe

Eine ungewöhnliche Allianz aus einem Rennsport-Team, Sportwagenbauenden und Materialforschenden steht hinter dem „Bioconcept-Car“. Bereits seit mehr als 15 Jahren gibt es dieses Projekt des Reutlinger Rennsportteams Four Motors, zu dem unter anderem Sänger Smudo von den Fantastischen Vier gehört. Das Ziel: Rennwagen konstruieren und erproben, die zu großen Teilen aus Biowerkstoffen gebaut sind und mit Biokraftstoffen fahren.

Gefördert vom BMEL sind aus dem Projekt seit 2003 sieben Konzeptautos hervorgegangen, die im Alltag

über die Teststrecke auf dem Nürburgring brettern (vgl. Foto S. 28). Aktuell fährt Four Motors Rennwagen von Porsche. Der Stuttgarter Autohersteller verbaut bereits seit 2019 naturfaserverstärkte Kunststoffe in einer Kleinserie des Cayman GT4 Clubsport. Für die Bioconcept-Cars wurden Bioverbundwerkstoffe mit einem Anteil nachwachsender Rohstoffe von 30 bis 70 % sowie Biokunststoffteile als Karosserie- und Interieurbauteile entworfen, hergestellt und montiert. Das ist nicht nur ökologisch nachhaltiger: Die Naturfasern aus Flachs sind leichter als Glasfasern und kostengünstiger als Carbonfasern. Forschende vom Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI) haben in einem Forschungsverbund nicht nur Biohybrid-Leichtbauteile für das Bioconcept-Car entwickelt. Nun wollen die Fraunhofer-Forschenden gemeinsam mit den Kooperationspartnern Hobum Oleochemicals GmbH, Porsche Motorsport und Four Motors eine Fahrzeuggürt mit einem biogenen Anteil von 85 % im Gesamtverbund aus Fasern sowie Harz und Lack entwickeln.

Reifen aus Löwenzahn-Kautschuk

Gummi ist ein gefragter Werkstoff, dessen Herstellung sowohl petrochemisch als auch auf der Basis von Naturkautschuk erfolgen kann. Letzterer wird aus

dem Milchsafte des Kautschukbaums (*Hevea brasiliensis*) gewonnen – vor allem in Plantagen in Südostasien. Naturkautschuk bleibt auch bei tiefen Temperaturen elastisch und steht bei Herstellern von Winterreifen deshalb hoch im Kurs. Doch für den Anbau müssen Waldflächen weichen und lange Transportwege sorgen für einen hohen Ressourcenverbrauch und CO₂-Ausstoß.

Eine alternative Quelle ist der Russische Löwenzahn (*Taraxacum koksaghyz*). Er gedeiht auch in unseren Breiten gut. Der Kautschuk aus dem Milchsafte der Wurzeln hat das gleiche Molekulargewicht und die gleiche Elastizität wie der vom Kautschukbaum und lässt sich auch genauso verarbeiten. Seit vielen Jahren erproben Forschende aus Wirtschaft und Wissenschaft gemeinsam, wie sich Löwenzahn zum industriellen Lieferanten für Kautschuk wandeln lässt. Federführend sind Pflanzenforschende der Universität Münster, des Fraunhofer IME und der Reifen-Konzern Continental.

Sowohl das BMBF als auch das BMEL sowie die Europäische Union und das Land Mecklenburg-Vorpommern haben die Forschung und Entwicklung zur industriellen Nutzung von Löwenzahn-Kautschuk umfangreich

gefördert. Dabei geht es um die Gestaltung der gesamten Wertschöpfungskette: Durch moderne Verfahren der Präzisionszüchtung sollen deutlich ertragreichere und robustere Gewächse entstehen. Außerdem geht es in der Allianz darum, die Verarbeitungsschritte und die Gewinnung der Pflanzenrohstoffe zu verbessern und nachhaltig zu gestalten.

Für Hersteller Continental ist der Naturkautschuk aus Löwenzahn zu einem wichtigen Bestandteil seiner Nachhaltigkeitsstrategie geworden. 2014 wurden die ersten Taraxagum-Testreifen für Pkw gefertigt und erprobt, zwei Jahre später folgten Lkw-Reifen. Im Jahr 2018 eröffnete Continental dann in Anklam in Mecklenburg-Vorpommern das „Taraxagum Lab“ als Forschungs- und Entwicklungslabor. Hier wurde auch das erste im Handel erhältliche Produkt entwickelt, das seit 2019 vermarktet wird: ein Fahrradreifen.

Im Jahr 2020 wurde der Reifen mit dem Deutschen Nachhaltigkeitspreis ausgezeichnet. Das Team hinter dem Löwenzahn-Kautschuk-Projekt gehörte zu den Nominierten für den Deutschen Zukunftspreis 2021, der vom Bundespräsidenten vergeben wird.



Der Russische Löwenzahn kann auf heimischen Äckern angebaut werden und liefert den Kautschuk für die Herstellung von Auto- und Radreifen.



Bau

Ob als Baumaterial und Werkstoff, zur Dämmung oder beim Innenausbau: **Nachwachsende Rohstoffe können mit guten Materialeigenschaften punkten, verbessern die Ökobilanz und sind oftmals gesundheitsverträglicher. Aber auch für konventionelle Produkte der Bau-branchen – wie Beton – gibt es inzwischen biobasierte, nachhaltige Strategien.**



Der Bausektor ist einer der rohstoffintensivsten Wirtschaftsbereiche in Deutschland. 90 % aller verwendeten mineralischen Rohstoffe werden zur Herstellung von Baustoffen und -produkten eingesetzt. Der Gebäudesektor ist in Deutschland für etwa 40 % der gesamten Treibhausgas-Emissionen verantwortlich. Drei Viertel davon machten allein Nutzung und Betrieb aus, den Rest trugen Baustoffindustrie und Bauwirtschaft bei. Das verrät der Umweltfußabdruck von Gebäuden, den das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung ermittelt hat. Mit Blick auf Klimaneutralität und Nachhaltigkeit rücken biobasierte Materialien verstärkt in den Fokus.

Damit sind die Branchen Bauhauptgewerbe und Ausbaugewerbe mit ihren rund 325.000 Betrieben und 2 Mio. Beschäftigten im Jahr 2019 hierzulande auch

für die Bioökonomie von großer Bedeutung. Mit 277 Mrd. Euro erbringt die Branche nominal etwa 6 % der gesamten Wertschöpfung in Deutschland. Allein auf den Holzbau entfielen 2020 laut Zentralverband des Deutschen Baugewerbes 71.561 tätige Personen in 11.864 Betrieben. Ihr Gesamtumsatz betrug 8,3 Mrd. Euro.

Holz – ein boomender Baustoff

Holz ist der wichtigste nachwachsende Bau- und Werkstoff. Entweder wird klassisch Schnittholz aus den Sägewerken eingesetzt oder aber Holzwerkstoffe. So werden exemplarisch bei der Herstellung von Spanplatten Holzspäne miteinander verleimt und in Form von Platten gepresst. Holz besitzt sehr gute bau-

physikalische Eigenschaften: Es ist nicht nur flexibel, leicht und gut zu bearbeiten, sondern auch tragfähig, druckstabil und in verarbeiteter Form äußerst biegefest. Hinzu kommt der Klimaschutzaspekt: Während des Wachstums nehmen Bäume Kohlendioxid auf und speichern den Kohlenstoff in ihrer Holzbiomasse – Holz wirkt als natürlicher CO₂-Speicher. Für die Herstellung und Entsorgung von Baustoffen aus Holz ist in der Regel weniger fossile Energie notwendig als für Materialien auf Basis endlicher, mineralischer Rohstoffe.

Durch seine angenehme Oberflächentemperatur und die Fähigkeit, die Luftfeuchtigkeit in Gebäuden zu regulieren, trägt es zu einem guten Wohnklima bei. Aus Holz können Konstruktionen hergestellt werden, die sich nicht nur für den Neubau, sondern insbesondere auch für die Nachverdichtung oder die Aufstockung bestehender Gebäude eignen. Holzkonstruktionen können effizient in Werken vorgefertigt werden, was zu hoher Genauigkeit und Bauzeitverkürzung führt.

Digitalisierte Planung und Fertigung

Die Holzbauquote lag im Jahr 2020 laut dem Verband Holzbau Deutschland erstmals über 20 %. Die Anzahl der Beschäftigten im Bereich des Bauens mit Holz stieg innerhalb von zehn Jahren um 28 %. Mit dem Ziel der Förderung des Holzbaus beschäftigt sich im Rahmen der vom BMEL initiierten „Charta für Holz 2.0“ insbesondere die Arbeitsgruppe „Bauen mit Holz in Stadt und Land“ mit Vertretern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung.

Immer öfter wird Holz von Architekten als tragende Konstruktion verbaut. Mit dem vom BMEL ausgelobten Bundeswettbewerb HolzbauPlus werden besondere Glanzstücke dieser Bauweise ausgezeichnet (vgl. Kasten S. 33). Ein eindrucksvolles Beispiel für einen modernen Hightech-Holzbau ist der von der Universität Stuttgart für die Bundesgartenschau 2019 entworfene BUGA-Pavillon: Die tragende Struktur des Pavillons, vom Plattenskelett der Seeigel inspiriert, besteht ausschließlich aus Faserverbundwerkstoffen. Der Leichtbau wurde computerbasiert entworfen und in einem robotergestützten Prozess gefertigt. 2020 wurde das Konzept im Bundeswettbewerb HolzbauPlus ausgezeichnet. In einem vom BMEL geförderten Digitalisierungsprojekt unter der Leitung der TU

München wird eine 3D-basierte Planungsmethode aus dem Hochbau für den industrialisierten Holzbau weiterentwickelt und nutzbar gemacht – das sogenannte Building Information Modeling (BIM). Das System unterstützt digitale Arbeitsabläufe aller Akteure, die im Planungs- und Bauprozess eingebunden sind.

Das Potenzial von Laubholz erschließen

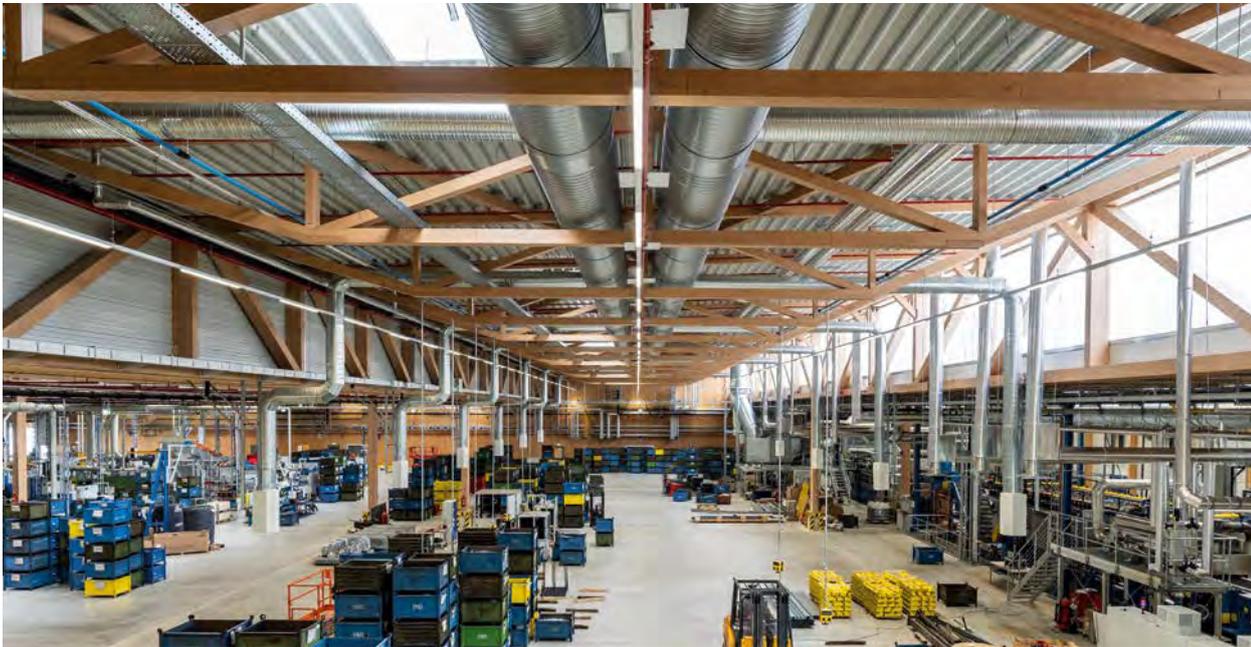
Tragende Bauteile werden im Holzbau vorwiegend aus Nadelhölzern wie Fichte hergestellt. Doch die Blicke der Forschung und Entwicklung im Bauwesen richten sich zunehmend auf Laubholz. Einer der Gründe: In den heimischen Wäldern, die in Anpassung an den Klimawandel zu Mischwäldern umgebaut werden, ist Buchenholz reichlich vorhanden und der Vorrat wird voraussichtlich weiter anwachsen. Aktuell wird Laubholz überwiegend energetisch genutzt. Durch die Möglichkeiten moderner Klebtechnologien lässt sich

Bundeswettbewerb HolzbauPlus



Die Bundesregierung will den Einsatz von Holz im Bereich Bauen nachhaltig steigern. Seit 2012 richtet das BMEL den Bundeswettbewerb „HolzbauPlus – Bauen mit nachwachsenden Rohstoffe“ aus. 2022/23 soll der Wettbewerb in die sechste Runde gehen. Bewerben können sich private, gewerbliche oder öffentliche Bauherren mit ihren Neubau- und Sanierungsprojekten. Maßgebliche Gebäudeteile sollten aus Holz bestehen und mit nachhaltigen Energie- und Wärmekonzepten kombiniert werden. Ein Schwerpunkt des Wettbewerbs liegt dieses Mal auf Konzepten und Umsetzungen zur Sanierung und Umnutzung mit Holz.

holzbauplus-wettbewerb.info



Das Dachtragwerk im Schraubenwerk von SWG in Gaisbach wurde aus dem Holzwerkstoff Baubuche konstruiert.

das Potenzial von Laubholz jedoch weiter erschließen: Die auf Buchenholz spezialisierte Sägefirma Pollmeier hat zum Beispiel den Holzwerkstoff Baubuche entwickelt. Für diesen neuartigen Werkstoff wird Holz vom Buchenstamm geschält und dann lagenweise zu sogenanntem Furnierschichtholz übereinandergeleimt.

So entsteht ein Hightech-Material, das sich für den konstruktiven Holzbau einsetzen lässt. Das besonders dichte Furnierschichtholz besitzt ein Tragverhalten, das annähernd dem von Stahl gleicht. Das lässt sich im Schraubenwerk des Herstellers SWG in Waldenburg besichtigen: Dort wurde das weltgrößte Dachtragwerk aus Baubuche errichtet. Es überspannt eine Fläche von 97 Meter auf 114 Meter. Das Thünen-Institut für Holzforschung analysiert die bauphysikalischen Eigenschaften von Baubuche.

Zum Thema Laubholz gibt es inzwischen mehrere innovative Initiativen von Bund und Ländern, die das Holz von Buche, Eiche und Co für den Bau, aber auch für andere Branchen erschließen wollen. Dazu zählt das Technikum Laubholz in Baden-Württemberg. Zudem fördert das BMEL Forschungsprojekte zur Steigerung der stofflichen Verwendung von Laubholz, unter anderem auch im Rahmen der Charta für Holz 2.0.

Beton nachhaltiger anrühren

Bauen mit Holz ist nicht die einzige Möglichkeit, die CO₂-Emissionen in der Baustoffindustrie zu senken. Stahl- und Zementindustrie stoßen enorme Mengen an CO₂ aus. Schon jetzt ist es möglich, Stahl in Beton durch ein Gewebe aus Flachsfasern zu ersetzen, wie das Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI) in Braunschweig demonstriert hat. Im Vergleich zu einer Brücke aus Stahlbeton könnte die Dicke des Materials im Flachs-beton mindestens halbiert werden. Zu Beton selbst gibt es eine Reihe von Forschungsvorhaben, die durch biobasierte Rohstoffe, bessere Recyclingquoten und weitere Ansätze die Klimabilanz aufbessern wollen. Forschende in Berlin haben beispielsweise einen Biobeton auf Basis von Maniokschalen entwickelt (vgl. *Kasten S. 35*).

Ein Team der Hochschule München mischt seiner Betonrezeptur Bakterien bei. Entstehen Risse und dringt Feuchtigkeit ein, bilden die Mikroorganismen Kalkstein und reparieren so den Riss. Das verlängert die Lebensdauer der Bauwerke. Nicht zuletzt lassen sich Holz und Beton auch zu sogenannten Hybrid-Materialien verbinden. Ein vom BMEL gefördertes Forschungsprojekt verwendet eine innovative Nass-in-Nass-Verklebungstechnologie, bei der frischer Beton auf eine noch feuchte Klebstoffschicht auf

einem Holzträger aufgegossen wird. Auf diese Weise verklebte Holz-Beton-Verbund (HBV)-Decken sind tragfähiger als herkömmliche HBV-Decken und sparen gegenüber üblicher Bauweisen zwei Drittel des Betons und vier Fünftel des Bewehrungsstahls. Die CO₂-Emission sinkt so auf ein Drittel.

Pilze als Baumeister

An der TU Berlin setzen Forschende auf Pilze, die nachwachsende Rohstoffe in innovative Baumaterialien verwandeln können. Ständerpilze sind für die Herstellung von Verbundwerkstoffen am besten geeignet. Dabei kann es sich um essbare Pilze handeln wie Austernpilze oder um Baumpilze wie den Zunderschwamm. Die Pilzmyzelien wandeln pflanzliche Reststoffe in einen stabilen und gleichzeitig sehr leichten Verbundwerkstoff um. Großes Plus: Die Bauteile können leicht kompostiert werden. Fachleute für nachhaltiges Bauen vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) beschäftigen sich mit „kultivierten“ Baustoffen aus Pilzmyzelien und wie sie sich mit digitalen Fabrikationstechniken kombinieren lassen.

Biobasierter Innenausbau

In einer Ära des energieeffizienten Bauens und Sanierens gewinnen Naturdämmstoffe zunehmend an Bedeutung – ihre Herstellung benötigt weniger Energie und sie haben einen positiven Einfluss auf das Wohnklima. Sie können zudem große Mengen an Feuchtigkeit aufnehmen und sind vielfach allergikerfreundlich. 2019 lag der Marktanteil von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen bei ca. 9 %. Den größten Anteil in diesem Segment haben mit 58 % die Holzfaserdämmstoffe. Auch Cellulose aus zersäuertem Altpapier dient als Ausgangsmaterial und macht 32 % der biobasierten Dämmstoffe aus. Hinzu kommen Hanf, Flachs, Wiesengras und Stroh sowie Schafwolle. Agrarreststoffe können eine weitere Grundlage sein, wie ein vom BMBF gefördertes Projekt erforscht hat. Darin wurden Schütt- und Einblasdämmstoffe entwickelt, die aus Maisspindeln erzeugt werden, den inneren harten Teil des Maiskolbens, der bei der Gewinnung von Körnermais übrigbleibt. Der Marktanteil von Naturfarben lag im Jahr 2018 bei 5 %. Anders als konventionelle chemische Produkte werden Naturfarben aus natürlichen mineralischen oder pflanzlichen Quellen

hergestellt und kommen mit weit weniger Lösungsmitteln aus. Zu den wichtigsten Naturfarben-Produkten zählen Wandfarben, Holzlasuren, Naturharzlacke, Öle und Wachse. Bodenbeläge aus nachwachsenden Rohstoffen liefern die Basis für Holzfußböden wie Parkett, Dielen oder Laminat, aber auch für Kork- und Sisalböden. Linoleum besteht hauptsächlich aus Leinöl, Kork- und Holzmehl, Kalkmehl und Pigmenten sowie Jutegewebe als Trägerschicht.

Auf dem Weg in eine Kreislaufwirtschaft ist auch für die Bauwirtschaft das Thema Recycling von großer Bedeutung. Eine vom BMBF geförderte deutsch-chinesische Forschungskooperation namens ReMatBuilt zielt darauf ab, die Ressourceneffizienz im Bauwesen zu verbessern, indem Land- und Forstwirtschaftsabfälle sowie Bau- und Abbruchabfälle verwertet werden. Gemeinsam werden umweltfreundliche Hybrid- und Bauprodukte entwickelt, beispielsweise Dämmplatten aus Reis- und Weizenstroh.

Grüner Beton aus Maniokschalen für Afrika



Bei der Produktion von Zement, der wichtigsten Zutat von Beton, wird viel CO₂ freigesetzt. Ein Team der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin erschließt mit afrikanischen Partnern eine biobasierte Alternative zum Zementklinker: Schalen der Wurzel der Cassava-Pflanze (Maniok), die in Afrika in riesigen Mengen als Abfall anfallen. Verbrennt man die Schalen, so lässt sich die Asche sehr gut als Zementalternative nutzen. Die BAM kooperiert inzwischen mit vielen afrikanischen Ländern zum Thema Biobeton (Vasen 1 und 3 auf dem Foto), darunter Nigeria und Südafrika. 2018 wurde das Team mit dem deutsch-afrikanischen Innovationspreis des BMBF ausgezeichnet.



Chemie

Noch basiert die chemische Industrie vorwiegend auf dem fossilen Rohstoff Erdöl. Doch auch Biomasse ist ein komplexer und vielseitiger Rohstoff, der zunehmend erschlossen wird. Immer mehr Unternehmen setzen auf grüne Chemikalienproduktion auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen und biotechnischen Prozessen.



Die Chemieindustrie gehört mit ihren rund 2.000 Unternehmen zu den wichtigsten Standbeinen der deutschen Wirtschaft. Mehr als 464.400 Menschen waren hier Anfang 2021 beschäftigt, international tätige Großkonzerne wie BASF oder Evonik haben ihren Hauptsitz in Deutschland. Diese erwirtschaften auch die Mehrheit des jährlichen Umsatzes der Chemiebranche, der im Jahr 2020 bei 190,6 Mrd. Euro lag. Die Produktpalette der chemischen Industrie ist riesig: mehr als 30.000 unterschiedliche Produkte werden vertrieben. Die größten Kunden sind Kunststoffverarbeiter, Auto-, Verpackungs- und Bauindustrie. Derzeit sind Erdöl und Erdgas die mit Abstand wichtigsten Rohstoffe der chemischen Industrie. 2019 hat die deutsche Chemieindustrie rund 17 Mio. Tonnen fossiler Rohstoffe eingesetzt. Aus diesen werden chemische Grundbausteine gewonnen, aus denen

komplexere Verbindungen wie Kunststoffe, Klebstoffe, Lacke und Farben hergestellt werden. Biomasse ist ein vielseitiges Stoffgemisch aus Kohlenhydraten, Fetten, Ölen und Proteinen. Damit eignet sich auch Biomasse als Rohstoff für die Herstellung von Chemikalien. 2019 wurden 2,6 Mio. Tonnen nachwachsende Rohstoffe in der chemischen Industrie verwendet (vgl. Grafik S.38). Die meisten nachwachsenden Rohstoffe, die heute in der chemischen Industrie eingesetzt werden, sind pflanzliche Öle, die aus Palmfrüchten, Raps und Soja gewonnen werden, sowie tierische Fette. Die Öle und Fette werden über chemische Syntheseschritte zu biobasierten Tensiden weiterverarbeitet, die in der Reinigungs- und Waschmittelindustrie, aber auch bei Kosmetikprodukten Einsatz finden (vgl. Kap. Konsumgüter).

Nachwachsende Rohstoffe werden auch in biotechnischen Verfahren eingesetzt. Mikroorganismen, die für die industrielle Produktion optimiert wurden, dient vor allem Zucker aus Rüben, Zuckerrohr, Holz, Stroh und pflanzlichen Reststoffen als Futter für ihr Zellwachstum und ihren Stoffwechsel. Bei diesem als Fermentation bezeichneten Prozess stellen die Mikroorganismen Grundbausteine für weitergehende chemische Synthesen und auch hochwertige Endprodukte her. So entstehen aus Biomasse organische Säuren, Aminosäuren, Alkohole, Peptide, therapeutische Proteine und Enzyme sowie andere Biopolymere.

Die biotechnologische Produktion stellt gegenüber der chemischen Synthese oftmals die nachhaltigere Strategie dar. Denn mikrobielle Prozesse laufen im Vergleich zu erdölbasierten zumeist in wässrigen Lösungen, bei Zimmertemperatur und unter Normaldruck ab. Zudem lassen sich Substanzen gewinnen, die mit klassischen Methoden nur schwer zu produzieren sind, zum Beispiel komplexe und große Eiweißmoleküle wie Enzyme, Hormone und Antikörper. Das ist das Kerngeschäft der industriellen Biotechnologie. Im Jahr 2020 ordneten sich laut dem Branchenverband Bio Deutschland etwa 10 % der 710 hiesigen Biotechnologie-Unternehmen diesem Anwendungsfeld zu.

Biokunststoffe im Fokus der Hersteller

Kunststoffe sind nach den Fein- und Spezialchemikalien das zweitwichtigste Produktsegment der Chemieindustrie. Kunststoffe sind Polymere: chemische Grundbausteine, die Monomere, werden bei ihrer Synthese zu Makromolekülen verknüpft. Zunehmend setzen die Hersteller auch auf biobasierte Alternativen. Derzeit wird etwa 1 % der global produzierten Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt. Nach Zahlen, die European Bioplastics e.V. und nova-Institut ermittelt haben, waren es im Jahr 2020 rund 2,1 Mio. Tonnen.

Wenn von Bioplastik die Rede ist, können zwei unterschiedliche Arten von Biokunststoffen gemeint sein: Einerseits gibt es biologisch abbaubare Kunststoffe – diese müssen allerdings nicht zwingend aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden; es gibt auch erdölbasierte Kunststoffe, die biologisch abbaubar sind. Biobasierte Kunststoffe wiederum bestehen aus Synthesebausteinen, die aus Biomasse stammen.

Allerdings gilt: Nicht alle biobasierten Kunststoffe sind auch biologisch abbaubar.

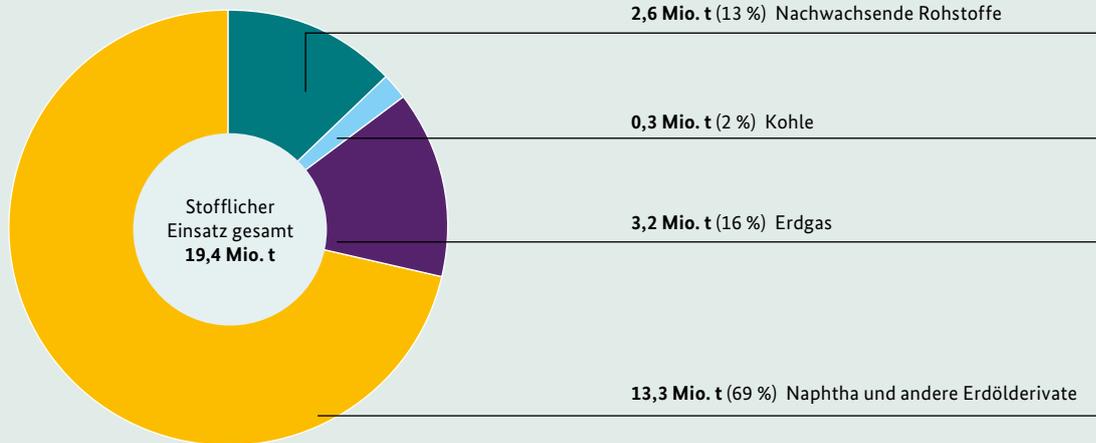
Biobasierte Kunststoffe werden überwiegend in Verpackungen und Flaschen eingesetzt, aber auch in technischen Anwendungen wie dem Autobau oder in den Bereichen Catering und Landwirtschaft finden sie Verwendung. Vor allem Stärke und Cellulose sind heutzutage wichtige Ausgangsstoffe für die Produktion von Biokunststoffen. Dienten zunächst stärkehaltige Früchte wie Mais oder Kartoffeln als Rohstoffquelle, so konzentriert sich die Forschung inzwischen darauf, nachwachsende Ressourcen zu erschließen, die nicht in Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion stehen. Dadurch rücken Substanzen wie Chitin, Chitosan aus Krustentieren und Insekten und Lignin aus holziger Biomasse in den Fokus, die als Abfallprodukte in anderen Wirtschaftsfeldern entstehen und bislang kaum genutzt werden können. Hierzu zählen Reststoffe aus der Landwirtschaft und Abfallströme

Lohnt die Umstellung auf biobasierte Prozesse?



Wie sinnvoll ist es für ein Unternehmen, auf eine biobasierte Chemieproduktion umzustellen? In dem Forschungsprojekt EvaChem wurde ein Multikriteriensystem entwickelt, um den optimalen Prozess für die biobasierte Chemikalienproduktion zu finden und zu beurteilen, wann eine Abkehr von fossilen Rohstoffen auch wirtschaftlich ist. Das System soll innovationsgetriebenen Unternehmen Fragen beantworten wie die nach der vorteilhaftesten Kombination aus Rohstoff, Syntheseweg und Zielmolekül. Die neue Lösung soll nicht nur wissenschaftlich verlässlich, sondern auch für kleine und mittlere Unternehmen einfach anzuwenden sein. Entwickelt haben das System das nova-Institut, die Dechema und die Leuphana Lüneburg. Unterstützt wurden sie dabei vom BMEL.

Rohstoffbasis der organischen Chemieindustrie (2019)



Quelle: VCI

aus der Lebensmittelwirtschaft wie Casein aus nicht verkehrsfähiger Milch, tierische Fette aus Schlachtabfällen oder Proteine aus der Rapsverarbeitung.

Drop-in-Lösungen dominieren

Bei den biobasierten Kunststoffen auf dem Weltmarkt überwiegen derzeit sogenannte Drop-in-Lösungen. Das bedeutet, es werden biobasierte Basischemikalien, die nahezu baugleich zur erdölbasierten Version sind, in die chemische Synthese integriert. Die entstehenden Kunststoffe, etwa Bio-Polyethylenterephthalat (PET) oder Bio-Polyethylen (PE), sind jedoch nicht biologisch abbaubar. Der Spezialchemiekonzern Evonik vermarktet die Polyamide PA610, PA1010 und PA1012, die ganz oder teilweise aus Rizinusöl hergestellt werden und deren Einsatzgebiet von der Automobil- bis zur Textilbranche reicht. Den für viele Kunststoffe wichtigen Ausgangsstoff Anilin aus pflanzlichen Rohstoffen herzustellen, ist dem Polymerhersteller Covestro gelungen. In einem vom BMEL geförderten Projekt wurden die Grundlagen dafür gelegt, dieses Verfahren im industriellen Maßstab anwenden zu können. Durch Mikroorganismen wird Zucker aus Mais, Stroh oder Holz in einem biotechnologischen Prozess zunächst zu einem Zwischenprodukt und dann mittels chemischer Katalyse schließlich zu Anilin umgewandelt. Daraus stellt Covestro dann Polyurethane her, aus denen Schaumstoffe für Matratzen, Dämmmaterialien und Autoinnenverkleidungen ge-

fertigt werden. Hersteller adressieren auch das Thema Zusatzstoffe von Kunststoffen. In einem vom BMBF geförderten Projekt entwickelt BASF gemeinsam mit akademischen Forschungspartnern aus Hamburg und Bielefeld biobasierte Weichmacher für die nachhaltige Produktion von PVC. Zudem sollen spezielle Enzyme den Energieeinsatz verringern und die Bildung von schädlichen und umweltbelastenden Nebenprodukten vermeiden.

Biobasierte Plattformchemikalien

Neben den Drop-in-Lösungen sind neuartige, biobasierte Kunststoffe im Aufwind. Ein Beispiel dafür ist Polymilchsäure (Polylactid – PLA). Dieser Biokunststoff entsteht durch Verknüpfung von Molekülen der mikrobiell hergestellten Plattformchemikalie Milchsäure. PLA ist sowohl biobasiert als auch biologisch abbaubar und wird insbesondere in Folien und Verpackungen eingesetzt. Das BMBF hat eine deutsch-chinesische Forschungskooperation gefördert, die Reiskleie als Ausgangsstoff für PLA etabliert hat. Der Einsatz dieses Reststoffs – auch Reststoffe aus Stärke- oder Zuckerfabriken sind denkbar – soll entscheidend dazu beitragen, dass der Kunststoff wirtschaftlich wettbewerbsfähig ist. Der Konzern ThyssenKrupp baut über den Geschäftsbereich ThyssenKrupp Uhde bereits die zweite Großanlage in China zur PLA-Herstellung. Die neue Anlage soll 30.000 Tonnen pro Jahr produzieren.

Biotechnologisches Plastik-Recycling

Biobasierte Kunststoffe punkten zwar mit ihrer nachwachsenden Rohstoffbasis. Eine große Herausforderung bleibt jedoch das Thema Kreislauffähigkeit und Entsorgung. Ein stoffliches Recycling von biobasierten Kunststoffen ist zwar technisch möglich, findet aber auf Grund der sehr geringen Mengen im Markt aus wirtschaftlichen Gründen zurzeit nicht statt. Aktuell werden biobasierte Kunststoffe verbrannt. Da der Kohlenstoff, aus dem sie bestehen, aus Biomasse und nicht aus fossilen Rohstoffen stammt, entsteht bei diesem Prozess kein zusätzliches CO₂, dafür aber erneuerbare Wärme und Strom. Biologisch abbaubare Kunststoffe sind durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen in Deutschland von der industriellen Kompostierung ausgeschlossen. Als „heimkompostierbar“ gekennzeichnete Produkte kann man allerdings über den Gartenkompost entsorgen.

Anpassungen im Abfallmanagement sind nötig, um ein Wiederverwertungssystem zu etablieren. Fachleute betonen die Wichtigkeit der Mehrfachnutzung:

Biobasierte Kunststoffe sollten möglichst oft genutzt und werkstofflich wiederverwertet werden, bevor sie schließlich verbrannt werden. Angesichts von Plastikmüllbergen oder Mikroplastik in Böden und Grundwasser bleibt die große Herausforderung der Industrie, Plastik in Kreisläufen zu führen. Neben dem mechanischen und dem chemischen Recycling gibt es inzwischen vielversprechende Ansätze für ein biotechnologisches Recycling mithilfe kunststoffabbauender Enzyme.

Im Jahr 2016 wurde in Japan erstmals ein Bakterium entdeckt, das auf PET wächst und sich davon auch ernährt. Es stellte sich heraus, dass der PET-Abbau unter anderem mit dem mikrobiellen Enzym PETase erfolgt: Das Enzym zerlegt den Kunststoff zunächst in kleinere Bausteine, während andere Enzyme die Aufspaltung des Kunststoffes in seine Grundbausteine übernehmen können. Diese bahnbrechende Entdeckung gab den Startschuss für zahlreiche internationale und nationale Forschungsaktivitäten. Dazu zählt das von der EU geförderte Forschungskonsortium MIX-UP, bei dem mehrere deutsche Partner mitwir-



Am Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse CBP in Leuna wird Holz in seine chemischen Einzelteile zerlegt.

ken und das von der RWTH Aachen koordiniert wird. Es entwickelt Prozesse, um mithilfe molekularbiologisch optimierter Enzyme den Kunststoff PET effizient in seine einzelnen Bausteine zu zerlegen. Diese sollen dann direkt von Mikroorganismen genutzt werden, um höherwertige chemische Verbindungen zu erzeugen – ein wertschöpfendes Upcycling.

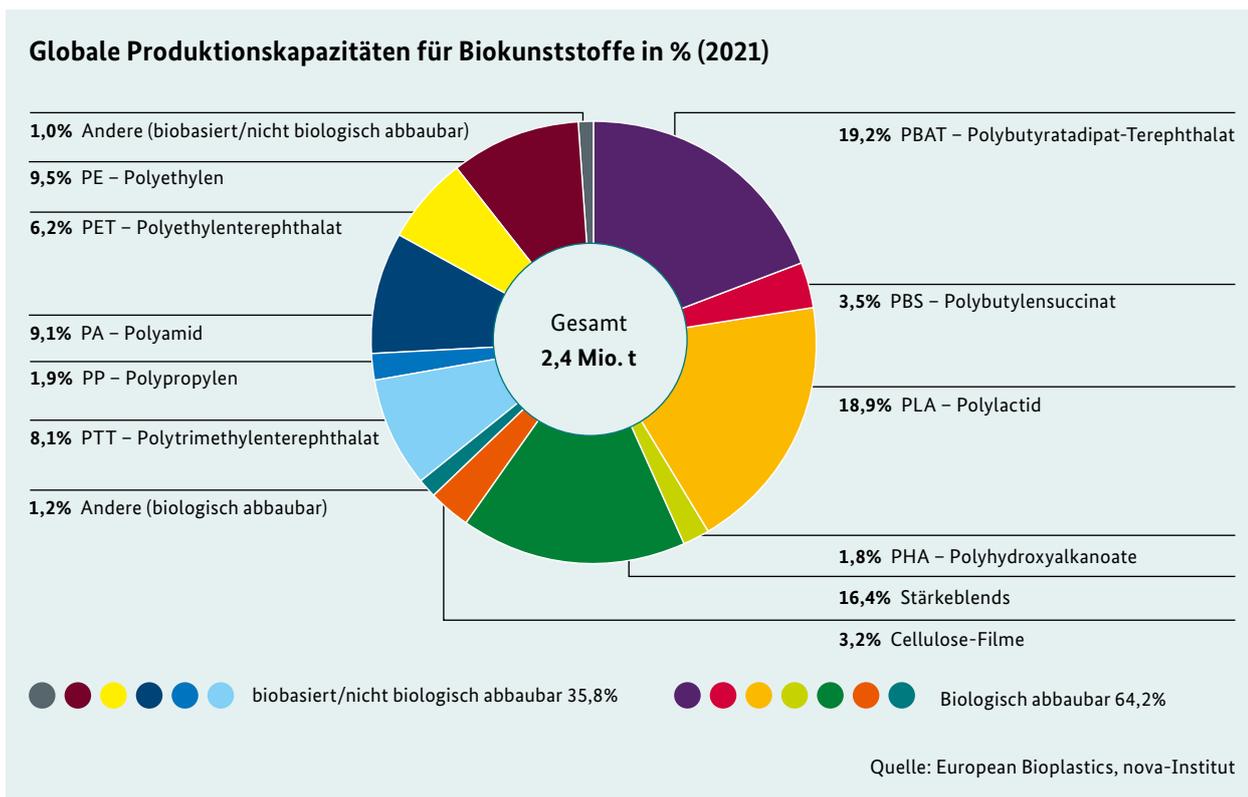
Chemikalien aus der Bioraffinerie

Bioraffinerien sind die industriellen Fabriken der Bioökonomie. Vergleichbar mit einer Erdölraffinerie wird hier der Rohstoff Biomasse in seine chemischen Einzelteile zerlegt und verwertet (vgl. Kap. Kreislaufbasierte Bioproduktion). In der Regel sind die stoffliche und die energetische Verwertung miteinander gekoppelt. So entsteht eine breite Palette an neuen Werkstoffen oder biobasierten Chemikalien. An mehreren Standorten bundesweit werden unterschiedliche Bioraffinerie-Konzepte erforscht und kommerzialisiert.

Ein Beispiel für einen Bioraffinerie-Hotspot ist der mitteldeutsche Cluster BioEconomy. Am Chemie-

standort Leuna wird an dem mit Bundes- und Landesmitteln errichteten Fraunhofer-Zentrum für Chemisch-Biotechnologische Prozesse (CBP) insbesondere die Verwertung von Holz als Rohstoff erprobt. Im Umfeld des CBP siedeln sich zunehmend Unternehmen an: So erforscht das französische Unternehmen Global Bioenergies neue Methoden zur biotechnologischen Herstellung von sogenannten leichten Olefinen wie Isobuten, Propylen und Butadien. Das BMBF förderte die Errichtung einer Pilotanlage mit rund 5,7 Mio. Euro. Sie wird bis zu 100 Tonnen Isobuten produzieren, das zum Beispiel für die Herstellung von Kunststoffen, Elastomeren und Treibstoffen verwendet werden kann.

Der finnische Forst- und Papierkonzern UPM baut in Leuna für 550 Mio. Euro die weltweit erste großindustrielle Bioraffinerie zur chemischen Verarbeitung von Buchenholz. Abfälle aus Sägewerken und Forstarbeiten zerlegt die Raffinerie in ihre Bestandteile Zucker und Lignin. Aus den Zuckern gewinnt UPM beispielsweise Ethylenglycol, aus dem unter anderem Polyester und PET hergestellt werden. Aus dem Lignin werden erneuerbare Füllstoffe hergestellt, die etwa für die Reifenproduktion interessant sind.





In einer kommerziellen Lignocellulose-Bioraffinerie in Rumänien stellt der Spezialchemiekonzern Clariant Ethanol aus Stroh her.

Schmier- und Klebstoffe

Die Erzeugung von Schmierstoffen durch die Chemieindustrie liegt in Deutschland seit mehreren Jahren konstant bei rund 2,5 Mio. Tonnen, der Inlandsabsatz lag 2020 bei gut 0,8 Mio. Tonnen. Der Marktanteil von Bioschmierstoffen liegt knapp über 4 %. Die aktuell größten Anwendungen finden Bioschmierstoffe als Hydrauliköle, Turbinen- bzw. Motoröle und Basisöle. Es dominierten Palm- und Palmkernöl, gefolgt von Rapsöl. Aber auch Sonnenblumenöl dient zunehmend als Rohstoffquelle. Um Anwendungsgebiete von Bioschmierstoffen auszubauen, arbeiten acht vom BMEL geförderte Forschungsverbände an der Verbesserung von Bioschmierstoffen für industrielle Anwendungen, wie Bio-Kühlschmierstoffe mit Korrosionsschutz, Bio-Hydrauliköle auf Basis von Chitosan und biobasierte Verdicker für Schmierfette. Auch im Bereich Klebstoffe etablieren sich biobasierte Alternativen. Sie sind zum einen gesundheitsverträglicher als Produkte auf Erdölbasis, was sie für medizinische Anwendungen interessant macht. Zum anderen sind sie meist biologisch abbaubar. Nicht zuletzt bringen sie oftmals neue Funktionalitäten mit sich. Dem Industrieverband Klebstoffe zufolge lag der Marktanteil von Klebstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen 2017 bereits bei 15 %, in einzelnen Klebstoffklassen durchaus auch höher. Das Rostocker Leibniz-Institut für Katalyse e. V. und die Henkel AG planen, in einem

BMEL-finanzierten Verbundvorhaben bis 2023 eine neue Klebstoff-Generation zu entwickeln. Die Industrie- und Konsumentenklebstoffe sollen für die Montage im Elektronik- und Automobilbereich eingesetzt werden.

Strombasierte Chemikalien-Produktion

Elektrochemische Prozesse lassen sich mit chemischen oder biotechnologischen Syntheseprozessen kombinieren. Mithilfe dieser Elektrosynthesen lassen sich aus grünem Strom und nachwachsenden Rohstoffen interessante chemische Verbindungen produzieren. Das BMEL und das BMBF fördern die Entwicklung solcher Prozesse der grünen Chemieproduktion im Rahmen der Nationalen Bioökonomiestrategie. Das BMEL hat den Förderaufruf „Neue Wege der Strom-basierten Konversion von biogenen Rohstoffen und der elektrochemischen Herstellung von biobasierten Produkten (Elektrosynthese)“ auf den Weg gebracht. Auch die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert das Feld der Elektro-Biotechnologie. Hier werden mikrobielle und elektrochemische Stoffumwandlungen miteinander kombiniert. Anwendungsfelder erstrecken sich von der Abwasserreinigung über die Bodensanierung bis hin zur Synthese von Chemikalien und Energieträgern.



Energie

Aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugte Bioenergie bleibt ein wichtiger Baustein im Energiemix der Zukunft. Mit Biogas-Anlagen werden landwirtschaftliche Betriebe zum Erzeuger von Strom und Wärme. Biokraftstoffe werden auch in einer elektromobilen Zukunft für den Schiffs- und Flugverkehr wichtig bleiben.



Mit der Energiewende will die Bundesregierung den Anteil der erneuerbaren Energiequellen deutlich steigern. Damit die Energieversorgung trotzdem zuverlässig, sicher und bezahlbar bleibt, hat die Bundesregierung den Energie- und Klimafonds (EKF) eingerichtet, um Projekte zu erneuerbaren Energien, zum nationalen und internationalen Klima- und Umweltschutz sowie zu Elektromobilität und Energieeffizienzinvestitionen (einschließlich Gebäudesanierung) zu fördern.

Bioenergie zählt als regenerative Energie zu den wichtigen Bausteinen im Energiemix der Zukunft. Biomasse – also Pflanzen sowie pflanzliche und tierische Reststoffe und Abfälle – gilt hierbei als Alleskönner. Denn sie lässt sich zur Erzeugung von Wärme, Strom und Kraftstoffen einsetzen. Neben der großen Vielfalt gilt als weiteres Plus: Biomasse

ist speicherbar und Bioenergieanlagen sind flexibel regelbar. So bergen sie das Potenzial, bei der Stromerzeugung die schwankende Verfügbarkeit anderer regenerativer Energiequellen wie Windkraft und Solarenergie auszugleichen. Im Jahr 2021 stammte laut Umweltbundesamt der größte Teil (55 %) der in Deutschland eingesetzten erneuerbaren Energien aus Biomasse. Die bislang zur Verwertung von Biomasse eingesetzten Technologien erfüllen jedoch noch nicht alle Kriterien der Nachhaltigkeit und stehen deshalb in der Kritik. So kommen bei der Herstellung von Biokraftstoffen der ersten Generation wie Biodiesel oder Bioethanol ausschließlich die öl- und zuckerhaltigen Früchte von Kulturpflanzen zum Einsatz, die auch in der Nahrungsmittelindustrie genutzt werden. Damit ist eine Konkurrenz zwischen „Tank und Teller/Trog“ entstanden. In Europa und Deutschland wurden die

Nutzungspfade von Bioenergie in den vergangenen Jahren neu bewertet und die Rahmenbedingungen angepasst. Unter anderem in der Nationalen Bioökonomiestrategie betont die Bundesregierung, dass die Sicherung der globalen Ernährung stets Vorrang vor einer stofflichen und energetischen Nutzung hat. Die energetische Nutzung von Biomasse sollte sich künftig überwiegend auf organische Rest- und Abfallstoffe konzentrieren. Biokraftstoffe der zweiten Generation etwa werden aus nicht-essbaren Pflanzenteilen, also Reststoffen und verholzten Pflanzenteilen wie Stroh oder Holzhackschnitzel, hergestellt.

Wärmelieferant Holz

Der Rohstoff Holz hat eine große Bedeutung als Brennstoff. Im Jahr 2020 wurden in Deutschland rund 60 Mio. Kubikmeter Holz energetisch verwertet (ca. 50 % des gesamten Holzrohstoffaufkommens). Private Haushalte haben hierbei einen Anteil von 45,7 %. Etwas über die Hälfte des energetisch genutzten Holzes wird in Biomasseanlagen verfeuert. 27 % des energetisch genutzten Holzes entfällt auf Waldderholz (dies ist überwiegend Laubholz und wird in privaten Haushalten verfeuert). 24,7 % entfallen auf Reststoffe aus der Holzverarbeitung und 22,5 % auf Altholz welches überwiegend in Großfeuerungsanlagen (> 1 MW) eingesetzt wird.

Der Rest entfällt auf die übrigen Holzsortimente wie zum Beispiel Landschaftspflegeholz. Auf Basis von Biomasse werden etwa 90 % der erneuerbaren Wärme erzeugt. Die moderne und vollautomatische Technologie der Pelletheizungen ermöglicht es, den Ausstoß von Luftschadstoffen wie Feinstaub und Kohlenmonoxid deutlich zu reduzieren. Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) stellt auf ihrer Webseite umfassende Informationen zum Thema Heizen mit Holz zur Verfügung (heizen.fnr.de).

Biogas: Strom und Wärme aus Gärung

In Biogas-Anlagen werden Pflanzen, tierische Exkremente wie Gülle und andere Reststoffe in Biogas verwandelt. In luftdicht abgeschlossenen Behältern, den Fermentern, vergären Mikroorganismen die Biomasse zu einem Gasgemisch, das hauptsächlich aus Methan und CO₂ besteht. Vor Ort wird das Biogas in Gasmotoren zur Strom- und Wärmeerzeugung verbrannt.

Nach dem Vergären bleibt organisches Material übrig, das als Dünger auf den Acker ausgebracht werden kann. In einigen Anlagen wird Biogas auch zu Biomethan aufbereitet. Hierzu werden der Methangehalt und die Qualität des Biogases soweit gesteigert, dass es ins Erdgasnetz eingespeist werden kann.

Im Jahr 2020 gab es in Deutschland laut Fachverband Biogas rund 9.600 Anlagen, die mehr als 3.800 Megawatt Strom erzeugten. Bei der Verfahrens- und Prozesstechnik in Biogasanlagen gibt es noch viel Potenzial für Verbesserungen. Das BMEL fördert mit dem Projekt NextGenBiogas die Entwicklung einer neuen Generation von flexibilisierten Biogasanlagen (vgl. *Maschinenbau*). Zentral für den Betrieb sind auch die eingesetzten Energiepflanzen. Überwiegend wird heute Maissilage eingesetzt. Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) von 2021 hat die Bundesre-

Wettbewerb Bioenergie-Kommunen



Bioenergie-Kommunen und Dörfer sind Pioniere der Energiewende – das beweisen regelmäßig die Gewinner des Bundeswettbewerbs Bioenergie-Kommunen. Das BMEL würdigt damit Dörfer und Städte, die ihren Energiebedarf maßgeblich durch Nutzung von nachhaltig verfügbaren nachwachsenden Rohstoffen und biogenen Reststoffen decken. Unter anderem erzeugen sie Strom und Wärme bedarfsgerecht mit flexibilisierten Biogasanlagen und kombinieren diese mit Holz, Solar- und Windenergie und Elektromobilität. In Zukunft sollen Strom- und Wärmeüberschüsse auch gespeichert und zum Heizen genutzt werden. All dies initiieren die Gemeinden vor Ort und setzen es gemeinsam mit regionalen Unternehmen um.

bioenergie-kommunen.de



In der Bioraffinerie von Clariant im bayerischen Straubing wird Weizenstroh zu Cellulose-Ethanol umgewandelt.

gierung beschlossen, den Substrat-Anteil von Mais und Getreidekorn auf 40 % abzusenken. Zunehmend geraten mehrjährige Gewächse wie das anspruchslo-

Vergärung von Wirtschaftsdünger

Tierische Exkremate wie Gülle, Jauche oder Mist fallen bei der landwirtschaftlichen Tierhaltung in erheblichen Mengen an. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft werden sie zu Dünge Zwecken auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht. Diese sogenannten Wirtschaftsdünger setzen bei der Lagerung und Ausbringung jedoch klimarelevante Emissionen, insbesondere Methan frei, das rund 25-mal klimawirksamer als CO₂ ist. Allein die Wirtschaftsdüngerlagerung und -ausbringung tragen jährlich mit rund 250.000 Tonnen zu insgesamt 1,9 Mio. Tonnen Methan-Emissionen in Deutschland bei. Die Vergärung von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen ist eine wichtige Maßnahme des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung für den Sektor Landwirtschaft, um Emissionen aus der Tierhaltung zu reduzieren. Zur Umsetzung dieser Ziele fördert das BMEL Forschungs- und Entwicklungsprojekte sowie Modell- und Demonstrationsvorhaben.

wirtschaftsduenger.fnr.de

se Gras Miscanthus oder die Durchwachsene Silphie in den Blick. Das Berliner Start-up SOLAGA setzt hingegen auf Mikroalgenfilme, um Biogas in kleinen Anlagen zu gewinnen, die in privaten Haushalten aufgestellt werden können.

Biokraftstoffe im Wandel

Mit Blick auf Klimaneutralität und dem Umstieg auf Strom und Wasserstoff als Energieträger bleiben Flüssigtreibstoffe auch in Zukunft wichtig, etwa für den Schwerlast- und den Schiffsverkehr. Biodiesel wird aus pflanzlichen Ölen oder tierischen Fetten hergestellt. In Europa wird der größte Anteil des Biodiesels aus Rapsölen gewonnen. Raps eignet sich für die Herstellung von Biodiesel, da der Fettgehalt in den Samen bis zu 45 % beträgt. Auch Biodiesel aus Reststoffen gewinnt zunehmend an Bedeutung, etwa aus altem Speiseöl und Frittierfett. In Deutschland wurden nach Angaben der FNR im Jahr 2020 etwa 3 Mio. Tonnen Biodiesel aus Pflanzenölen und gebrauchten Speiseölen verbraucht.

Biokraftstoffe der nächsten Generation

Biomasse aus agrarischen Reststoffen wie beispielsweise Getreide- und Maisstroh, Miscanthus oder

Holz steht neben Biogas auch für andere Formen der bioenergetischen Nutzung hoch im Kurs. Die effiziente und möglichst vollständige Nutzung von Pflanzenresten, Stroh oder Holz wird durch die in Zellwänden enthaltene Substanz Lignocellulose erschwert. Es gibt verschiedene Ansätze, um die Lignocellulose aufzuschließen. Im bayerischen Straubing betreibt der Chemiekonzern Clariant eine Bioraffinerie-Demonstrationsanlage, in der Stroh in seine Bestandteile zerlegt und dann biotechnisch in Cellulose-Ethanol umgewandelt wird. Das mithilfe des „sunliquid“-Verfahrens gewonnene Bioethanol kann dann Benzin für Otto-Motoren beigemischt werden. Ende 2021 wurde mit EU-Förderung der Bau einer kommerziellen Bioraffinerie-Anlage in Rumänien abgeschlossen (vgl. Kap. Kreislaufbasierte Bioproduktion; Chemie).

Eine Herausforderung bei der Bioethanol-Herstellung ist, dass der lösliche Alkohol zumeist noch vom Wasser energetisch aufwendig abgetrennt werden muss. Neue Forschungsansätze zielen daher darauf ab, die Lignocellulose in einen Biosprit umzuwandeln, der nur schwer in Wasser löslich ist. Zu den Alternativen gehört der langkettige Alkohol Butanol, der aufgrund anderer physikalischer und chemischer Eigenschaften nicht nur wasserunlöslich ist, sondern auch eine höhere Kraftstoffeffizienz als Ethanol bietet. Derzeit wird an Verfahren gearbeitet, Butanol aus ganzen Pflanzen oder Pflanzenresten zu gewinnen. Das französische Unternehmen Global Bioenergies hat ein biotechnisches Verfahren entwickelt, in dem Bakterien den gasförmigen Kohlenwasserstoff Isobuten herstellen. Global Bioenergies stellt das Isobuten an seinem Standort in Leuna her. Es lässt sich in Isooktan umwandeln. Der Autohersteller Audi testet den biobasierten Treibstoff im Rahmen einer Kooperation auf Alltagstauglichkeit.

Für die Gewinnung von Biotreibstoffen rücken zunehmend auch Mikroalgen und Cyanobakterien in den Fokus. Diese Mikroorganismen betreiben Photosynthese und können somit direkt die Energie des Sonnenlichts für die Herstellung von energiereichen Zuckermolekülen aus CO_2 nutzen. In einem weiteren Schritt können die Zucker dann durch den Mikrobenstoffwechsel zu Lipiden und Ölen umgewandelt werden, die wiederum zu Kraftstoffen verarbeitet werden. Kraftstoffe, die aus photosynthetischen Organismen und CO_2 als Kohlenstoffquelle gewonnen werden, bezeichnen Fachleute auch als Biokraftstoffe

der dritten Generation. Mit dem Algentechnikum der Technischen Universität München wurde auf dem Bolkow-Campus ein hochmodernes Algenforschungslabor errichtet. Hier werden seit 2016 größtenteils Algen mariner Herkunft auf ihre Fähigkeit untersucht, bei extremen Salzkonzentrationen fette Öle herzustellen, die sich für die Herstellung von Flugzeugtreibstoffen und anderen Industriechemikalien eignen. Der Bau des Algentechnikums wurde aus Landesmitteln und von der Airbus Group finanziert. Am Forschungszentrum Jülich wird in einem „Algen Science Center“ ebenfalls an nachhaltigem Kerosin aus Algenöl geforscht.

Synthetische Biokraftstoffe

Ein thermochemisches Konzept steht hinter den Biomass-to-Liquid (BtL)-Treibstoffen: Hier werden die komplexen Moleküle der Biomasse bei hoher Temperatur in ein Synthesegas (Kohlenmonoxid und Was-



Im Algentechnikum der Technischen Universität München auf dem Campus von Airbus werden Algen erforscht, die Biokerosin erzeugen.

Bioökonomie in der Metropolregion



Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei liefern traditionell die Rohstoffe der Bioökonomie. Alle drei Bereiche sind meist jedoch eher mit dem ländlichen Raum assoziiert. In Ballungsräumen sind dagegen Rest- und Abfallstoffe die große Ressource. Diese zu nutzen, verringert zugleich die Menge an Abfällen und Umweltbelastungen. Der Innovationsraum **BioBall – Bioökonomie im Ballungsraum** will die Potenziale der Bioökonomie in und für die Metropolregion FrankfurtRheinMain heben. Das Netzwerk zählt 31 Partner, darunter 16 Unternehmen sowie 15 Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Das BMBF fördert bis 2025 und unterstützt mit bis zu 20 Mio. Euro. Ziel von BioBall ist es, die stoffliche Nutzung von biogenen Rest- und Abfallstoffen zu fördern. Dazu werden biobasierte Neben- und Reststoffströme der privaten und kommunalen Wirtschaft erschlossen, um sie in den Branchen Ernährung, Chemie und Pharmazie als Rohstoffe zu verarbeiten. Ziel eines Projektes ist es, CO₂ aus industriellen Biogasanlagen als erneuerbare Kohlenstoffquelle für die chemische Synthese erschließen. In einem weiteren Projekt soll kommunaler Grünschnitt als Basis für grüne Chemie genutzt werden. Hier wird erforscht, wie sich Grünschnitt in Fermentationen einsetzen lässt und erkundet, ob daraus Elektrodenmaterial für die Elektrobiotechnologie erzeugt werden kann. Mithilfe mikrobieller Brennstoffzellen lassen sich Abfallströme und Abwässer klären und nachhaltig elektrische Energie gewinnen.

biooekonomie-metropolregion.de

serstoff) umgewandelt. Mithilfe der seit Jahrzehnten bekannten Fischer-Tropsch-Synthese wird das Synthesegas dann zu flüssigen Kohlenwasserstoffen – dem gewünschten Kraftstoff – umgewandelt. Die in der Biomasse ebenfalls enthaltenen Elemente wie Stickstoff oder Schwefel werden abgetrennt. Der synthetische Treibstoff ist frei von Fremdstoffen und hat deshalb dieselben Verbrennungseigenschaften wie etwa herkömmlicher Diesel. Ein weiterer Vorteil: Potenziell kann die gesamte Pflanze genutzt werden. Deshalb eignen sich Stroh oder Holzhackschnitzel für die Verwertung zu BtL-Kraftstoffen. Eine kommerzielle Nutzung der Technik erfolgt noch nicht. Es wird jedoch intensiv an BtL-Kraftstoffen geforscht. Am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wird in einer Pilotanlage das „bioliq“-Verfahren zur Herstellung von Synthesekraftstoffen entwickelt (vgl. Foto S. 42).

Biowasserstoff-Quellen

Wasserstoff gilt als Energieträger der Zukunft, da er CO₂-arm erzeugt und genutzt werden kann. Bislang jedoch wird Grüner Wasserstoff vor allem chemisch mittels Wasser-Elektrolyse produziert, ein Prozess der viel Strom aus regenerativen Quellen verbraucht. Es gibt aber auch einige biobasierte Wege zum Grünen Wasserstoff. Einer davon ist die Photosynthese von Grünalgen oder Bakterien: mithilfe von Lichtenergie und katalysiert durch Enzyme werden in der Lichtreaktion Wassermoleküle in Sauerstoff, Protonen (also Wasserstoff-Ionen) und Elektronen zerlegt. Bestimmte Enzyme – die Hydrogenasen – helfen anschließend dabei, molekularen Wasserstoff herzustellen. Ein Kasseler Forschungsteam hat zum Beispiel Cyanobakterien mithilfe molekularer Werkzeuge zu biologischen Wasserstofffabriken umfunktioniert. Auch in Biogasanlagen können Mikroorganismen unter speziellen Bedingungen Biomasse in die Gase Wasserstoff und CO₂ umwandeln (Dunkelfermentation). An beiden Wegen zum Biowasserstoff wird intensiv geforscht.

Biobasierte Energiespeicher

Bislang enthalten fast alle Batterien Metallverbindungen, basierend auf Lithium, Blei oder Vanadium, deren Gewinnung und Recycling aufwändig und oft mit

Von der Braunkohle zum biobasierten Wirtschaften: Die Modellregion Bioökonomie im Rheinischen Revier



Mit dem Kohleausstieg stehen die deutschen Braunkohlegebiete vor einem Strukturwandel. Das Rheinische Revier im Dreieck Düsseldorf-Köln-Aachen birgt dank der vorhandenen Ressourcen und Industriekulturen das große Potenzial, sich im Zuge des Strukturwandels zu einer Modellregion für nachhaltiges Wirtschaften mit internationaler Strahlkraft zu entwickeln. Mit Mitteln aus dem Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen fördert der Bund daher die **Modellregion Bioökonomie im Rheinischen Revier**. Auf Basis biogener Ressourcen und biologischer Innovationen werden neue Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle für die Region erprobt und etabliert.

Im Januar 2022 starteten drei große Forschungskonsortien, die vom BMBF bis 2026 mit rund 72 Mio. Euro gefördert werden.

- **Innovationscluster BioökonomieREVIER:** 14 Innovationslabore in drei Innovationsclustern als Keimzellen für die schnelle Umsetzung von

Forschungsideen in die wirtschaftliche Anwendung: Innovative Landwirtschaft, Biotechnologie & Kunststofftechnik und Integrierte Bioraffinerie

[biooekonomierevier.de](https://www.biooekonomierevier.de)

- **Bio4MatPro:** Kompetenzzentrum zur Biologischen Transformation der Materialwissenschaft und Produktionstechnik. Das Innovationsnetzwerk bündelt die Expertise von Unternehmen und Forschungspartnern, um hochwertige Produkte zu generieren, indem biologische Funktionalitäten und bioinspirierte Prinzipien in und auf Materialien gebracht werden. Zudem werden entsprechende Produktionstechnologien entwickelt.

[bio4matpro.rwth-aachen.de](https://www.bio4matpro.rwth-aachen.de)

- **Bioökonomie Verstehen. Verbinden. Unterstützen:** Begleitforschung für die Modellregion

Umweltproblemen verbunden sind. Die Entwicklung einer pflanzenbasierten Alternative wird derzeit vom BMEL gefördert. Dabei geht es um stationäre Redox-Flow-Batterien, die Energie in großtechnischen Maßstab speichern können. Der benötigte Elektrolyt soll zukünftig aus dem Holzbestandteil Lignin gewonnen

werden. Auch Biogasanlagen lassen sich heute als chemischer Energieträger und -speicher im Stromsektor flexibel einsetzen. In einem vom BMEL geförderten Projekt wird nach Möglichkeiten gesucht, Biogasanlagen mit Batteriespeichern zu kombinieren, um neue Vermarktungswege zu eröffnen.



Land- und Forstwirtschaft

Land- und Forstwirtschaft sind tragende Säulen der Bioökonomie. Die auf Wiesen, Äckern und in Wäldern erzeugte pflanzliche Biomasse bildet eines der Fundamente für die biobasierte Wirtschaft. Moderne Anbautechnologien erlauben es, nachhaltiger und ressourceneffizienter zu produzieren.



Land- und Forstwirtschaft stellen einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor dar. Knapp 263.000 landwirtschaftliche Betriebe und rund 29.000 forstwirtschaftliche Betriebe waren laut BMEL im Jahr 2020 in Deutschland aktiv. Die Bedeutung der Land- und Forstwirtschaft für die Wertschöpfung im ländlichen Raum ist groß. Land- und Forstwirtinnen und -wirte bewirtschaften und pflegen mehr als Dreiviertel der Fläche Deutschlands. Neben dem vorrangigen Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln erzeugen sie auch biobasierte Rohstoffe für die Industrie und Biomasse für erneuerbare Energien. Dazu gehören Holz, Industrie- und Energiepflanzen wie Raps, Mais oder Miscanthus sowie Nebenprodukte wie Gülle oder Stroh. In Fermentern entstehen aus der landwirtschaftlichen Biomasse Ausgangsstoffe für biobasierte Kunststoffe oder andere nachhaltige Chemikalien (vgl. Kap. Chemie), in Biogasanlagen oder

Blockheizkraftwerken werden daraus Wärme, Strom und Kraftstoffe (vgl. Kap. Energie). Holz aus der Forstwirtschaft ist eine bedeutende und vielseitige Ressource für die Bioökonomie: Es kann etwa zu Schnitt- und Sperrholz, zu Holzwerkstoffen und Holz-Kunststoff-Verbänden, zu Zellstoffprodukten wie Papier und Pappe, zu Pellets und Briketts und vielen weiteren innovativen Produkten verarbeitet werden. Das Cluster Forst & Holz (ohne Verlags- und Druckgewerbe) erwirtschaftet dabei einen Umsatz von ca. 131 Mrd. Euro in 98.524 Unternehmen mit 732.140 Beschäftigten.

Nachhaltige Landwirtschaft als Ziel

Rund die Hälfte der Fläche Deutschlands wird landwirtschaftlich genutzt. Von insgesamt rund 16,6

Mio. Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche entfallen laut BMEL rund 70 % auf Ackerland. Weitere 29 % werden als Grünland genutzt und nur 1 % für Dauerkulturen wie Obst- und Weinbau. Auf mehr als der Hälfte der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland werden Futtermittel, auf rund einem Viertel der Fläche Kulturpflanzen angebaut, die direkt der Ernährung dienen. Die restliche Fläche wird für die Produktion von nachwachsenden Rohstoffen für Energie und industrielle Verwertung genutzt.

Ackerbauliche Produktionssysteme sind Grundpfeiler der Ernährung. Vor dem Hintergrund einer wachsenden Weltbevölkerung bei gleichzeitig begrenzt verfügbaren Ackerflächen, dem Klimawandel oder der Notwendigkeit der Bewahrung schützenswerter artenreicher Naturräume muss der Ackerbau in Deutschland stärker auf Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit ausgerichtet werden. Die „Ackerbaustrategie 2035“ benennt daher zentrale Handlungsfelder für den Ackerbau der Zukunft und den Beitrag der Landwirtschaft zu Umwelt-, Klima- und Ressourcenschutz.

Die Bioökonomie-Forschung für die Landwirtschaft verfolgt mehrere Ziele: Zum einen wird angestrebt, den Flächenbedarf zu reduzieren und den Ertrag von Nutzpflanzen zu steigern, etwa durch moderne Pflanzenzüchtung. Zum anderen gilt es, Treibhausgas-Emissionen und andere Umweltbelastungen in der landwirtschaftlichen Produktion zu senken. Eine exakt an den Standort angepasste Bewirtschaftung ist eine mögliche Lösung. Ressourcen wie Böden, Wasser und Nährstoffe müssen möglichst effizient und nachhaltig genutzt werden. Gleichzeitig gilt es, den Artenrückgang in der Agrarlandschaft aufzuhalten und die Biodiversität durch Ökosystem- und Strukturvielfalt zu stärken.

Moderne Pflanzenzüchtung

Moderne Pflanzenzüchtung zielt nicht nur darauf ab, Erträge zu steigern. Es geht auch darum, die Sortenvielfalt auszubauen und das Spektrum an interessanten Pflanzen-Inhaltsstoffen zu erhöhen. Gefragt sind insbesondere neue Sorten, die besser mit den Folgen des Klimawandels zurechtkommen, die also widerstandsfähig etwa gegenüber Trockenheit, Salzüberschuss und Schädlingsbefall sind. Moderne,

wissensbasierte Pflanzenzüchtung kombiniert neueste Erkenntnisse aus Genetik und Molekularbiologie mit Methoden der modernen Agrartechnik sowie nachhaltigem Bodenmanagement. Zu den etablierten Züchtungstechniken haben sich neue Methoden gesellt, die als neue molekularbiologische Züchtungstechniken (NMT) bezeichnet werden. Dazu zählen unter anderem die Werkzeuge der Genom-Editierung (etwa die Genschere CRISPR-Cas), mit denen sich gezielter Veränderungen in das Erbgut von Nutzpflanzen einbringen lassen. Mit weiteren innovativen Züchtungsmethoden wie der Präzisionszüchtung auf der Basis molekularer Marker (Smart Breeding) oder Zellkulturtechniken erhalten Züchterinnen und Züchter wesentlich schneller und zielgerichteter als bisher ertragreiche Nutzpflanzensorten, die besser

Innovationsförderung des BMEL



Mit seinem Programm zur Innovationsförderung unterstützt das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) die Erforschung und die Entwicklung von technischen und nicht-technischen Innovationen in Deutschland. Gefördert werden Projekte aus Themenbereichen wie Agrartechnik, Pflanzenzüchtung, Pflanzenschutz, Nutztierzüchtung, -haltung und -gesundheit, Lebensmittelsicherheit und -qualität, Ernährung, Lebensmittelherstellung sowie Aquakultur und Fischerei. Auch mit dem Anbau von nachwachsenden Rohstoffen kann ein Beitrag zur Diversifizierung der Agrarlandschaft geleistet werden. Im Rahmen seines Förderprogramms „Nachwachsende Rohstoffe“ unterstützt das BMEL sogenannte Landschaftslabore, mit deren Hilfe nachhaltige Anbausysteme entwickelt werden.

Nutzpflanzen für die Zukunft fit machen



Ob ertragreiches Getreide, pilzresistente Zuckerrüben oder schneller wachsende Pappeln: Die Entwicklung von verbesserten Nutzpflanzen für die Zukunft verlangt nach innovativen Forschungsansätzen und kurzen Transferwegen. Unter dem Dach von **PLANT 2030** sind die vom BMBF geförderten Forschungsaktivitäten für angewandte Pflanzenforschung gebündelt. Dazu gehört insbesondere die Förderinitiative **Pflanzenzüchtungsforschung für die Bioökonomie**. Sie ist Teil einer gemeinsamen Initiative mit dem BMEL. Das wesentliche Ziel der BMBF-Förderung liegt darin, den Erkenntnisgewinn als Grundlage für Innovationen in der Pflanzenzüchtungsforschung zu steigern. Die Förderung des BMEL ist auf stärker anwendungsorientierte Projekte im vorwettbewerblichen Bereich ausgerichtet. In beiden Fällen kooperieren öffentliche Forschungsinstitutionen und Unternehmen aus Pflanzenzüchtung und verwandten Bereichen der Bioökonomie. Die Projekte zur angewandten Pflanzenforschung stützen sich dabei insbesondere auf das Wissen, das die Genomforschung in den vergangenen Jahren gewonnen hat. Die hier gesammelten Erkenntnisse sind für die gesamte Landwirtschaft von Interesse. Gefördert werden angewandte, interdiszi-

plinäre Forschungsvorhaben, die in den Themen wie funktionelle Biodiversität, Präzisionszüchtungsforschung, Ressourcennutzungseffizienz oder „grüne“ Bioinformatik für angewandte Nutzpflanzenforschung angesiedelt sind. Das Forschungsfeld der Epigenetik untersucht vererbare Änderungen der Genaktivität, die nicht auf Veränderungen der DNA-Sequenz beruhen. Inwieweit das Wissen über epigenetische Mechanismen auch in der Pflanzenzüchtung genutzt werden kann, untersuchen Forschende in der BMBF-Fördermaßnahme **Epigenetik – Chancen für die Pflanzenforschung**. Das Wechselspiel aus Pflanzenwurzeln und Bodenökosystemen steht im Fokus der BMBF-Förderinitiative **Bedeutung der Rhizosphäre für die Bioökonomie (Rhizo4Bio)**. Forschungsverbünde untersuchen hier das Zusammenspiel von Wurzel, Mikroorganismen und Boden, das die Nährstoff- und Wasseraufnahme und damit etwa die Trockentoleranz der Pflanzen bestimmt. Gefragt sind Ansätze, die Pflanzen an die künftigen klimatischen Bedingungen – etwa Dürren – anpassen und sie widerstandsfähiger machen.

pflanzenforschung.de

gegen Schädlinge, Krankheiten oder Wetterextreme gewappnet sind.

Eine zentrale Wissensbasis für die moderne Pflanzenzüchtung liefert die Genomforschung. Hier zählen deutsche Forscherteams zur Weltspitze. Sie erforschen etwa die Gerste, die hierzulande das zweitwichtigste Getreide ist. Trotz seiner Größe und Komplexität konnte das Gersten-Erbgut inzwischen vollständig entziffert werden. Ein internationales Konsortium unter Führung von Wissenschaftlern aus Gatersleben hat 2017 das Referenzgenom der Gerste veröffentlicht – die erste vollständige und hochaufgelöste Erbgut-Sequenz. Rund 5 Mrd. Basenpaare identifizierten die Fachleute und brachten sie in die richtige Reihenfolge. Mittlerweile sind die Forschenden dabei, das Pan-genom der Gerste zu analysieren, also die Gesamtheit der Genome der zahlreichen Varianten, die rund um den Globus existieren. Damit wird eine wertvolle Ressource für die globale Pflanzenzüchtung geschaffen.

Deutsche Forschende waren in den vergangenen Jahren zudem maßgeblich daran beteiligt, die riesigen Genome von Roggen und Brotweizen zu sequenzieren und zu analysieren. Das BMBF hat die Genomprojekte im Rahmen von Plant 2030 unterstützt (vgl. *Kasten S. 50*). Aufbauend auf den Genomdaten unterstützt das BMEL mit dem Leuchtturmprojekt TERTIUS ein

Konsortium, das ertragreiche Weizensorten züchten will, die über eine hohe Trockenstress-Toleranz verfügen. Dank stärker verzweigter und tiefer dringender Wurzeln sollen die Nutzpflanzen besser mit den immer häufigeren und längeren Trockenperioden in den Frühjahrs- und Sommerperioden zurechtkommen.

Hinzu kommen Forschungsansätze, die mithilfe modernster Techniken verschiedene Klimaszenarien im Gewächshaus simulieren können und darauf aufbauend Auswirkungen auf Wachstum und Ertrag errechnen können. Derartige Arbeiten werden unter anderem am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Bad Lauchstädt durchgeführt. Ein weiteres Forschungsfeld widmet sich dem Zusammenhang zwischen Pflanzen-Genen, der Umwelt und den äußeren Merkmalen, dem Phänotyp. Dies bestimmt Struktur, Funktion und effiziente Ausnutzung von Ressourcen dieser Pflanze.

Mit der Phänotypisierung werden Pflanzen nach komplexen äußeren Merkmalen oder Eigenschaften abgesucht und vermessen, ohne sie dabei zu verletzen oder zu zerstören. Dazu hat das BMBF den Aufbau des „Deutschen Pflanzen-Phänotypisierungs-Netzwerks“ (DPPN) unterstützt. In Jülich, München und Gatersleben sind moderne Hochdurchsatz-Anlagen zur Durchmusterung von Pflanzen entstanden.



Forschende am IPK Gatersleben zählen in der Gersten-Genetik und -Genomforschung zur Weltspitze.

Die Bodenfruchtbarkeit erhöhen

Für Öko-Landwirte gehört nachhaltiges, biobasiertes Wirtschaften seit jeher zum Kern ihres Tuns. Sie legen Wert auf möglichst geschlossene Betriebskreisläufe und bauen das Futter für die Tiere hauptsächlich im eigenen Betrieb an. Auf leicht lösliche Mineraldünger und chemischen Pflanzenschutz wird verzichtet. Um die Böden fruchtbar zu halten, düngen Bio-Landwirte mit Mist oder Gülle oder sie bauen regel-

Nasse Moore als Ressource



Nasse Moore sind hervorragende Kohlenstoff-Speicher: Der Grund liegt in ihrer dichten organischen Masse, dem Torf. Doch sobald Torf – etwa bei Trockenlegung – mit Sauerstoff in Kontakt gerät, verwandelt sich das Moor in eine wahre CO₂-Schleuder. Wenn die Böden trotzdem landwirtschaftlich genutzt werden sollen, müsse nasse Produktionsverfahren entwickelt werden. Mit dem Begriff Paludikultur ist die landwirtschaftliche Nutzung nasser Moorstandorte gemeint. Die Universität Greifswald hat sich auf die Paludikultur-Forschung spezialisiert. Hier wird erforscht, welches Potenzial für die Bioökonomie besteht, im Einklang mit Moorschutz und Klimaschutz. Sowohl BMEL als auch BMBF unterstützen die Greifswalder Forschungsaktivitäten. Niedersachsen bündelt seine Aktivitäten zum Thema in der Kompetenzstelle Paludikultur (Foto). Das BMEL fördert zudem Projekte zur Torfminderung und zum Moorbodenschutz, aber auch Modell- und Demonstrationsvorhaben zum Torfersatz im Hobby- und Friedhofsgartenbau sowie zum Moorbodenschutz. Bestandteil der Maßnahmen ist die Entwicklung eines Zertifizierungssystems für Torfersatzstoffe. Die Fach- und Verbraucherinformation zum Thema Torfminderung rundet das Maßnahmenpaket ab.

mäßig Hülsenfrüchte an. Während die Anzahl der landwirtschaftlichen Betriebe insgesamt zurückgeht, steigt die Anzahl ökologisch wirtschaftender Betriebe stetig. 2020 gab es rund 35.400 Öko-Betriebe. Damit wirtschafteten rund 13,5 % aller landwirtschaftlichen Betriebe ökologisch. Eine zentrale Herausforderung im Öko-Landbau sind die niedrigeren Erträge im Vergleich zur konventionellen Bewirtschaftung. Entsprechend groß ist das Interesse an neuen Forschungserkenntnissen zur Landnutzung und Bodenfruchtbarkeit oder anderen Strategien, um Erträge nachhaltig zu steigern.

Hierbei gilt das Potenzial von Hülsenfrüchten, den Leguminosen, längst nicht als ausgeschöpft. Diese können dank Knöllchenbakterien an ihren Wurzeln Stickstoff aus der Luft fixieren. Sie düngen damit die Böden. Zudem sind sie reich an Eiweißen und damit wertvolle Proteinlieferanten. Das BMEL fördert im Rahmen der Eiweißpflanzenstrategie Projekte, die dem Anbau und der Züchtung von proteinhaltigen Lupinen, Soja, Erbsen und Ackerbohnen hierzulande wieder zu einem Aufschwung verhelfen sollen. Dazu gehören auch abwechslungsreiche Fruchtfolgen und Mischkulturen. So wird in einem BMEL-Projekt der Mischanbau von Mais und Stangenbohnen erprobt. Das ist nicht nur gut für die Bodenfruchtbarkeit, sondern wirkt sich potenziell auch positiv auf die Biodiversität aus und verringert die Bodenerosion.

In dem vom BMBF geförderten Projekt IMPAC3 wurden von Forschenden der Universität Göttingen zum Beispiel Mischkulturen in verschiedenen Anbausystemen untersucht. So wurde auf Ackerflächen unter anderem der gemeinsame Anbau von Winterweizen und Winterackerbohne untersucht. Die Ergebnisse des Feldversuchs sind vielversprechend: So konnte durch den gemeinsamen Anbau die Stickstoffversorgung des Weizens im Vergleich zur Reinkultur um 40 % gesteigert, der Düngbedarf reduziert und der Ertrag um mehr als 30 % gesteigert werden.

Die zehn Bodenforschungsverbände der BMBF-Fördermaßnahme „Boden als nachhaltige Ressource“ (BonaRes) loten ebenfalls neue Konzepte und Strategien für ein nachhaltiges Bodenmanagement aus (vgl. *Kreislaufbasierte Bioproduktion*). Das soll nicht nur die Bodenfruchtbarkeit steigern, sondern kann auch die Funktion der Böden als Kohlenstoffspeicher stärken. Neben neuartigen Fruchtfolgen – etwa dem Anbau von

Smart und nachhaltig: Die Agrarsysteme der Zukunft



Für eine nachhaltige, ressourceneffiziente und anpassungsfähige Agrarproduktion sind neue Lösungsansätze gefragt. Wie solche innovativen Konzepte aussehen können, steht im Mittelpunkt der BMBF-Fördermaßnahme **Agrarsysteme der Zukunft**. Acht große Konsortien loten eine landwirtschaftliche Produktion aus, die in hohem Maße digitalisiert, automatisiert und vernetzt ist und die moderne Anbautechnologien klug miteinander kombiniert. Im Sinne einer zukunftsfähigen Landwirtschaft und entsprechend bioökonomischer Prinzipien spielen Smart- und Hightech, Künstliche Intelligenz (KI), Digitalisierung sowie ressourceneffiziente geschlossene Energie- und Stoffkreislaufsysteme eine zentrale Rolle. Dabei bearbeiten die Konsortien auch alternative Produktionssysteme vom ländlichen Raum bis hin zur Stadt. In den Konsortien werden neue und teils unkonventionelle Ansätze verfolgt. Für den nachhaltigen Anbau von Kulturpflanzen wird zum Beispiel die kleinflächige

Bewirtschaftung im Inselanbau erprobt und ein KI-gestütztes Informations- und Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt (DAKIS). Neue Ansätze zur Grünlandnutzung durch Weidehaltung werden erforscht (GreenGrass) sowie Konzepte ohne chemisch synthetischen Pflanzenschutz (NOcsOS). Im Fokus steht zudem die Entwicklung modularer, hochgradig kontrollierter und geschlossener Anbau- und Produktionssysteme und die Erschließung unkonventioneller Produktionsorganismen – etwa Quallen, Salzpflanzen oder Grillen (z.B. CUBES Circle, Food4Future). In SUSKULT erschließen die Partner Kläranlagen als Standorte einer hydroponischen Nahrungsmittelproduktion. Nährstoffkreisläufe zwischen Stadt und Land zu schließen, ist das Ziel des Projektkonsortiums RUN. Bessere Arbeitsbedingungen für Landwirtinnen im teilautonomen Traktor zu schaffen, hat Fahrerkabine 4.0 zum Ziel. Insgesamt fördert das BMBF die acht Agrarsysteme der Zukunft mit knapp 43 Mio. Euro. agrarsysteme-der-zukunft.de

Zwischenfrüchten wie Klee, Ackersenf oder der Bienenweide Phacelia – untersuchen die BonaRes-Teams zum Beispiel, wie sich die mikrobielle Lebensgemeinschaft im Boden, das Mikrobiom, günstig beeinflussen lässt. Die Wechselwirkungen von Pflanzenwurzel und ihrer direkten Umgebung im Boden steht im Fokus einer weiteren BMBF-Fördermaßnahme (vgl. *Kasten S.50*).

Digitalisierte Landwirtschaft

Die Weiterentwicklung der Landwirtschaft im Sinne einer nachhaltigen und ressourceneffizienten Bewirtschaftung ist unter anderem dem immensen technologischen Fortschritt der vergangenen Jahrzehnte zu verdanken. Auch in der Landwirtschaft ist

die Digitalisierung in vollem Gange: Es gibt mittlerweile viele öffentliche digitale Informationen zum Boden, zur Landnutzung oder zum Klima. Zudem steigt die zur Verfügung stehende Menge an Daten, die durch Luftaufnahmen von Drohnen oder Erdbeobachtungssatelliten entstehen. Traktoren und andere Landmaschinen werden zunehmend mit Sensoren und Messtechnik ausgestattet, welche den Zustand des Bodens oder der Pflanzen erfassen können.

Landwirtschaftliche Maschinen können so den Wasser- und Nährstoffbedarf der Feldfrüchte ermitteln. Leistungsfähige Informatikanwendungen wie Künstliche Intelligenz (KI) helfen bei der Auswertung der riesigen Datenmengen. Werden die aktuellen Satelliten- und Wetterdaten berücksichtigt, können Pflanzen bedarfsgerecht und punktgenau bewässert, gedüngt oder von Unkraut befreit werden. Dadurch steigen nicht nur die Effizienz und der Ertrag. Insgesamt verringert sich so der Eintrag überschüssiger Nährstoffe in die Umwelt und die Kosten für Dünger, Pflanzenschutzmittel und Saatgut sinken.

Um der zunehmenden Bodenverdichtung durch große Maschinen entgegenzuwirken, eignen sich kleine, autonom betriebene und GPS-gesteuerte Feld- und Ernteroboter oder Drohnen. Die Digitalisierung ebnet damit den Weg hin zu einer Präzisionslandwirtschaft, die ressourceneffizient und umweltschonend ist. Sie erlaubt zudem eine kleinteiligere und sogar punktgenaue Bewirtschaftung von Ackerflächen. Digitale Helfer unterstützen auch die Tierhaltung: Sensor- und Messtechnik helfen im Stall durch Aktivitätsmessung,

bei der bedarfsgerechten Fütterung, beim Melken oder bei der Überwachung des Gesundheitszustands der Tiere. Digitale Technologien bergen damit enormes Potenzial für einen schonenden und nachhaltigen Anbau und eine artgerechte Viehhaltung. Eine Landwirtschaft 4.0 mit intelligent vernetzten Maschinen und Systemen und dem Einsatz von KI und weiterer IT-Anwendungen spielt im Rahmen der BMBF-Förderinitiative Agrarsysteme der Zukunft eine bedeutende Rolle (vgl. *Kasten S. 53*). Das BMEL fördert zum Thema unter anderem sogenannte digitale Experimentierfelder in der Landwirtschaft und hat einen Förderschwerpunkt „Gartenbau 4.0“ initiiert.

Digitalisierung in der Forstwirtschaft

Im Gegensatz zur Landwirtschaft gestaltet sich die Digitalisierung in der Forstwirtschaft bislang verhalten. Während die großen Betriebe des privaten und öffentlichen Waldbesitzes und der Holzindustrie ihre Geschäftsprozesse – wenngleich vornehmlich mit Einzellösungen – zum Teil bereits digitalisiert haben, dominieren im Kleinprivatwald und in kleineren Unternehmen eher Zurückhaltung und Nachholbedarf. Eine digitale Vernetzung entlang der gesamten Wertschöpfungskette Wald und Holz lässt noch auf sich warten. Doch mithilfe der Förderpolitik der Bundesregierung rücken Lösungen ins Blickfeld.

In einer 2022 veröffentlichten Online-Umfrage des Deutschen Forstwirtschaftsrates und der Arbeitsgemeinschaft Rohholz zur Verbreitung der Digita-



Aufgestapeltes Holz in einem Mischwald



Pappelernte auf einer Kurzumtriebsplantage

lisierung in der deutschen und der österreichischen Forst- und Holzwirtschaft gaben 94 % der 256 befragten Unternehmen an, dem Thema Digitalisierung gegenüber aufgeschlossen zu sein. Im Gegensatz dazu mangelt es 65 % der Umfrageteilnehmer allerdings aktuell an tatsächlicher Bereitschaft zur Umsetzung digitaler Projekte im Cluster Forst und Holz.

Als größtes Hemmnis bei der Umsetzung benennen die Befragten bislang fehlende standardisierte Geschäftsprozesse, dabei insbesondere einheitliche Schnittstellen für den Datenaustausch. Die unzureichende Netzabdeckung im Wald und die unbefriedigende Breitband-Internetanbindung im ländlichen Raum stellen neben Bedenken in puncto Datenschutz und IT-Sicherheit weitere Hemmnisse dar.

Für die effizientere Holzbereitstellung und -verarbeitung bietet die Digitalisierung im Cluster Forst und Holz aber unverzichtbare Möglichkeiten. Inzwischen sind bundesweit zahlreiche Initiativen und Projekte entstanden, die das Thema vorantreiben.

Allein das BMEL fördert über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. aktuell 15 Forschungsverbände mit mehr als 40 Einzelvorhaben zu Aspekten der Digitalisierung entlang der Wertschöpfungskette Forst und Holz. Im Forschungsprojekt Smart Forestry wird beispielsweise ein clusterübergreifendes Verfahren für die intelligente und vollintegrierte Holzernte entwickelt. Die an den Prinzipien von Wald und Holz

4.0 orientierten Wertschöpfungsnetzwerke beruhen auf der Vernetzung aller an der Holzernte beteiligten Akteure und Systeme über digitale Zwillinge im „Internet der Dinge“.

Im Projekt Contura widmet sich ein Forschungs- und Praxisverbund der Entwicklung eines Systems zur digitalen Zustandserfassung forstlicher Wege. Das auf einem künstlichen neuronalen Netzwerk basierende System speichert beim Befahren eines Forstweges Informationen über dessen Beschaffenheit in einem Datensatz. Mit diesen Daten wird ein digitaler Zwilling des Weges erstellt; eine aktuelle Momentaufnahme des realen Objektes wird digital gespeichert. Nach Erfassung und Bewertung des realen Wegezustands dient der digitale Zwilling als Grundlage für die Planung der Wege-Instandhaltung – eine Voraussetzung für Waldarbeit und Holzernte.

Holzproduktion an den Klimawandel anpassen

Der Wald stellt mit dem Holz einen Großteil der in Deutschland verwendeten nachwachsenden Rohstoffe bereit. Gleichzeitig speichern Waldbäume Kohlenstoff aus CO₂ in ihre Biomasse ein und tragen damit wesentlich zum Klimaschutz bei. Die großen Herausforderungen sind wie bei der Landwirtschaft auch die Sicherung der nachhaltigen Rohstoffversorgung und die Anpassung an den Klimawandel. Ausgelöst durch

Dürren und Stürme haben Kalamitäten den Wäldern insbesondere in den Jahren 2018 bis 2020 stark zuge-
setzt, der Borkenkäfer hat sich massiv ausgebreitet.

Neben dem Waldumbau hin zu klimaangepassten Mischwäldern mit standortgerechten Baumarten kommt der Forstpflanzenzüchtung eine wichtige Bedeutung zu, um die Versorgung mit hochwertigem forstlichen Vermehrungsgut zu sichern. Gerade bei Bäumen gestaltet sich die Züchtung besonders aufwendig und erstreckt sich über lange Zeiträume. Im Rahmen einer Züchtungsstrategie haben Bund und Länder ihre Ressourcen gebündelt, um sechs Baumarten (Douglasie, Lärche, Bergahorn, Fichte, Kiefer, Eiche) für den Wald der Zukunft fit zu machen.

Daneben hat die Bund-Länderarbeitsgruppe Forstgenressourcen und Forstsaatgutrecht (BLAG-FGR) 2021 ein länderübergreifendes Konzept zur Identifizierung von für Deutschland relevanten Baumarten im Klimawandel zur Anlage von Vergleichsanbauten veröffentlicht. Ziel der Bundesregierung ist es, eine ausgewogene und tragfähige Balance zwischen den steigenden und teilweise konkurrierenden Ansprüchen der Gesellschaft an den Wald und seiner

nachhaltigen Leistungsfähigkeit zu finden. Das hat das BMEL in der Charta für Holz 2.0 adressiert (vgl. Kap. Die Rohstoffquellen der Bioökonomie). Auch die „Waldstrategie 2050“ greift dieses Leitbild auf und formuliert Maßnahmen für eine nachhaltige Waldentwicklung.

Land- und Forstwirtschaft kombiniert

Bäume können auch die Landwirtschaft bereichern. Kurzumtriebsplantagen sind Äcker, auf denen schnellwachsende Hölzer wie Pappeln und Weiden angebaut werden. Diese Dauerkulturen sind nach wenigen Jahren erntereif. Das BMEL hat verschiedene Pflanzenzüchtungsprojekte gefördert, um Baumarten für einen wirtschaftlichen Anbau in Kurzumtriebsplantagen zu erschließen. In Agroforstsystemen werden Gehölze – Bäume oder Sträucher – mit Ackerkulturen und Tierhaltung auf der gleichen Fläche kombiniert. Durch die verschiedenen Komponenten sollen ökologische und wirtschaftliche Vorteile entstehen. Agroforstsysteme geraten auch als potenzielle Klimaschützer in den Blick: Sie könnten eine Strategie sein, um die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre

Blaue Bioökonomie im Fokus – der Innovationsraum BaMS

Der **Innovationsraum BaMS – Bioökonomie auf Marinen Standorten** forscht im Bereich der sogenannten blauen Bioökonomie: Er beschäftigt sich mit der Entwicklung aquatischer Kreislaufwirtschaften. Grundlage dieser Kreislaufwirtschaft sind alle Formen von blauer Biomasse, unter anderem Algen, Fische, Muscheln und andere Wasserorganismen, die als Rohstoffe für die Verarbeitung in Bioraffinerien oder Biogasanlagen dienen. Die Mitglieder des Innovationsraums BaMS stellen hieraus Lebensmittel, Kosmetika, Futtermittel und Ausgangsstoffe für die Landwirtschaft her. Ziel ist es dabei, Rohstoffe und anfallende Reststoffe effizient zu verwerten und durch neue Produktions- und Verarbeitungsverfahren Kreisläufe zu schließen. Dadurch wird ein wichtiger Beitrag zu mehr nachhaltiger Nutzung biogener Ressourcen aus dem Meer und aus anderen Gewässern geleistet. Der Innovationsraum vereint 28 Unternehmen und 17 Forschungseinrichtungen aus Norddeutschland, um mit gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten eine nachhaltigere

Nutzung aquatischer Ressourcen zu etablieren und die blaue Kreislaufwirtschaft zu stärken. Im Mittelpunkt stehen die Durchführung von Projekten und der Aufbau von Modellstandorten, durch die der Wandel hin zu einer biobasierten, blauen Wirtschaftsweise realisiert werden soll. Das BMBF fördert den Innovationsraum mit bis zu 20 Mio. Euro.

blaue-biooekonomie.de





Salat vom Fließband: Das automatisierte, vertikale Pflanzenaufzuchtssystem OrbiPlant am Fraunhofer IME in Aachen

zu steigern. Das BMEL und das BMBF fördern mehrere Forschungsprojekte zu Agروفorstsystemen.

Geschlossene Produktionssysteme

Dank neuer Technologien sind in den vergangenen Jahren zudem immer ausgereifere geschlossene Produktionssysteme entstanden. Hochgradig kontrollierte Produktionsbedingungen erlauben es, ganzjährig Obst und Gemüse anzubauen und Nutztiere zu halten. Sogenannte Indoor-Farmen sind in der Regel platzsparende Produktionssysteme mit weitgehend geschlossenen Stoff- und Energieströmen und gekoppelten Kreisläufen. Durch die Verlegung der Nahrungsmittelproduktion in geschlossene, beheizte und künstlich beleuchtete Räume wird eine orts- und klimaunabhängige landwirtschaftliche Produktion in großem Maßstab möglich.

Unterstützt vom BMBF hat das Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) zum Beispiel eine emissionsfreie Aquaponik-Anlage ent-

wickelt, die Buntbarsche und Tomaten gemeinsam gedeihen lässt. In dem Agrarsysteme-der-Zukunft-Projekt CUBES Circle werden geschlossene Produktionsmodule zur Kultur von Fischen, Pflanzen und Insekten smart miteinander vernetzt und die Stoff- und Energieflüsse zu einem Gesamtsystem verbunden. Andere innovative Konzepte setzen darauf, den Anbau von Pflanzen in den städtischen Lebensraum zu integrieren – etwa auf Dächern oder an Fassaden.

Immer mehr Akteure setzen auf Urban Farming, um die Nachfrage nach regionalen Produkten zu bedienen sowie vor Ort anfallende Rest- und Abfallstoffe oder Abwärme gezielt zu nutzen. So werden in dem Projekt SUSKULT, das vom Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) koordiniert wird, Kläranlagen zum Nährstofflieferanten für den Gemüseanbau in hydroponischen Anlagen. In diesem Agrarsystem der Zukunft wird unter anderem der Anbau von Salat, Wasserlinsen oder Süßkartoffeln erprobt. Indoor-Farming-Ansätze spielen auch im Innovationsraum NewFoodSystems eine wichtige Rolle (vgl. Kap. Ernährungsindustrie).



Maschinenbau

Deutschland gehört im Maschinenbau zu den führenden Nationen. Durch den Einsatz moderner Maschinen, Geräte und Verfahren lassen sich Produktionsprozesse in jedem Industrie- oder Wirtschaftsbereich nachhaltig und effizient gestalten. Für den weiteren Ausbau der Bioökonomie sind Innovationen aus dem Maschinenbau damit ein wichtiger Treiber.



Der Maschinen- und Anlagenbau gehört zu den traditionellen Stärken des Wirtschaftsstandortes Deutschland. Technische Anlagen, Maschinen, Verfahrens- und Prozesstechniken stellen in einer biobasierten Wirtschaft einen zentralen Faktor dar, um ressourceneffizient und nachhaltig zu wirtschaften. Eine besondere Herausforderung für Ingenieurinnen und Ingenieure besteht immer dann, wenn technische und biologische Anforderungen miteinander in Einklang gebracht werden müssen. Je nach Spezifikation müssen Maschinen, Anlagen und Prozesse gezielt für biologische Materialien entwickelt werden. Wichtiger Treiber für Innovationen im Maschinenbau sind Digitalisierung und Automatisierung – etwa Robotiklösungen. Leistungsfähige Technologien werden im Maschinenbau miteinander kombiniert und Maschinen intelligent vernetzt.

Bioprozesstechnik: Optimale Arbeitsbedingungen für Zellen

In biotechnologischen Produktionsprozessen werden lebende Zellen als Produzenten für Chemikalien, Arzneimittel, Nahrungsmittelzusätze oder Kosmetikinhaltsstoffe eingesetzt. Damit die empfindlichen Zellfabriken optimale Leistungen erbringen und sich schnell vermehren, werden sie unter möglichst idealen Bedingungen herangezüchtet. Bioreaktoren – auch Fermenter genannt – sind das Kernstück jeder biotechnologischen Produktionsanlage. Diese Anlagen zu entwickeln, im Industriemaßstab zu betreiben und die Abläufe zu optimieren, erfordert entsprechend ausgereifte Bioprozesstechnik. Hier kommen Ingenieurskunst und biologisches Wissen zusammen. In Deutschland existiert an den Hochschulen, den

außeruniversitären Forschungseinrichtungen und in der Industrie exzellentes Know-how in der industriellen Biotechnologie. Heute liefern neue Erkenntnisse in der Bioverfahrenstechnik die Basis, um besonders effiziente Anlagen zu konstruieren, die sich beispielsweise durch einen geringen Energiebedarf oder einen hohen Wirkungsgrad auszeichnen. Hinzu kommen spezielle Anforderungen, die sich durch neue Produktionsstämme oder neue Produktionsorganismen wie Algen ergeben.

Bioraffinerien sind die großen industriellen Fabriken der Bioökonomie. In diesen komplex aufgebauten technischen Anlagen wird pflanzliche Biomasse in ihre Bestandteile zerlegt und verwertet – analog zu einer Erdölraffinerie. Das Konzept Bioraffinerie wird an mehreren Standorten in Deutschland erforscht und weiterentwickelt (vgl. Kap. *Kreislaufbasierte Bioproduktion*).

Ein Beispiel liefert der BMEL-finanzierte Forschungsverbund „EthaNa“. Darin haben die Beteiligten ein ganzheitliches Konzept zur Rapsverwertung entwickelt – von der Schälung der Rapssaat über den Zellaufschluss der Rapskerne bis hin zur fraktionierten Extraktion von Öl, Proteinen und weiteren Inhaltsstoffen. Letzterer Prozess ermöglicht die Nutzung bislang nicht aus Raps erzeugter Wertstoffe, die für technische oder kosmetische Produkte attraktiv sind. Integrieren lassen soll sich das Verfahren sowohl in herkömmlichen Ölmühlen als auch in Pflanzenöl-Bioraffinerien.

Zentrale Herausforderungen in der Bioprozesstechnik liegen bei der kontinuierlichen Überwachung der biobasierten Produktionsprozesse sowie beim Aufreinigungsschritt am Ende der Prozesskette. Mit Blick auf die Kosten ist die Industrie zudem daran interessiert, die Ressourceneffizienz zu optimieren. Mit Fragen wie diesen beschäftigte sich zum Beispiel eine vom BMBF geförderte strategische Allianz für wissenschaftsbasierte Prozessintelligenz, die von der Sartorius Lab Instruments GmbH & Co. KG in Göttingen koordiniert wurde, um eine neuartige Sensor- und Software-Plattform aufzubauen. Ebenfalls unterstützt das BMBF das Verbundprojekt „DigInBio“, in dem das Forschungszentrum Jülich, die TU München und die Leibniz-Universität Hannover digitale und automatisierte Prozesse im Biotechnologie-Labor etablieren (vgl. *Pharma*).

Bioschmierstoffe für Maschinen

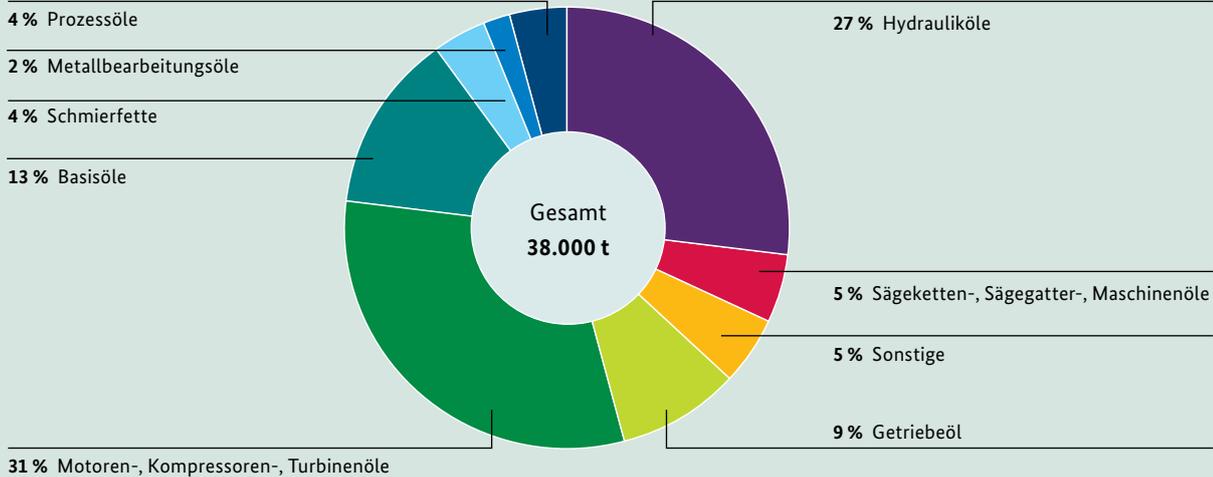
Für alle Anwendungen in den Bereichen Schmierung und Druckübertragung gibt es heute Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen (vgl. Kap. *Chemie*). Sie sind biologisch abbaubar, umweltverträglich und haben ausgezeichnete Leistungsdaten. 2020 lag die Produktion in Deutschland bei 38.000 Tonnen (vgl. *Grafik S. 60*). Hauptrohstoffe waren Palm- und Palmkernöl sowie Rapsöl, gefolgt von tierischen Fetten. Eine bislang geringe, aber zunehmende Bedeutung haben Sonnenblumenöl und Reststoffe wie Altfett. Letzteres wurde beispielsweise im BMBF-geförderten Projekt „ZeroCarbFP“ untersucht, das zum Ziel hatte, Altfett aus der Gastronomie mithilfe von Enzymen zu erschließen und Schmierstoffzusätze daraus herzustellen. Biologisch abbaubare Verdickungs- und

Innovative Biogasanlagen-Technik



Kernstück von Biogasanlagen sind riesige Gärbehälter. In diesen Fermentern wandeln Mikroorganismen Biomasse aus Pflanzen, Gülle oder Lebensmittelresten zu Biogas und anderen Gärprodukten um. Biogas ist ein Gemisch aus Kohlendioxid und Methan, das vor Ort in einem Blockheizkraftwerk zu Strom und Wärme umgewandelt wird. Deutschland ist in Sachen Biogas-Technologie international führend. Forschende tüfteln daran, den Energieertrag pro Einheit Biomasse zu optimieren, etwa indem man Zuschlagstoffe in den Fermenter beimischt. Gleichzeitig wird die Prozess- und Regeltechnik verfeinert sowie an Biogas-Speichersystemen geforscht. Innovationen gibt es zudem bei den nutzbaren Rohstoffen, zu denen inzwischen auch Stroh und weitere cellulosehaltige Reststoffe zählen. Auch die Abscheidung und stoffliche Nutzung von Kohlendioxid rückt in den Fokus.

Gesamtmenge von eingesetzten Pflanzenölen und Fetten im Schmierstoffmarkt in Deutschland 2020



Quelle: FNR (2022)

Bindemittel für Schmiermittel und Gleitlacke entwickelte das Projekt „PHAT“ mit Unterstützung des BMBF. Grundlage dafür bilden Polyhydroxyalkanoate, die eine Reihe von Bakterien natürlicherweise produzieren. Auch das BMEL hat 2019 eine 6 Mio. Euro schwere Förderinitiative gestartet, um biobasierte Schmierstoffe und Hydraulik-Öle voranzubringen. Sie umfasst acht Verbundvorhaben mit 31 Einzelprojekten. Diese zielen auf Komponenten und Additive für Kühlschmierstoffe in der spanenden und umformenden Metallbearbeitung sowie auf die Entwicklung thermisch belastbarer pflanzlicher Schmierfette für Wälzlager und auf stationäre und mobile Hydrauliksysteme.

Mit Biomaterialien Produkte fertigen

Mit Blick auf die wachsende Nachfrage bei biobasierten Kunststoffen und (teil-)biobasierten Verbundwerkstoffen hat sich die Fertigungstechnik den neuen Anforderungen angepasst und Formpress- sowie Spritzgussverfahren weiterentwickelt. Eine große Herausforderung besteht, wenn Bauteile mehrdimensional geformt werden müssen, denn Holz und Naturfasern haben gegenüber klassischen mineralischen Füll- oder Verstärkungsstoffen eine geringere Dichte. Dieser und ähnlichen prozesstechnischen Herausforderungen widmete sich das vom BMEL geförderte

Biopolymernetzwerk, in dem unter anderem erprobt wurde, wie das sogenannte Sandwich-Spritzgussverfahren auch für teilbiobasierte Verbundwerkstoffe genutzt werden kann.

Dem Biopolymernetzwerk folgte das Zukunftsnetzwerk biobasierte Polymere (BioFoN). Es hat das Ziel, Fachleute zu vernetzen und den Wissensaustausch zu verbessern, um langfristig eine vollständig biobasierte Kunststoffindustrie zu ermöglichen. Gemeinsam werden Projekte verfolgt wie die Erarbeitung neuer Herstellungsprozesse für biobasierte Verpackungen oder für Geigenbögen aus Naturfaser-Verbundwerkstoffen. Branchenübergreifend wachsender Popularität erfreut sich zudem der 3D-Druck.

Neben den klassischen Kunststoffen kommen hier zunehmend biobasierte Rohstoffe zum Einsatz, so werden beispielsweise in einem vom BMEL geförderten Projekt Möbel aus Holz mit dem 3D-Drucker hergestellt. Auch das Bauwesen profitiert: So lassen sich Leichtbauteile aus Holz oder Flachs computergestützt entwerfen und von Robotern fertigen (vgl. Kap. Bau).

Intelligente Automatisierungsprozesse

Aus der Perspektive der Bioökonomie ist der Maschinenbau aber nicht nur hinsichtlich des Anlagenbaus

und der Verfahrenstechnik von Interesse. Die Digitalisierung aller Wirtschaftsbranchen geht einher mit einer zunehmenden Automatisierung und einer intelligenten Vernetzung der Systeme.

Beispiel Landwirtschaft: In den vergangenen Jahren hat die Präzisionslandwirtschaft stark an Bedeutung gewonnen (vgl. Kap. Land- und Forstwirtschaft). Der Maschinenbau liefert hierfür Innovationen aus der Mess- und Regelungstechnik sowie bei Automatisierungsverfahren, die sowohl Abläufe auf dem Acker als auch im Stall optimieren helfen und damit zur Nachhaltigkeit beitragen.

Dazu gehören auch Robotiklösungen: Etwa Feldroboter, die künftig vor allem bei schweren und eintönigen Arbeiten eingesetzt werden könnten, wenn eine präzise Arbeit über einen langen Zeitraum nötig ist – wie beim Düngen oder Säen. Vielversprechende Ansätze gibt es auch im Obst- und Gemüsebau, wo Roboter zum Bewässern und Ernten eingesetzt werden. Selbst empfindliche Früchte wie Erdbeeren oder Einlegegurken können inzwischen von Roboterhand gepflückt werden. Automatisierte Prozesse sind auch in der Viehhaltung gefragt – etwa in Form von Melkrobotern oder bei der Fütterung der Tiere. Die Maschinen helfen vor allem bei großen landwirtschaftlichen Anlagen, Ressourcen effizienter einzusetzen.

Hightech-Anlagen schaffen zudem die Grundlagen für eine nachhaltige Agrarproduktion, etwa bei Gewächshäusern oder Indoor-Farming-Systemen für die urbane Landwirtschaft. In letzteren wird beispielsweise der Einsatz von Hydrokulturen kombiniert mit moderner LED-Lichttechnik, Heizungs- und Belüftungssystemen, Sensortechnik und intelligenter Informationstechnik, um Ressourcen möglichst effektiv nutzen zu können (vgl. Kap. Land- und Forstwirtschaft).

Auf Expertise des Ingenieurwesens ist auch die Lebensmittelverarbeitung angewiesen, um ihre Herstellungsverfahren ressourceneffizient und nachhaltig zu gestalten. Nachgefragt werden zum Beispiel intelligente Automatisierungsprozesse. Am Deutschen Institut für Lebensmitteltechnik wird intensiv daran geforscht, flexibel einsetzbare, hygienische Greiftechniken zu entwickeln. Ebenfalls von großer Bedeutung ist die Prozessanalytik in diesem Feld. Sie erfasst und bestimmt die Qualität der hergestellten Produkte sowie der zugelieferten Waren und stellt die Systematik

zur Prozessverfolgung und -regelung, Datenanalyse und Simulation von Prozessvorgängen bereit – von der Bestimmung der Inhaltsstoffe, dem Erfassen physikalischer und funktioneller Eigenschaften über das Tracking und Tracing von Lebensmitteln bis zur Produktbewertung der verbrauchenden Personen.

Prozesstechnik für die Kreislaufwirtschaft

Eine nachhaltige Bioökonomie zielt auf geschlossene Stoffkreisläufe, indem Ressourcen effizienter genutzt und die Entstehung von Abfällen und Emissionen minimiert werden. Entlang der gesamten Wertschöpfungskette ist dafür innovative Prozesstechnik gefragt. Das gilt für das intelligente Produktdesign, die Produktion oder die Kaskadennutzung von biobasierten Ressourcen (vgl. Kap. Kreislaufbasierte Bioproduktion). Dank Innovationen im Maschinen- und Anlagenbau wird die Verwertung von Agrarreststoffen oder industriellen Abfallströmen erst möglich. Ein anschauliches Beispiel liefert das vom BMBF geförderte Projekt CocoaFruit: Hier versuchen Forschende, das Fruchtfleisch und die Schale der Kakaofrucht zu verwerten. Für ein hochwertiges Recycling oder Upcycling ist die vorgeschaltete Trennung und Aufarbeitung von Wertstoffen wichtig. Beispiele hierfür sind die Rückgewinnung von Phosphaten aus Klärschlamm, von Baustoffen aus Bauschutt oder von Balsaholz aus Rotorblättern von Windkraftanlagen.



Susanne Naumann vom Fraunhofer IVV erforscht, wie sich Schale und Fruchtfleisch der Kakaofrucht verwerten lassen.



Ernährungsindustrie

Die Ernährungsindustrie ist ein bedeutender Teil der Bioökonomie. Hier werden die Erzeugnisse aus der Landwirtschaft zu Lebensmitteln und Futtermitteln verarbeitet. Ressourcenschonende Technologien helfen dabei, gesunde, hochwertige und sichere Produkte zu erzeugen.



Mit rund 6.100 Unternehmen und 614.000 Beschäftigten gehört die Ernährungsindustrie zu den größten Industriezweigen in Deutschland. Der Gesamtumsatz lag nach Angaben der Bundesvereinigung der Deutschen Ernährungsindustrie (BVE) im Jahr 2020 bei fast 170 Mrd. Euro, ein europäischer Spitzenwert. Die Branche ist stark durch kleine und mittelständische Unternehmen geprägt, 90 % der Branchenunternehmen haben weniger als 250 Beschäftigte.

Darunter finden sich viele traditionsreiche Familienunternehmen und international erfolgreiche Hersteller deutscher Spezialitäten, die eng mit ihrem Standort verbunden sind. Wichtige Teilbranchen der Ernährungsindustrie sind die Fleisch- und Fleischwarenindustrie, die Milchwirtschaft, die Süß- und Backwarenindustrie, die Getränkeherstellung sowie die

Verarbeitung von Obst- und Gemüse. Dies spiegelt sich auch in der großen Vielfalt an Produkten wider. Für die Bioökonomie ist der Ernährungssektor ein wichtiger Teilbereich – rund 80 % der Agrarproduktion in Deutschland werden von der Ernährungsindustrie zu hochwertigen Lebensmitteln verarbeitet. Zunehmend wichtiger werden Strategien, die Abfallprodukte aus der Ernährungs- und Futtermittelindustrie weiterverwerten.

Mikroorganismen als vielseitige Veredler

Der Griff in die Werkzeugkiste der Natur ist bei Lebensmitteln kein neues Phänomen, schließlich wird zum Beispiel mit der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* seit Jahrtausenden Bier gebraut und Wein her-

gestellt. Die Stoffumwandlung mithilfe von Mikroorganismen wird mikrobielle Fermentation genannt. Milchsäurebakterien lassen Joghurt und weitere Molkeprodukte entstehen. Sie helfen beim Konservieren von Lebensmitteln und Futter, wie beispielsweise bei der Herstellung von Sauerkraut oder Silage. Damit Milch tatsächlich zu Käse wird, muss der Eiweißanteil der Milch gerinnen, wofür das Lab-Enzym zuständig ist. Dieses wurde früher aus Kälbermägen gewonnen. Dank moderner biotechnologischer Verfahren übernehmen heute maßgeschneiderte Mikroorganismen in großen Stahltanks die industrielle Produktion dieser nützlichen Moleküle, die aus der Käseherstellung nicht mehr wegzudenken sind.

Enzyme im Einsatz

Viele Lebensmittel werden in der Ernährungsindustrie mithilfe von Enzymen, die als natürliche Biokatalysatoren wirken, hergestellt. Seit den 1960er Jahren haben sich mikrobielle Verfahren in Fermentern als Standard bei der Herstellung von Enzymen etabliert. Rund 50 unterschiedliche Enzyme sind derzeit in der Ernährungsindustrie im Einsatz. Etwa 20 Unternehmen in Deutschland stellen Enzyme her, darunter sind Chemiekonzerne wie die BASF, aber auch kleine und mittlere Unternehmen. Einige von ihnen werden bei der Technologie-Entwicklung mit Fördermitteln des BMBF und des Bundeswirtschaftsministeriums unterstützt.

Enzyme sind ressourcenschonende Multitalente, die sehr spezifisch zu Werke gehen und meist bei milden Bedingungen (niedrige Temperaturen, neutraler pH-Wert, wässrige Umgebung) aktiv sind. In der Backindustrie sorgen spezielle Enzyme für eine schöne und stabile Brotkruste. Andere Enzyme in Backmischungen helfen dabei, dem Teig Volumen und Farbe zu verleihen. Das inzwischen weit verbreitete Aufbacken von vorproduzierten Teig-Rohlingen wäre ohne solche Enzyme gar nicht möglich.

Manche Rohstoffe lassen sich mithilfe von Enzymen ernährungsphysiologisch aufwerten und effizienter nutzen. So helfen Pektinasen, die pflanzliche Zellwand beim Auspressen von Obst abzubauen und die Saftausbeute zu erhöhen. Zudem bauen sie Trübstoffe in Fruchtsäften ab. Auch die Lactase ist ein wichtiges Enzym in der Ernährungswirtschaft: Sie sorgt für die

Spaltung des Milchzuckers Lactose. Das Enzym wird in Form von Tabletten und Kapseln angeboten, damit Menschen mit Lactoseintoleranz Milchprodukte zu sich nehmen können.

Aromen und Aminosäuren

Enzymatische und mikrobielle Produktionsverfahren sind vielfach die Basis für die Herstellung natürlicher Aromastoffe. Erdbeeraroma wird beispielsweise mittels Pilzen gewonnen. Aus Hefen wird Pfirsicharoma extrahiert. Der erste Lebensmittelzusatzstoff, der in großem Maßstab biotechnologisch hergestellt wurde, ist Zitronensäure. Während diese Substanz früher aus Zitrusfrüchten gewonnen wurde, stammt mittlerweile die gesamte Weltproduktion in Höhe von 2 Mrd. Tonnen aus einem Verfahren, für das der Schimmelpilz *Aspergillus niger* als Zellfabrik genutzt wird. Zitronensäure wird in der Lebensmittelindustrie als Zusatzstoff E 330 für Getränke wie Limonade, Süßig-

Technologien für sichere Lebensmittel



Innovative Technologien können dabei helfen, die Lebensmittelkette nachhaltiger und ressourcenschonender zu gestalten. Hierzu zählen Verfahren, die Lebensmittel lange haltbar machen. Ebenso können neueste Sensorsysteme dazu beitragen, die Produktsicherheit für Verbraucher zu erhöhen. Das BMEL unterstützt eine Reihe von Forschungsprojekten, in denen zum Beispiel optische Methoden zur Überprüfung der Frische und der Qualität von Fleisch entwickelt werden. Das Konsortium FRESH entwickelt innovative Sensor-Verpackungen, die den Frischegrad von Fisch und Fleisch erkennen und den Käuferinnen und Käufern per Farbwechsel anzeigen, ob die verpackten Lebensmittel mikrobiell belastet sind.



In der Extruder-Anlage am Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung in Freising werden Lupinensamen verarbeitet.

keiten, zum Ansäuern von Brot und in der Fleischverarbeitung eingesetzt.

Eine weitere wichtige Gruppe von Nahrungsmittelzusätzen wird ebenfalls biotechnologisch produziert: die Aminosäuren. Aminosäuren bilden die Grundbausteine der Proteine. Manche Aminosäuren sorgen für einen süßen Geschmack, manche duften nach Orangen, andere nach Zitronen. Die Salze der Glutaminsäure (Glutamat) wiederum dienen als Geschmacksverstärker. Glutamat wird mithilfe des Bakteriums *Corynebacterium glutamicum* im Industriemaßstab produziert – weltweit sind es 3 Mio. Tonnen jährlich.

Essenzielle Aminosäuren wie Lysin, Threonin und Methionin, die Organismen nicht selbst herstellen können, haben zudem eine große Bedeutung als Futtermittelzusatz. Weltweit werden inzwischen pro Jahr mehr als 2 Mio. Tonnen Lysin für die Futtermittelindustrie produziert. Zu den großen Herstellern von Aminosäuren für Futtermittel gehört der Spezialchemiekonzern Evonik.

Kalorienarme Süße

Süßungsmittel sind zentraler Bestandteil vieler Lebensmittel. Dabei existiert ein Trend hin zu weniger kalorienreichen Substanzen – auch vor dem Hintergrund von Zivilisationskrankheiten wie Fettleibigkeit oder Diabetes. Gefragt sind Substanzen, die zwar süß

schmecken, aber keinen Haushaltszucker enthalten. Eine solche Alternative sind Stevia-Glycoside aus der Tropenpflanze *Stevia rebaudia*. Sie besitzen annähernd die 200-fache Süßkraft von Haushaltszucker. Derzeit wird versucht, die Herstellung der Stevia-Süßstoffe durch biotechnologische Verfahren zu ermöglichen. Mithilfe von Hefezellen können die einzelnen Komponenten – darunter Stevioside und Rebauside – in hoher Reinheit hergestellt werden. Eine Hürde: Viele Stevia-Glycoside haben einen metallischen, leicht bitteren Beigeschmack. Das Leipziger Biotech-Unternehmen c-Lecta stellt daher ein Enzym her, mit dem sich Rebausid M herstellen lässt, das keinen bitteren Beigeschmack besitzt.

Das Zwingenberger Biotechnologie-Unternehmen Brain Biotech AG hat im Rahmen der Forschungsallianz DOLCE mehr als 60 pflanzenbasierte Moleküle identifiziert, die als Zuckerersatz oder als Verstärker infrage kommen. Den Protein-Süßstoff namens Brazzein, der in einer afrikanischen Beere vorkommt, wird Brain mit dem französischen Unternehmen Roquette im Industriemaßstab produzieren.

Brazzein wurde im Rahmen der von Brain koordinierten strategischen Allianz namens NatLife 2020 erforscht. Das BMBF-kofinanzierte Konsortium mit mehr als 20 Partnern hat Naturstoffe erforscht, die als Geschmackswandler wirken und etwa einen bitteren Geschmack – wie den der oben genannten Stevia-Süßstoffe – maskieren können.

Lebensmittel mit Zusatznutzen

Ein weiterer Trend in der Nahrungsmittelbranche sind funktionelle Lebensmittel. Hierbei handelt es sich um Produkte, die durch biologisch aktive Inhaltsstoffe einen positiven, vor allem vorbeugenden Einfluss auf die Gesundheit haben können. Als funktionelle Zutaten gelten präbiotische Substanzen, zu denen spezielle Ballaststoffe gehören. Sie können sich positiv auf die mikrobielle Lebensgemeinschaft im Darm – das Mikrobiom – auswirken. Probiotische Milchprodukte enthalten lebende Bakterienstämme,

die über die Nahrung eingenommen das Gleichgewicht des Mikrobioms verbessern sollen. Auch bestimmte sekundäre Pflanzenstoffe wie Polyphenole oder Glucosinolate gelten als gesundheitsfördernd. In einem BMBF-geförderten Projekt werden Pflanzenreste aus dem Paprikaanbau genutzt, um sekundäre Pflanzenstoffe zu gewinnen, die als Nahrungsergänzungsmittel dienen können. Das vom BMBF geförderte Unternehmen Jennewein Biotechnologie (gehört seit 2020 zu Chr. Hansen) hat ein biotechnisches Verfahren entwickelt, um humane Milchzucker als Zutat für Babynahrung zu erzeugen.

Nachhaltige Lebensmittel der Zukunft erforschen – der Innovationsraum NewFoodSystems



Der **Innovationsraum NewFoodSystems** bringt Akteure aus der Lebensmittel- und Ernährungsforschung sowie der Lebensmittelwirtschaft entlang der gesamten Wertschöpfungskette zusammen, um Innovationen noch effizienter in die Praxis zu überführen. Der Innovationsraum zählt knapp 60 Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft und wird vom BMBF mit bis zu 20 Mio. Euro gefördert. Koordiniert wird NewFoodSystems vom Max Rubner-Institut (MRI) in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV). Einer der Schwerpunkte von NewFoodSystems liegt auf der systematischen Analyse und der Entwicklung nachhaltiger Proteinzutaten aus höheren Pflanzen, Algen oder Insekten. Dazu wird – koordiniert von der Universität Bonn – eine umfassende Proteindatenbank aufgebaut. Hier werden wichtige Kenngrößen von der Technofunktionalität, über die biologische Wertigkeit bis hin

zur Nachhaltigkeit der Produkte erfasst. Lebensmittelherstellern soll diese Ressource künftig für die Produktentwicklung zur Verfügung stehen. In einem weiteren Schwerpunkt loten Partner im „Zukunftsmuseum“ des Deutschen Museums in Nürnberg die gesellschaftliche Akzeptanz von Ernährungsinnovationen aus. Ein dritter Schwerpunkt des Innovationsraums liegt auf der Erforschung von innovativen Ansätzen für das Indoor-Farming und Vertical-Farming. Weitere Projekte beschäftigen sich mit der Optimierung der Insektenproduktion und ihres Einsatzes in der Aquakultur sowie der ganzheitlichen Bewertung von insektenbasierten Lebensmitteln. Auch Lebensmittelzutaten aus Mikroalgen werden erforscht und entwickelt sowie die Produktion von Gewürz- und Aromapflanzen unter Indoor-Bedingungen erprobt und bewertet.

newfoodsystems.de

Pflanzen als Proteinquellen

Durch das wachsende Gesundheits- und Umweltbewusstsein in der europäischen Bevölkerung ist in den vergangenen Jahren die Nachfrage nach pflanzlichen Alternativen zu Fleisch erheblich gestiegen. Die Hersteller von Lebensmitteln reagieren auf den Wunsch vieler Verbraucherinnen und Verbraucher nach nachhaltigeren Lebensmitteln. Vegetarische und vegane Alternativen zu Wurst und Fleisch wie auch Milchprodukten liegen im Trend und haben mittlerweile die Mitte der Gesellschaft erreicht. Kein anderer Bereich im Lebensmittelsektor wächst derzeit so dynamisch wie der für Ersatzprodukte für Lebensmittel tierischen Ursprungs.

Tradition als alternative Proteinquellen haben pflanzliche Produkte aus Soja und Weizen. Immer stärker in den Fokus rücken Proteinpflanzen aus heimischem Anbau. Zu den wegen ihrer prächtigen Blütenstände auffälligsten Eiweißpflanzen hierzulande zählt die Lupine. Ihr Samen hat einen Proteingehalt von etwa 35 %. Der hohe Anteil an Bitterstoffen verhinderte lange Zeit einen Einsatz in der Lebensmittelindustrie. Mit der Blauen Süßlupine (*Lupinus angustifolius*) fanden Forschende jedoch eine Sorte, die weniger der bitteren Alkaloide enthält und gegen viele Pflanzenkrankheiten resistent ist. Zudem ist die Hülsenfrucht im Anbau anspruchslos und gedeiht besonders in Norddeutschland sehr gut. Über Knöllchenbakterien an ihren Wurzeln bindet die Süßlupine Stickstoff und düngt damit den Boden.

Das Start-up Prolupin GmbH, eine Ausgründung des Fraunhofer-Instituts für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV in Freising, hat ein Verfahren entwi-

ckelt, mit dem sich weitgehend geschmacksneutrales Lupinenprotein aus den Samen extrahieren lässt. 2014 gab es für diese Innovation den Deutschen Zukunftspreis des Bundespräsidenten. Prolupin mit Sitz in Mecklenburg-Vorpommern gewinnt neben dem Lupinen-Protein auch Fasern, Öl und Schalen, die sich ebenfalls als Zusätze für die Lebensmittelproduktion eignen. Das Unternehmen produziert und vermarktet zudem eigene Produkte wie Speiseeis, Desserts und Milchersatzgetränke.

Das BMEL unterstützt die Entwicklung von pflanzenbasierten Proteinalternativen durch Forschungsförderung im Rahmen der Eiweißpflanzenstrategie. In einem Verbundprojekt wollen Forschende zum Beispiel das Potenzial von bitterstoffreichen Lupinensorten als Proteinquellen erschließen. Ihr hoher Gehalt an Alkaloiden macht die Gewächse robuster gegen Schädlinge und sie sind leichter zu kultivieren als Süßlupinen. Die Bitterstoffe sollen mit moderner Verfahrenstechnik entfernt werden.

Andere BMEL-Forschungsprojekte zielen darauf ab, heimische Körnerleguminosen wie die Erbse für die Nutzung in innovativen Lebensmitteln zu optimieren. So schwankt die Qualität der Stärke in Erbsen sehr stark. Zweihundert Erbsen-Varietäten werden im Rahmen des Forschungsvorhabens angebaut und auf ihre Stärke-Eigenschaften untersucht.

Insekten für Lebensmittel und Futter

Produkte auf Basis von Insekten-Proteinen sind im Lebensmittelsektor noch eine Nische (vgl. Kap. Die Rohstoffquellen der Bioökonomie). In Deutschland gibt



Lupinensamen sind besonders reich an Proteinen. Am Fraunhofer IVV wird ihr Einsatz in Fleischersatzprodukten wie Burger-Buletten erprobt.

es bereits einige Start-ups, die Insektenprodukte vermarkten. Darunter ist Bugfoundation, das mittlerweile zum Unternehmen Kupfer Innovative Food gehört. Es bietet Insektenburger an, deren Bulette zu hohen Anteilen aus gemahlenden Buffalo-Würmern besteht. Das Kölner Start-up SWARM Protein vermarktete Fitnessriegel auf der Basis von Insektenprotein aus Grillen. Inzwischen hat das Unternehmen seinen Fokus auf Tiernahrung verlagert und produziert Hundefutter. Das BMBF unterstützt mehrere Projekte, die das Potenzial von Insektenprodukten für Lebensmittel und Tierfutter ausloten.

Neben dem Innovationsraum NewFoodSystems (vgl. Kasten S. 65) beschäftigen sich auch einige Konsortien der Förderinitiative „Agrarsysteme der Zukunft“ damit. Im Verbundprojekt food4future wird beispielsweise die Aufzucht von Grillen für die urbane Lebensmittelproduktion erprobt. Der Verbund CUBES Circle verfolgt die Vision einer intelligenten Vernetzung von verschiedenen agrarischen Produktionssystemen für Pflanzen, Insekten und Fische in geschlossenen Energie- und Stoffkreisläufen. Die Larven der Soldatenfliege, die ideale Verwerter von Speiseresten oder anderen Nebenprodukten der Lebensmittelindustrie sind, werden hier als Futter für Silberkarpfen oder Tilapien eingesetzt.

Upcycling: Reststoffe verwerten

Die Verwertung von Reststoffen aus der Nahrungsmittelindustrie im Sinne einer biobasierten Kreislaufwirtschaft ist Thema zahlreicher Projekte der aktuellen Bioökonomie-Forschung. Für Unternehmen der Ernährungswirtschaft bietet das sogenannte Upcycling die attraktive Möglichkeit, eine Vielzahl neuer Produkte mit Mehrwert aus diesen Nebenströmen zu gewinnen.

Ein Beispiel dafür liefert das vom BMBF-geförderte Konsortium „CocoaFruit“, das vom Fraunhofer-Institut IVV in Freising koordiniert wird (vgl. Foto S. 61). Es baut auf einer Kooperation mit Partnern aus Indonesien und deutschen Unternehmen auf. Ziel ist die ganzheitliche Nutzung der Kakaofrucht zur Entwicklung innovativer Lebensmittel und Zutaten. Die für die Schokoladenproduktion genutzten Kakaobohnen machen nur 10 % der Kakaofrucht aus, 90 % entfallen auf die bislang kaum genutzten Schalen und die Pulpe.

Die Kakaofruchtschale soll als Substrat für die Kultivierung von Pilzen Verwendung finden, zum Beispiel für vegane Wurstersatzprodukte. Die Pulpe wird als Rohstoff zur Entwicklung von Fruchtzubereitungen und Getränken eingesetzt. Weitere Konzepte im Bereich Upcycling umfassen beispielsweise alkoholische Spirituosen aus Molke, Snacks aus Fruchtüberschüssen oder Bier aus aussortiertem Brot.

Fleisch und Käseprodukte aus dem Labor



Die industrielle Fleischproduktion verbraucht enorme Ressourcen und belastet Klima und Umwelt. Hinzu kommen ethische Bedenken und die Sorge der Konsumenten um das Tierwohl. Innovative Zellkulturtechnik eröffnet neue Möglichkeiten für eine nachhaltigere Lebensmittelproduktion. Immer mehr Forschende und Unternehmen beschäftigen sich mit der Herstellung von Fleisch und Fisch aus Zellkultur (cultured meat). Um Fleisch zu züchten, werden in der Regel Muskelstammzellen oder andere vermehrungsfähige Zellen im Bioreaktor kultiviert. Zu den innovativen Akteuren in Deutschland zählen das Rostocker Start-up Innocent Meat oder das Berliner Start-up Bluu Seafood. Mit veganem Mozzarella und anderen Milchprodukten möchte wiederum das Berliner Start-up Formo den Markt erobern (Foto). Formo hat ein biotechnologisches Verfahren entwickelt, um die für Geschmack und Textur charakteristischen Moleküle Casein und Molkenprotein im Labor mithilfe von Hefen mikrobiell zu erzeugen. Daraus stellt das Start-up auf Basis pflanzlicher Fette verschiedene Käseersatzprodukte her.



Pharma

Schon seit Jahrtausenden helfen Heilkräuter, Krankheiten zu lindern. Immer häufiger kommen heute biotechnologische Verfahren bei der Produktion von Medikamenten zum Einsatz. Biopharmazeutika, zu denen Wirkstoffe wie Antikörper, Enzyme oder Impfstoffe zählen, machen rund ein Drittel des Pharmamarktes aus – mit stark steigender Tendenz.



Mit Blick auf die Herstellung von Arzneimitteln greifen Pharmaunternehmen zunehmend auf biologisches Wissen zurück. Zwar bilden chemisch synthetisierte Wirkstoffe nach wie vor den größten Anteil im deutschen Arzneimittelmarkt, die sogenannten Biopharmazeutika rücken jedoch zunehmend auf. Diese Medikamente sind Biomoleküle, die so groß sind, dass sie chemisch nicht oder nur sehr aufwändig herzustellen wären. Für ihre Herstellung bedient man sich der Methoden der modernen Biotechnologie: Lebende Mikroorganismen oder Zellen höherer Lebewesen lassen sich mithilfe molekulargenetischer Verfahren zu Mini-Fabriken für Medikamente umfunktionieren.

Laut Branchenreport der Boston Consulting Group und des vfa bio waren Ende 2020 in Deutschland insgesamt 339 Biopharmazeutika zugelassen. Der

Marktanteil dieser biotechnologischen Arzneimittel am Gesamt-Pharmamarkt stieg damit hierzulande auf fast 31 %. Insgesamt wurden im Jahr 2020 14,6 Mrd. Euro mit Biopharmazeutika umgesetzt: etwa Antikörper gegen Krebs oder Autoimmunkrankheiten wie Rheuma oder Multiple Sklerose, Hormone wie Insulin zur Behandlung von Diabetes oder Enzyme gegen Stoffwechselerkrankungen.

Biotech-Arzneien auf dem Vormarsch

Gentechnisch hergestellte Medikamente für Menschen und Tiere finden breite gesellschaftliche Akzeptanz. Allein 2020 wurden 25 weitere Biopharmazeutika neu zugelassen. Neben dem einstigen Standort von Hoechst in Frankfurt, der inzwischen

zum französischen Unternehmen Sanofi gehört, hat sich auch der Schweizer Pharmakonzern Roche mit seinem Standort in Penzberg mit umfassenden Produktionskapazitäten für Biotech-Medikamente etabliert. Hinzukommen deutsche Unternehmen mit signifikanten Produktionsanlagen: Bayer in Leverkusen, Merck in Darmstadt sowie Boehringer Ingelheim in Biberach. Des Weiteren hat sich eine Reihe von kleineren und mittleren Biotechnologie-Unternehmen darauf spezialisiert, als Dienstleister die biobasierte Produktion zu übernehmen oder bei der Entwicklung und marktgerechten Umsetzung entsprechender Verfahren zu helfen. Im Jahr 2020 wurden deutschlandweit die Produktionskapazitäten für Biopharmazeutika auf ein Gesamtvolumen von 380.000 Litern taxiert. Deutschland liegt weltweit auf dem fünften Rang hinter den USA, Südkorea, Irland und der Schweiz. In Sachen biotechnologische Produktion von pharmazeutischen Wirkstoffen zählt Deutschland international zur Spitze.

Antikörper, Peptide, Impfstoffe

Unter den Biopharmazeutika sind insbesondere die Antikörper in den Fokus gerückt. Diese komplexen Proteinmoleküle gelten als die Spür- und Lenkwaffen des menschlichen Immunsystems, weil jeder von ihnen sich nur an ein ganz bestimmtes Molekül heftet – das Oberflächenprotein eines Virus beispielsweise oder das Toxin eines Bakteriums. Durch die Bindung markieren die Antikörper ihr Zielmolekül für das Immunsystem und bereiten dessen Abbau vor. Antikörper werden mithilfe von Zellkulturen hergestellt. Ende 2020 waren 107 Antikörper-basierte Medikamente zugelassen, das sind 32 % aller zugelassenen Biopharmazeutika. Vor allem die Behandlung von Krebs oder Autoimmunerkrankheiten hat sich mit Antikörpern signifikant verbessert. 10 Mrd. Euro setzte die Industrie in Deutschland mit Antikörpern um.

Peptide sind kleine Eiweißmoleküle, die aus bis zu 100 Aminosäuren zusammengesetzt sind. In der Pharmaindustrie und der Kosmetik sind sie als Wirkstoffe oder bioaktive Inhaltsstoffe für Cremes und Salben gefragt. Das Düsseldorfer Unternehmen Numaferm hat ein biotechnisches Verfahren entwickelt, um gewünschte Peptide in großer Menge mithilfe von Mikroorganismen herzustellen. Hierbei wurde das Start-up mehrfach vom BMBF unterstützt.

Auch andere Medikamentenklassen, etwa Antibiotika und Impfstoffe, werden heute in der Regel auf biotechnologischem Wege hergestellt. In Deutschland werden insbesondere Impfstoffe gegen Grippe, Frühsommer-Hirnhautentzündung (FSME), Diphtherie, Keuchhusten, Tollwut, Ebola und seit 2020 auch COVID-19 produziert.

Die Corona-Pandemie hat einen Boom der Impfstoff-Forschung und -Produktion bewirkt. In Marburg hat das Mainzer Unternehmen BioNTech eine innovative Anlage zur Produktion von mRNA-Impfstoffen gegen COVID-19 in Betrieb genommen. Die mRNA-Impfstoffe werden in einem zellfreien Produktionsverfahren gewonnen. Das heißt, hier wird nicht mit lebenden Zellen produziert. Stattdessen wird die Synthese der Biomoleküle mit allen dafür notwendigen Komponenten in einem Reaktionsgefäß durchgeführt.

Das digitalisierte Biotech-Labor



Das Verbundprojekt DigInBio will die zukünftigen Möglichkeiten der Digitalisierung, Automatisierung und Miniaturisierung für die industrielle Biotechnologie aufzeigen und erschließen. Die Partner arbeiten in dem vom BMBF geförderten Projekt in drei digitalisierten Bioprozesslaboren und sind über ein zentrales Datenmanagement miteinander vernetzt. Im Fokus stehen unterschiedliche Schritte der Bioprozess-Entwicklung. Von intelligenten Software-Komponenten bis zur wissensbasierten Versuchsplanung, zur Ablaufsteuerung von parallel laufenden Laborexperimenten in Echtzeit bis zur Online-Datenauswertung, um in Zukunft die Bioprozessentwicklung drastisch verkürzen zu können. An DigInBio sind das Forschungszentrum Jülich, die TU München und Leibniz-Universität Hannover beteiligt.



Die Biotechnologiefirma Eleva stellt im Moos-Bioreaktor Biopharmazeutika her.

Intelligente Bioprozesse

Damit all diese Medikamente effizient und in den erforderlichen Mengen produziert werden können, ist eine intelligente Bioprozesstechnik gefragt (vgl. *Kap. Maschinenbau*). Mit seiner bioverfahrenstechnischen Expertise ist Deutschland hier weltweit federführend. Mit Unterstützung des BMBF wird daran gearbeitet, aktuelle Herausforderungen in diesem Feld auch künftig zu meistern. Dazu gehört unter anderem eine optimierte Prozessführung auf der Basis intelligenter Sensortechnik. Im Rahmen der strategischen Allianz „Wissensbasierte Prozessintelligenz“ haben rund 20 Partner eine Sensor- und Softwareplattform entwickelt, die neuartige Messprinzipien mit moderner Datenauswertung kombiniert. Aber auch die stete Verbesserung der Aufreinigung ist bei biotechnologisch hergestellten Medikamenten eine zentrale Frage, weshalb das BMBF hier gezielt die Weiterentwicklung unterstützt hat.

Im Fokus aktueller Forschungsanstrengungen stehen zudem geeignete Produktionsorganismen. Während dies in den Anfängen der Biotechnologie zunächst Bakterien waren – wie beim Insulin – sind inzwischen überwiegend Säugetierzellen im Einsatz, wie CHO-Zellen, die ursprünglich aus Hamstern stammen, oder

menschliche Zelllinien. Gegenüber Bakterien sind diese Zellen in der Lage, bestimmte, für die Wirkung von Medikamenten wichtige Moleküle herzustellen. Im Rahmen einer BMBF-Fördermaßnahme werden neue mikrobielle Biofabriken für die industrielle Bioökonomie gesucht, darunter viele für pharmazeutische Wirkstoffe wie Terpene oder Isoprenoide.

Grüne Pharmaproduzenten

Inzwischen werden aber auch unkonventionelle Organismen als biologische Arzneihersteller genutzt. So sind zum Beispiel Pflanzen als Produzenten innovativer Wirkstoffe ins Blickfeld gerückt. Bereits im Jahr 2012 hat die US-Zulassungsbehörde FDA ein in Karottenzellen produziertes Enzym zur Behandlung der Gaucher-Krankheit zugelassen. Auch in Deutschland wird an dem sogenannten Molecular Farming als Ansatz der Pflanzenbiotechnologie geforscht.

Wissenschaftlern des Fraunhofer-Instituts für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie in Aachen verwenden Tabakpflanzen als grüne Pharmafabriken. Sie haben eine automatisierte Anlage aufgebaut: Von der Aussaat, über die Kultivierung in einem Hochregalsystem mit kontrollierbarer Belichtung, Bewässe-

rung und Düngung, bis hin zur Ernte und biotechnologischen Produktion erfolgen hier fast alle Schritte automatisiert. Basierend auf einem Verfahren des Hallenser Biotech-Unternehmens Icon Genetics soll mithilfe der Pflanzen ein neuer Krebsimpfstoff gegen Lymphdrüsenkrebs unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus hergestellt werden. Ausgehend von Forschungsarbeiten, die von Pflanzenforschenden an der Universität Freiburg erfolgt sind, arbeitet die Biotech-Firma Eleva (ehemals Greenovation) wiederum an einem Produktionsverfahren für Medikamente auf der Basis des Kleinen Blasenmützenmooses *Physcomitrium patens*.

Es gibt Pflanzen, deren Inhaltsstoffe als medizinische Wirkstoffe von Interesse sind. So wird die Substanz Paclitaxel, die in der Pazifischen Eibe (*Taxus brevifolia*) vorkommt, als Krebsmedikament eingesetzt. Aufgrund der geringen Verbreitung der Pflanze und des niedrigen Wirkstoffgehalts, könnte der weltweite Bedarf an Paclitaxel auf herkömmlichem Wege allein nicht gedeckt werden.

Das Mittel wurde daher seit langem zusätzlich teilsynthetisch aus bestimmten pflanzlichen Wirkstoffvorstufen hergestellt. Im Jahr 2002 wurde vom britischen Pharmakonzern Bristol-Myers Squibb ein Verfahren entwickelt, bei dem isolierte Eibenzellen auf Nährmedien in Fermentern kultiviert wurden, um den Wirkstoff zu gewinnen. Die biotechnologische Herstellung erfolgt im schleswig-holsteinischen Ahrensburg bei der Phyton Biotech GmbH, die eine der weltweit größten pflanzenzellbasierten Fermenterkapazitäten aufweisen kann.

Tradition der Arzneipflanzen pflegen

Neben den modernen, biotechnisch erzeugten Pharmazeutika spielen auch heute noch traditionelle Arzneipflanzen eine wichtige Rolle. Der Anbau von heilenden Kräutern hat in Deutschland eine lange Geschichte. Insgesamt 440 Arzneipflanzen sind in Deutschland heimisch. Etwa 75 von ihnen werden hierzulande auf einer Fläche von rund 12.000 Hektar erwerbsmäßig angebaut, vor allem in Thüringen, Bayern, Hessen und Niedersachsen. Gemeinsam decken diese Länder mehr als 70 % des heimischen Arzneipflanzenanbaus ab. Den größten Anteil an der Gesamt-Anbaumenge hat die Kamille (mehr als 1.000

Hektar), gefolgt von Pflanzen wie Lein, Mariendistel, Pfefferminze und Sanddorn (jeweils 500 bis 1.000 Hektar). Der heimische Anbau stellt jedoch nur eine Nische dar: Etwa 85 % der verarbeiteten Arzneipflanzen werden importiert.

Vor allem Pflanzen, die nur in geringen Mengen eingesetzt werden oder die sich hierzulande nicht anbauen lassen, werden im Rahmen von Wildsammlungen an ihren natürlichen Standorten geerntet. Im Vergleich zum kommerziellen Landbau schwanken die Qualität und die quantitative Zusammensetzung ihrer Inhaltsstoffe. Daher wird versucht, auch weitere, bisher nicht angebaute Pflanzen in Kultur zu nehmen. Leicht ist das jedoch nicht. So dauert es bei Kräutern mindestens fünf Jahre, bei Gehölzen teils noch länger, um die Pflanzen für den Erwerbsanbau fit zu machen. Daher unterstützt das BMEL entsprechende Forschungsarbeiten (vgl. Kasten S. 71).

Anbau von Arzneipflanzen fördern



Am Julius Kühn-Institut in Quedlinburg unterstützt das BMEL eine Nachwuchsforschungsgruppe, die die Arzneipflanzenarten Johanniskraut (Foto) und Anis erforscht und für den Anbau erschließt. Die Forschenden wollen nicht nur die Wirtschaftlichkeit des Anbaus verbessern, sondern auch Fragen zur Phytopathologie und zum Pflanzenschutz beantworten. Die Trocknung ist der größte Kostenfaktor in der Arzneipflanzenproduktion. In einem BMEL-Projekt entwickeln Forschende aus Hohenheim und Potsdam einen praxistauglichen, energieeffizienten und kostengünstigen Trockner für Arzneipflanzen, der sich für den Einsatz in Klein- und Großbetrieben eignet.



Konsumgüter

Ob Kosmetik, Spül- und Waschmittel oder Haushaltsgeräte – bei der Herstellung von Produkten des täglichen Bedarfs kommen schon heute vielfältige biobasierte Verfahren zum Einsatz. Sie ermöglichen innovative Produkte mit neuen Eigenschaften für Verbraucherinnen und Verbraucher. Ein Trendmarkt sind zudem biobasierte Verpackungslösungen.



Jedes Jahr gibt ein deutscher Haushalt laut Statistischem Bundesamt etwa 31.000 Euro für den privaten Konsum aus. Neben Bekleidung und Lebensmitteln zählen Körper- und Pflegemittel zu den umsatzstärksten Bereichen. In Deutschland wurden im Jahr 2020 mit diesen Produkten rund 14 Mrd. Euro erwirtschaftet. Im Bereich Wasch- und Reinigungsmittel wurden rund 4,6 Mrd. Euro ausgegeben. In der Konsumgüterindustrie hat die Bioökonomie längst ihren Weg in den Alltag gefunden. In vielen Bereichen werden natürliche Rohstoffe oder biobasierte Verfahren im industriellen Herstellungsprozess genutzt.

Im Bereich der Wasch-, Pflege- und Reinigungsmittel ist der Einsatz biobasierter Verfahren schon heute vergleichsweise hoch. Mehr als ein Drittel der hierfür in Deutschland im Jahr 2019 eingesetzten 525.000

Tonnen Inhaltsstoffe werden vollständig oder teilweise biobasiert hergestellt (IKW Nachhaltigkeitsbericht). Dazu gehören Tenside, alkoholische Lösungsmittel, Enzyme oder Zitronensäure. Letztere wird schon heute vollständig biotechnologisch von Schimmelpilzen auf Basis von Melasse produziert – einem Nebenprodukt aus der Zuckerrübenverarbeitung.

Tenside aus Pflanzenölen und Mikroben

Tenside sind als waschaktive Substanzen unverzichtbarer Bestandteil von Putz-, Wasch- und Reinigungsmitteln. Sie werden entweder auf Basis petrochemischer Rohstoffe oder auf Basis nachwachsender Rohstoffe hergestellt. Misch tenside bestehen sowohl aus petrochemischen als auch biobasierten Rohstoff-

fen (vgl. Grafik S. 74). Als nachwachsende Rohstoffe werden hier vor allem Pflanzenöle und tierische Fette genutzt. Zur Tensid-Produktion mittels chemischer Synthese werden hauptsächlich Palmkern- aber auch Kokosöl eingesetzt. Der Kokosölanteil zur Herstellung von Tensiden in Wasch-, Pflege- und Reinigungsmitteln in Deutschland wurde laut Forum Waschen im Jahr 2017 auf 14.000 Tonnen geschätzt. Der Anteil von Palmkernöl wurde vom Forum Nachhaltiges Palmöl im Jahr 2019 mit 75.000 Tonnen angegeben. Um den Prozess umweltfreundlicher zu gestalten, setzen hierische Hersteller zunehmend auf europäische Ölpflanzen wie Raps, Oliven, Lein und Sonnenblume, oder sie nutzen tropische Öle, die nachhaltig produziert wurden.

Biotenside sind Tensidmoleküle, die in einem biotechnologischen Prozess von Mikroorganismen oder mithilfe von Enzymen hergestellt werden. Biotensiden wird ein großes Marktpotenzial zugemessen, derzeit

sind aber nur vereinzelt Produkte auf dem Markt. Zu den Vorreitern bei der Nutzung von Rhamnolipiden, die Bakterien natürlicherweise produzieren, gehört der Spezialchemie-Konzern Evonik. In Karlsruhe gründet das Start-up Biotensidion sein Geschäftsmodell auf die Entwicklung von Biotensiden. Die biotechnologische Herstellung von Biotensiden aus heimischen nachwachsenden Rohstoffen möchte die strategische Allianz „Funktionsoptimierte Biotenside“ forcieren. Das BMBF fördert diese Allianz seit 2018 im Rahmen der Innovationsinitiative Industrielle Biotechnologie über einen Zeitraum von sechs Jahren mit 6,4 Mio. Euro. Forschungseinrichtungen und Unternehmen haben sich zusammengeschlossen, um die gesamte Wertschöpfungskette der Biotensid-Herstellung abzudecken.

Das Konsortium wird von dem Reinigungsmittel- und Kosmetikhersteller Dalli-Werke koordiniert. Zu den Partnern zählen unter anderem BASF, Henkel, Festo und Analyticon Discovery. Ziel der Allianz ist, ein möglichst großes Portfolio verschiedener Biotenside für viele Anwendungsbereiche zu entdecken (etwa Wasch- und Reinigungsmittel, Kosmetik, Pflanzenschutz und Lebensmittel) sowie die Produktivität und Skalierbarkeit der Prozesse auszubauen.

Mikroalgen-Extrakte für die Kosmetikindustrie



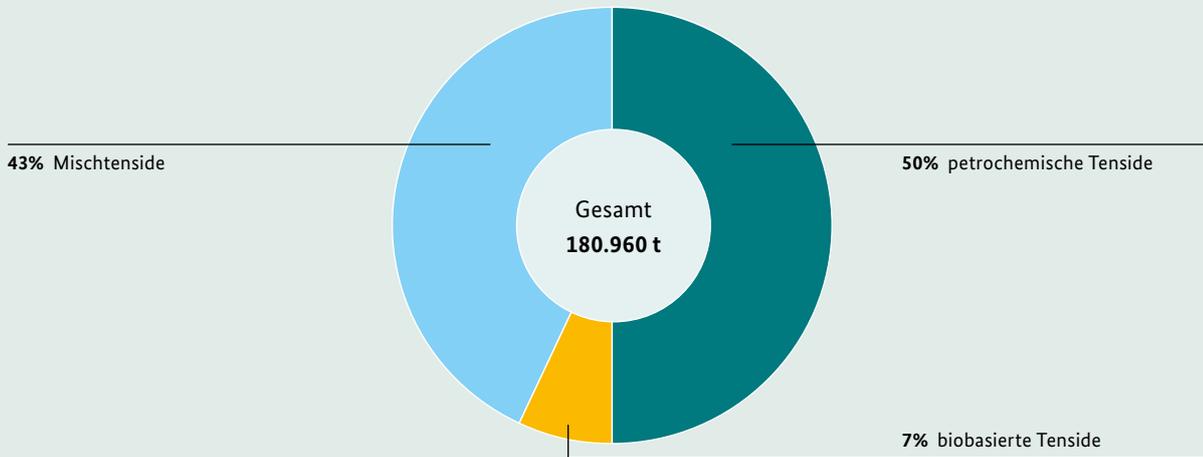
In Mikroalgen stecken zahlreiche natürliche Inhaltsstoffe, die für die Kosmetikbranche interessant sind. Sie lassen sich leicht in Bioreaktoren vermehren, die mit Licht bestrahlt und mit Kohlendioxid begast werden. Bislang sind Mikroalgen als industrielle Produktionssysteme kaum etabliert. Das gilt auch für die Grünalge *Tetrademus wisconsinensis*. In dem Projekt TEWICOS – gefördert vom BMBF im Rahmen der Mittelstandsförderung KMU-innovativ – wurde die Alge als Produzent für das Carotinoid Canthaxanthin erschlossen werden. Dieses Antioxidans bindet freie Radikale und verringert so Zellschädigungen infolge der UV-Strahlung, die Teil der Hautalterung sind. Die Moleküle aus den Mikroalgenextrakten sollen in Cosmeceuticals, also Wirkkosmetika, eingesetzt werden. Beteiligt ist ein Forschungsteam der Hochschule Anhalt und die Salata AG in Potsdam.

Enzyme als effektive Reinigungshelfer

Neben biobasierten Tensiden sind mikrobiell hergestellte Enzyme wesentliche Inhaltsstoffe von Wasch- und Reinigungsmitteln. Auf dieses Segment der Konsumgüterindustrie entfällt der größte Marktanteil (40%) industrieller Enzyme. Der langjährige Einsatz dieser Biokatalysatoren in Waschmitteln hat einen entscheidenden Beitrag dazu geleistet, dass der früher extrem energie- und wasserintensive Waschvorgang inzwischen deutlich umweltschonender abläuft. Enzyme sind vielfach bei milden Temperaturen aktiv. Ihnen ist es damit zu verdanken, dass die durchschnittliche Waschttemperatur auf aktuell 46° C gesunken ist. Im Jahr 1972 lag diese noch bei 63° C.

Dagegen machen 90° C-Wäschen heute nur noch 7 % aller Waschvorgänge aus, vor mehr als 40 Jahren waren es noch etwa 40 %. Zugleich hat sich die Effizienz der Waschmittel durch die Biokatalysatoren erhöht: Waren früher noch 220 Gramm für eine 5-Kilogramm-Wäsche notwendig, reichen heute 75 Gramm. Nach Angaben

Anteil verschiedener Tensidgruppen in Wasch-, Pflege- und Reinigungsmitteln in Deutschland 2017



Quelle: FNR (2020) nach T+I Consulting (2017)

des Industrieverbandes Körperpflege und Waschmittel e.V. wurden im Jahr 2019 rund 7.100 Tonnen Enzyme als Inhaltsstoffe für Wasch- und Reinigungsmittel eingesetzt, 1994 waren es nur die Hälfte.

Bioaktive Moleküle für Kosmetik

Bei Körperpflegeprodukten greifen die Hersteller bereits seit längerer Zeit auf spezielle bioaktive Inhaltsstoffe zurück – und bedienen damit eine wachsende Nachfrage nach natürlicher Kosmetik. Laut Statistischem Bundesamt legen 34% der Deutschen großen Wert darauf, dass Körperpflegeprodukte keine chemischen Zusätze enthalten und auf natürlicher Basis produziert werden. Immer mehr Kosmetikproduzenten gehen auf die Wünsche ihrer Kundschaft ein, indem sie Roh- und Wirkstoffe einsetzen, die aus der Natur stammen, nachhaltig angebaut und geerntet werden können.

In der biotechnologischen Produktion werden Mikroorganismen oder Zellen als lebende Biofabriken eingesetzt. Zu den bioaktiven Inhaltsstoffen, die biotechnologisch entstehen, gehören Peptide, Lipide, Vitamine und Zucker oder Enzyme. Das Zwingenberger Biotechnologie-Unternehmen Brain verwendet Terpene aus Orangenschalen, um daraus mithilfe von Bakterien das Konservierungsmittel Perillasäure zu produzieren. Der Duft- und Aroma-Hersteller Sym-

rise stellte 2018 ein Pentylenglykol vor, das aus dem Nebenprodukt Bagasse der Zuckerrohrverarbeitung hervorgeht. Entwickelt haben die Holzmindener die grüne Alternative zusammen mit dem Leibniz-Institut für Katalyse an der Universität Rostock. Eine weitere vom BMBF geförderte strategische Allianz ist im Bereich biobasierte Kosmetik aktiv: In der strategischen Allianz „GOBI – Good Bacteria and Bioactives in Industry“ werden Forschungserkenntnisse zum gesundheitsförderlichen Einfluss von lebenden Mikroorganismen gebündelt und für die industrielle Anwendung erschlossen. Koordiniert wird der Verbund vom Biotechnologie-Unternehmen Novozymes Berlin (ehemals Organobalance).

Biobasierte Werkstoffe für Produkte

Kunststoffe sind zentrale Werkstoffe für die Konsumgüterindustrie. Doch Plastikmüllberge und Mikroplastik in der Nahrungskette haben zur Einsicht geführt, dass Plastikprodukte und -verpackungen inzwischen eine globale Herausforderung darstellen. Immer interessanter werden daher biobasierte und biologisch abbaubare Alternativen (vgl. Kap. Chemie). Das gilt für Hersteller von Elektrogeräten ebenso wie für Büro- oder Sportartikelhersteller. Auf Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen hat sich zum Beispiel die Fraunhofer-Ausgründung Tecnaro spezialisiert. Das Unternehmen hat – unter anderem unterstützt

vom BMBF – den thermoplastischen Biokunststoff Arboform entwickelt. Aus dem „flüssigen Holz“ lässt sich eine breite Produktvielfalt herstellen, darunter sind Spielfiguren oder Aufbewahrungsboxen. Gefördert vom BMEL hat das Unternehmen FKUR Kunststoff gemeinsam mit mehreren Forschungseinrichtungen neue biobasierte Hart-Weich-Verbundmaterialien entwickelt, die im Mehrkomponentenspritzguss zu Büro-, Hygiene- und Sportartikeln sowie Griffen und Gehäusen verarbeitet werden können. Die Hartphase besteht dabei aus Celluloseacetat (CA) und Polymilchsäure (Polylactid – PLA). Für die Weichphase wurden thermoplastische Elastomere (Bio-TPE) und biobasierter Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (Bio-EPDM) verwendet.

Innovative Verpackungen

Neue Kunststoff-Richtlinien in der EU und entsprechende Gesetze auf nationaler Ebene, aber auch die kritischere Sicht der Konsumentinnen und Konsumenten führen dazu, dass die Unternehmen ihre Verpackungsmaterialien hinsichtlich Recycling, Wiederverwertbarkeit und Nachhaltigkeit optimieren. Gerade im Lebensmittel- oder im Pharmabereich sind die Anforderungen an Verpackungen sehr hoch: Sie müssen nicht nur stabil sein, sondern auch die Ware vor Schmutz, Feuchtigkeit und mikrobiellen Kontaminationen schützen und zudem am besten auch recycelbar sein. Um diese Anforderungen auch mit biobasierten Kunststoffen umsetzen zu können, fördert das BMEL mehrere anwendungsnahe Forschungsansätze. Im Projekt BioPrima entwickelt

die Südzucker AG mit Partnern eine stärkebasierte Schrumpffolie für Gefrieranwendungen. Ein biobasiertes und recyclinggerechtes Verpackungskonzept für sensible Lebensmittel, die unter einer Schutzgasatmosphäre verpackt werden, sucht das Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV) zusammen mit der Hochschule Albstadt-Sigmaringen. Das Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung ISC entwickelt mit Industriepartnern biobasierte Hochleistungsbarrierefolien, die zu 95 bis 100% biobasiert und recyclingfähig sind.

In der Industrie werden derzeit papierbasierte Verpackungen stark nachgefragt. Auch zwei Projekte der BMBF-Fördermaßnahme „Ideenwettbewerb: Neue Produkte für die Bioökonomie“ entwickeln hierzu innovative Lösungen. Die „BioBox“ ist eine gewickelte Verpackung, die ganzheitlich aus Papier besteht. Die notwendigen Barrieren zum Schutz des Produkts werden durch ein spezielles und innovatives Papier realisiert. In einem anderen Ideenwettbewerb-Projekt werden thermoformbare Papierwerkstoffe erprobt, um damit dreidimensionale Strukturen zu fertigen. Als Alternative zum Holz als Rohstoff haben einige Unternehmen Fasern aus Gras für die Papierherstellung erschlossen. Auch Agrarreststoffe kommen als Faserquelle infrage. Das Cleantech-Start-up BIO-LUTIONS aus Hamburg und die Zelfo Technology GmbH gewinnen in einem mechanischen Verfahren aus Weizen-, Rapsstroh, Schilf oder Gemüsestängeln einen Faserbrei, der sich in vielfältige Formen pressen lässt, etwa für Verpackungen und Essgeschirr. Derzeit wird im brandenburgischen Schwedt eine Produktionsstätte errichtet.



Aus Agrarresten wie Stroh oder Gemüsestängeln stellt das Unternehmen BIO-LUTIONS Verpackungen her.



Textilien

Für die Textilindustrie ist der Einsatz nachwachsender Rohstoffe alltäglich. Ob Pflanzenfasern wie Leinen oder Baumwolle, ob tierische Produkte wie Wolle, Seide oder Leder. Auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit sind biobasierte Innovationen zunehmend gefragt. Biotech-Seide, veganes Leder und pflanzliche Gerb- und Farbstoffe sind Beispiele dafür.



Bei der Herstellung von Kleidern kommen seit Jahrtausenden Naturprodukte zum Einsatz. Schon die alten Ägypter und Römer nutzten Flachs, um aus seinen Fasern Leinengewebe zu produzieren. Erst in den vergangenen Jahrzehnten haben sich preiswerte erdölbasierte Kunstfasern durchgesetzt. Weltweit wurden im Jahr 2020 nach Zahlen der Industrievereinigung Chemiefaser e.V. rund 108 Mio. Tonnen Textilfasern produziert. Naturfasern machen einen Anteil von 25 % aus, bei 75 % der weltweiten Produktion handelt es sich um synthetische Chemiefasern. Baumwolle ist mit Abstand die am häufigsten eingesetzte Naturfaser für Heim- und Bekleidungstextilien. Die gesamte Pflanze lässt sich verwenden – von den Samenfasern für Textilien über das Baumwoll-Öl für Kosmetik bis hin zur Nutzung der Pflanzenreste auf dem Feld als Gründünger.

Im Gegensatz zu anderen Textilpflanzen wie Flachs, Hanf oder Jute werden bei Baumwolle auch die Pflanzenstängel weiterverarbeitet. Die weltweite Produktion dieser Bastfasern fällt jedoch mit jeweils etwa 2 Mio. Tonnen pro Jahr sehr viel geringer aus. Sie können zwar wie Baumwolle verarbeitet werden, werden aber vorwiegend als sogenannte technische Textilien in industriellen Anwendungen eingesetzt und weniger für die Herstellung von Kleidung. Der enorme Stoffbedarf weltweit lässt sich inzwischen immer weniger durch Baumwolle decken. 1990 waren weltweit 19 Mio. Tonnen verfügbar, was einem Anteil am Gesamtfasermarkt von 49 % entsprach. Im Jahr 2020 wurden laut Industrievereinigung Chemiefaser rund 26 Mio. Tonnen Baumwolle produziert, das waren allerdings nur knapp 24 % der gesamten Faserproduktion weltweit.

Egal ob Natur- oder Chemiefaser: Die Produktionsprozesse in der Textilindustrie sind ressourcenintensiv und bisher wenig nachhaltig. Während Chemiefasern zum großen Teil erdölbasiert und schlecht abbaubar sind, hat auch die Baumwollproduktion ihre Schattenseiten: Der Anbau verbraucht große Mengen Wasser und es werden massiv Pestizide eingesetzt. Aber auch der weitere Lebensweg eines Textils verbraucht viele Ressourcen und wirkt sich auf die Umwelt aus. Das offenbart die Ökobilanz eines T-Shirts, die Forschende der TU Berlin ermittelt haben. Neben Produktion, Vertrieb und Entsorgung ist es die Wäschepflege, die sich negativ auf die Treibhausgasbilanz sowie den Energie- und Wasserverbrauch auswirkt.

Innovative Fasern aus Holz oder Milch

Sie zählen zu den Chemiefasern, basieren jedoch auf dem nachwachsenden Rohstoff Holz: Cellulose-Regeneratfasern, die aus Zellstoff gewonnen und in der Folge chemisch modifiziert werden. Dazu zählt auch die Viskose. Obwohl chemisch identisch zu Baumwollfasern, zeichnen sich Viskosefasern durch eine größere Variation in ihrer Fasergeometrie (Länge, Kräuselung, Feinheit, Querschnittsform) aus und können dadurch breiter angewendet werden. Der Energie- und Wasserverbrauch bei Herstellung und Verarbeitung von Viskose ist zwar geringer als bei Baumwolle, allerdings entstehen im Laufe des Verarbeitungsprozesses teilweise ungesunde und umweltschädliche Gifte wie Schwefelwasserstoff (H_2S) und Schwefelkohlenstoff (CS_2).

Andere Chemiefasern aus Cellulose lassen sich umweltfreundlicher produzieren: So wurde für die Produktion von Lyocellfasern ein Direkt-Löse-Verfahren entwickelt, das auf ein ungiftiges Lösungsmittel setzt und im Rahmen eines geschlossenen Stoffkreislaufes funktioniert. Die Cellulose für Lyocellfasern wird aus Eukalyptus- oder Buchenholz gewonnen. Da diese Pflanzen schneller wachsen als Baumwolle und einen hohen Ertrag pro Fläche aufweisen, ist ihre Umweltbilanz besser. Neuere Forschungsarbeiten zeigen zudem, dass sich auch Flachs, Hanf und Bambus sowie Bananenpflanzen und Soja für den Cellulosebrei eignen.

Einen innovativen Werkstoff aus reiner Cellulose haben die DITF Deutsche Institute für Textil- und

Faserforschung Denkendorf entwickelt: Purcell ist ein Einkomponenten-Verbundmaterial, sowohl die Matrix als auch die darin eingebettete Verstärkungsfaser sind aus Cellulose. Das ermöglicht ein Wiederverwertungskonzept unter ökologischen Gesichtspunkten bei geringer Umwelt- und CO_2 -Belastung. Hergestellt wird Purcell mittels einer neuartigen Technologie auf Basis ionischer Flüssigkeiten. Das Bundeswirtschaftsministerium hat die Forschenden der DITF unterstützt.

Auch Abfälle aus der Lebensmittelindustrie werden mittlerweile zur Textilherstellung genutzt. So stellt Qmilk Deutschland in Hannover aus nicht verkehrsfähiger Rohmilch ein Biopolymer bestehend aus dem Milcheiweiß Casein her. Die Fasern werden ohne



Textilien veredeln mit Enzymen und Biopolymeren

Enzyme werden als Biokatalysatoren in der Textilproduktion zur Verarbeitung und Veredelung der Stoffe eingesetzt, etwa beim Bleichen oder um den Stonewashed-Effekt bei Jeans zu erzielen. Eine Herausforderung für die Hersteller sind Textilien aus synthetischen Fasern, da sie nach mehrmaligem Waschen unliebsame Knötchen an der Textiloberfläche bilden (Pilling). In dem vom BMBF geförderten Projekt FuPol forschte eine strategische Allianz unter Beteiligung des Waschmittelherstellers Henkel. Mit dem Enzym Cutinase ließ sich die Knötchenbildung reduzieren und zugleich das Färben verbessern. Nicht nur Enzyme, auch Biopolymere geraten für die Veredelung von Textilien ins Visier. So hat der Forschungsverbund Chitotex unter Leitung des Fraunhofer IGB mit Unterstützung des BMBF einen Weg gefunden, Textilfasern mit Chitosan zu beschichten und so wasserabweisend zu machen (Foto). Das Biopolymer wurde aus Insektenhäuten gewonnen und könnte bisher genutzte Chemikalien ersetzen.

Biobasierte Innovationen für die Textilindustrie – der Innovationsraum BIOTEXFUTURE

Der Innovationsraum BIOTEXFUTURE will die Textilbranche entlang der gesamten Wertschöpfungskette nachhaltiger machen. Dazu vernetzt der Innovationsraum Unternehmen mit Forschungseinrichtungen und Hochschulen – insgesamt sind es 75 Partner. Gefördert vom BMBF mit bis zu 20 Mio. Euro widmen sich zahlreiche Projekte der Herstellung biobasierter Textilien auf Basis nachhaltiger Rohstoffkreisläufe. Projektpartner sind unter anderem der Sportartikelhersteller Adidas, das Fraunhofer IGB, die RWTH Aachen und die Universität Bayreuth. In dem Projekt Algaetex liefern Mikroalgen den Rohstoff für Kunststoffgarne, aus denen künftig T-Shirts oder gestrickte Schuhschäfte (vgl. Foto) entstehen sollen. In einem weiteren Projekt wird eine biobasierte Beschichtung entwickelt, die wasserabweisend und antimikrobiell ist und schneller trocknet. Das Projekt BIOBASE hat sich zum Ziel gesetzt, in den Bereichen Automobil, Sportbekleidung, Innenausstattung und technische

Textilien jeweils ein erdölbasiertes Produkt durch ein Produkt aus Biopolymeren zu ersetzen. Die enge Verzahnung der Projektpartner soll dazu beitragen, alle Möglichkeiten in der gesamten Wertschöpfungskette zu verankern.

biotexfuture.de



chemische Zusätze produziert. Daraus können sowohl Kleidung aber auch technische Textilien für die Medizintechnik oder die Automobilindustrie gefertigt werden.

dessen Obermaterial aus „Biosteel-Fasern“ besteht (vgl. Foto S.78). Auch in Armbändern für den Uhrenhersteller Omega kamen die Biotech-Textilien bereits zum Einsatz.

Biotech-Seidenfasern

Spinnen-Seidefäden sind Wunderwerke der Natur – zehnmal dünner als ein Menschenhaar, doch zwanzigmal stärker als Stahl und elastischer als Gummi. Für den Einsatz in Hightech-Textilien ist der Naturstoff hoch interessant. Das Martinsrieder Unternehmen AMSilk hat ein biotechnologisches Verfahren entwickelt, um Spinnenseide-Protein im industriellen Maßstab herzustellen. Das 2008 als Spin-off der TU München gegründete Unternehmen hat dafür Bakterien zu Zellfabriken für Spinnenseiden-Protein umfunktioniert. Am Ende eines Bioprozesses entsteht ein weißes Proteinpulver, das maschinell zu Fasern gesponnen werden kann (vgl. Foto auf S. 79). Textilien aus den veganen Seiden-Biopolymeren sind nicht nur besonders strapazierfähig und hautverträglich, sondern auch vollständig biologisch abbaubar. Der Sportartikelhersteller Adidas hat in einer Kooperation mit AMSilk einen Sneaker-Prototypen gefertigt,

Veganes Leder und grüne Gerbstoffe

Leder findet als langlebiges und vielseitig einsetzbares Material in vielen Bereichen des Alltags Verwendung – etwa in der Möbel- und Kleidungsindustrie. Doch die Lederproduktion aus gegerbten Tierhäuten belastet die Umwelt und wird von Konsumentinnen und Konsumenten zunehmend kritisch gesehen. Als nachhaltiger gelten Lederimitate, die beispielsweise aus Ananasfasern, Apfeltrester oder Kakteenleder gefertigt werden. Doch in diesen Materialien werden immer auch einige Anteile erdölbasierter Kunststoffe wie Polyvinylchlorid oder Polyurethan eingesetzt. Als weitere Alternative sind Lederersatzmaterialien aus Pilzen in den Fokus gerückt. Sie werden auf Reststoffen aus der Land- und Forstwirtschaft wie Sägemehl oder Melasse kultiviert. Das wachsende Pilz-Geflecht, das Myzel, baut dann Pilzbiomasse auf, die sich zu einem Material weiterverarbeiten lässt, das Leder optisch wie haptisch stark ähnelt. Erste Biotechnologie-

Unternehmen vermarkten die aus Pilzen gewonnenen Materialien bereits. Adidas hat einen Prototypen eines veganen Sportschuhs produziert, bei dem anstelle von Leder ein Pilzmyzel-Material namens Mylo vernäht wurde. Hergestellt wird es vom US-Unternehmen Bolt Threads aus Kalifornien. Das Leipziger Start-up ScobyTec hat ebenfalls ein biotechnisches Verfahren entwickelt, in dem Mikroorganismen bakterielle Nanocellulose (BNC) als Lederersatzmaterial in Form eines Vliesstoffes herstellen.

Biobasierte Innovationen gibt es auch bei der Ledergerbung. Als Alternative zu umwelt- und gesundheitsschädlichen Chromsalzen rücken immer stärker pflanzliche Gerbverfahren in den Fokus. So konnte beispielsweise das Start-up Rhubarb Technology aus den Wurzeln der Rhabarberpflanze einen Extrakt entwickeln, der sich als Gerbstoff eignet. Die Reutlinger Firma wet-green bietet einen Gerbstoff aus Olivenblättern an, der zusammen mit N-Zyme BioTec entwickelt wurde. Pflanzliche Rohstoffe spielen auch beim Färben von Textilien eine immer wichtigere Rolle. Um die Textilfärbung nachhaltiger zu machen, wird wieder auf alte Färbepflanzen zurückgegriffen. Für den Textildruck haben sich Färbepflanzen wie Krapp, Reseda, Blauholz, Gelbbeere und Jasminblüte als sinnvolle Farbstofflieferanten erwiesen. In einem vom BMEL geförderten Projekt wurden jeweils zwei pflanzliche Farbtöne für den Textildruck von Seide und Modalfasern entwickelt. Das Unternehmen hessnatur hatte in der Frühjahrskollektion 2019 bereits zwei Seidenblusen im Sortiment, die mit den im Projekt entwickelten Farbpasten bedruckt sind.

Herausforderung Recycling

Etwa 1 Mio. Tonnen Kleidungsstücke landen nach Angaben des Bundesverbandes Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V. (BVSE) jährlich in den Kleidercontainern. Meist wird nicht mehr tragbare Kleidung zu Putzlappen oder Malervlies verarbeitet. Bisher ist eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft, in der die Faser aus Textilien recycelt werden, jedoch noch nicht realisiert. Forschende am Fraunhofer IAP haben einen Weg gefunden, aus alten Baumwoll-Textilien eine hochwertige Faser herzustellen. Bislang war das technisch nicht möglich, da Kleidung meist aus Mischfasern gefertigt ist. Die Forschenden entwickelten hierfür ein Verfahren, das Zellstoff aus der Baumwolle filtern kann. Im Ergebnis entstand ein Viskose-Filamentgarn, das zu 100% aus Cellulose besteht. Die Qualität der recycelten Faser ist mit den holzbasierten Cellulose-Regeneratfasern vergleichbar und kann hinsichtlich ihrer Eigenschaften mit Viskosefaser mithalten.

Um Textilien recyceln zu können, ist es wichtig, die einzelnen Fasern und deren Zusammensetzung genau zu kennen. Hier setzt das vom BMBF geförderte Verbundvorhaben DiTex an. Im Rahmen eines Pilotprojektes werden Dienstkleidung und Handtücher aus recycelten Fasern auf Qualitäts-, Ressourcen- und Nachhaltigkeitseffekte geprüft. Die Textilien wurden dafür mit einem intelligenten Etikett ausgestattet, das relevante Parameter wie Materialmix, Faserherkunft sowie Wasch- und Recyclingzyklen speichert. So soll der komplette Lebensweg der Textilien einschließlich aller Umweltaspekte verfolgt und analysiert werden.



Aus mikrobiell hergestellten Spinnenseideproteinen stellt AMSilk Textilfasern her (li). Lederimitat aus bakterieller Nanocellulose von ScobyTec (re.)



Der gesellschaftliche Dialog

Der Aufbau einer Bioökonomie ist ein gesamtgesellschaftlicher Prozess. Eine biobasierte, nachhaltige Wirtschaft hat nur dann die Chance Realität zu werden, wenn Ziele und mögliche Zielkonflikte mit allen Akteuren der Gesellschaft diskutiert werden.

Immer mehr Organisationen, Institutionen und Gremien widmen sich der Ausgestaltung, Förderung und Kritik von Bioökonomie. Und das auf allen gesellschaftlichen Ebenen.

Wie diese Broschüre zeigt, hält die Bioökonomie in viele Wirtschafts- und Industriebereiche Einzug und es gibt zahlreiche wissenschaftliche Disziplinen, die sich mit ihr beschäftigen. Neben der naturwissenschaftlichen Verortung in den Biowissenschaften und der Chemie sind Wirtschafts-, Politik- und Sozialwissenschaften wichtige Disziplinen. Auch Medien, Kunst und Kultur setzen sich immer öfter mit dem Thema Bioökonomie auseinander.

Bioökonomie ist nicht nur ein Thema in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft, sie ereignet sich ganz konkret im Leben der Menschen. Aus diesem Grund erscheint es nur folgerichtig, dass Debatten über Bioökonomie allen offenstehen sollen und sich möglichst viele Menschen an der Gestaltung einer biobasierten Wirtschaft beteiligen. In Politik und Gesellschaft ist das Bewusstsein für Nachhaltigkeit und Klimawandel gestiegen. Das Konzept Bioökonomie ist jedoch komplex und schwer zu fassen. Befragungen zeigen, dass mit dem Begriff verbundene Debatten nur bedingt in der Bevölkerung angekommen sind und die gesellschaftliche Meinungsbildung zur Bioökonomie immer noch am Anfang steht. Die Vision einer biobasierten Wirtschaft ist vielfach erklärungsbedürftig.

Gesellschaftlicher Dialog und ein Verständnis für die Herausforderungen und Chancen der Bioökonomie spielen eine entscheidende Rolle für die Transformation hin zu einer biobasierten Wirtschaft. Hier sind die Nachfrage nach neuen Produkten und Dienstleistungen und die damit verbundenen Innovationen und technologischen Entwicklungen wichtige Faktoren. Nur wenn Bürgerinnen und Bürger aktiv in die Gestaltung des gesellschaftlichen Wandels einbezogen werden, hat die biobasierte Wirtschaft eine Chance.

Voraussetzung dafür, dass die Wahrnehmung von Chancen und Risiken der Bioökonomie verbessert wird, ist eine verständliche Kommunikation von Forschung und Innovation sowie aktuellen Entwicklungen. Wichtige Bausteine der Fachkommunikation zu wichtigen Aspekten der Bioökonomie bilden das Informationsportal *bioökonomie.de* und das Informationsportal *Pflanzenforschung.de* (vgl. Kasten und Wei-

terführende Links). Diese Informationsportale bereiten spannende Themen zum biobasierten Wirtschaften und der Pflanzenforschung für eine interessierte Öffentlichkeit auf.

Die Nationale Bioökonomiestrategie der Bundesregierung will wichtige Zukunftsthemen und Potenziale, aber auch Risiken und insbesondere mögliche Zielkonflikte mit allen Beteiligten diskutieren und bewerten. Die Lösung oder das Austarieren von Zielkonflikten ist eine Voraussetzung dafür, dass die UN-Nachhaltigkeitsziele erreicht werden (vgl. Kap. *Nachhaltige Bioökonomie als Ziel*). Deshalb werden in

Informationsplattform *bioökonomie.de*



Das Informationsportal *bioökonomie.de* ist die Anlaufstelle zum Thema Bioökonomie in Deutschland und weltweit. Die Webseite ist eine Initiative des BMBF. In allgemeinverständlicher Form werden Nachrichten, Interviews, Beispiele geförderter Projekte sowie Themendossiers und Multimedia-Storys präsentiert. Die Webseite gibt zudem einen Überblick über Bioökonomie-Aktivitäten in anderen Ländern und aktuelle Fördermaßnahmen. Dazu lassen sich auf *bioökonomie.de* Datenbanken zu Forschungseinrichtungen und Förderprojekten recherchieren. In der Mediathek finden sich mehr als einhundert Videos. Die multimediale Porträtreihe „Die Biopioniere“ stellt Persönlichkeiten in Video, Podcast und als Text-Foto-Reportage vor. Zudem konzipiert *bioökonomie.de* auch Ausstellungen und Exponate, wie „NaturFutur – Bioökonomie erleben“, die im November 2021 im Berliner Museum für Naturkunde zu sehen war.

[biooekonomie.de](https://www.biooekonomie.de)



der Bioökonomiestrategie die Bedeutung verschiedener Formate zur Einbeziehung zivilgesellschaftlicher Gruppen durch transparente Dialog- und Partizipationsprozesse hervorgehoben.

Dialogformate erproben

Als Teil des übergreifenden BMBF-Dachkonzepts „Bioökonomie als gesellschaftlicher Wandel“ werden Maßnahmen gefördert, die das Bewusstsein für die Chancen einer gesellschaftlichen Transformation hin zu einem biobasierten Wirtschaften wecken. Hierzu zählt das Anstoßen einer öffentlichen Debatte zu den Zielen der Bioökonomie und einer nachhaltigen Wirtschafts- und Lebensweise. Der 2016 gestartete Ideenwettbewerb „Neue Formate der Kommunikation und Partizipation in der Bioökonomie“ ist ein Fördermodul in dem oben genannten Dachkonzept und hat unterschiedliche Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft zusammengeführt.

Ziel war es, einerseits Aufmerksamkeit auf Anliegen und Ziele der Bioökonomie zu lenken, und andererseits neue Erkenntnisse hinsichtlich wahrgenommener Begründungsdefizite und akzeptabler Umsetzungsstrategien zu sammeln. So wurden beispielsweise im Projekt „BioKompass“ mittels verschiedener Dialogformate unterschiedliche Bioökonomie-Szenarien erkundet. Im Fokus des Projekts „BioDisKo“ wiederum stand der partizipative Dialog und regio-

nale Diskurs zu bioökonomischen Nutzungspfaden in Nordrhein-Westfalen.

Wie bei allen tiefgreifenden Wandlungsprozessen gilt es, Impulse und Bedenken frühzeitig aufzugreifen und eine sachgerechte Debatte zu unterstützen. Das BMEL führt dazu zum Beispiel „Runde Tische“ durch. Zudem unterhält es das „Kompetenznetzwerk Nutztierhaltung“ (Borchert-Kommission), die „Partnerschaft Umwelt und Landwirtschaft“, das „Praktikernetzwerk“, die Wissenschaftlichen Beiräte für „Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz“ und „Biodiversität und Genetische Ressourcen“ sowie für „Waldpolitik“.

Um Jugendliche zu einem Diskurs zu nachwachsenden Rohstoffen anzuregen, fördert das BMEL das Projekt „Einfach wachsen lassen!“ Die Zielkonflikte, die rund um die Waldnutzung bestehen, stehen im Fokus des Projekts „MorgenWald“ - ein erfahrungsorientiertes und interaktives Beteiligungsformat zum Austausch über die Zukunft der Wälder. Das Bundesumweltministerium förderte im Jahr 2020 einen „Bürgerdialog zu Chancen und Risiken der Bioökonomie für die biologische Vielfalt“. Der Bürgerdialog Bioökonomie basierte auf vier Workshops, in denen die inhaltliche Diskussionsgrundlage für den sich anschließenden Online-Dialog geschaffen wurde.

Wissenschaftsjahr 2020/21 – Bioökonomie

Nahezu zeitgleich mit der Veröffentlichung der Nationalen Bioökonomiestrategie startete im Januar 2020 das Wissenschaftsjahr zum Thema Bioökonomie. Es wurde im Futurium am Berliner Alexanderufer offiziell eröffnet. Wenige Wochen später prägte die Corona-Pandemie den Charakter des Wissenschaftsjahres; in Folge wurde dieses auf das Jahr 2021 ausgeweitet. Mit den Wissenschaftsjahren als Plattform für den Dialog von Forschung und Gesellschaft rückten das Bundesforschungsministerium und die Organisation „Wissenschaft im Dialog“ die Bioökonomie ins Rampenlicht. In zahlreichen Veranstaltungen, darunter Ausstellungen, Wettbewerbe und Diskussionsrunden, riefen die Partner aus Wissenschaft, Wirtschaft, Bildung, Kultur und Politik bundesweit dazu auf, Forschung kritisch zu diskutieren und kontroverse Debatten voranzutreiben. Gleichzeitig verstehen sich die Wissenschaftsjahre als Treiber für eine Weiterentwicklung der Wissenschaftskommunikation. So hat das BMBF im Rahmen des Wissenschaftsjahres 2020/21 – Bioökonomie insgesamt 32 innovative Vorhaben zur Wissenschaftskommunikation gefördert. Pandemiebedingt verlagerten sich viele Projekte ins Web, wurden zu Online-Events umgewidmet oder für eine digitale Umsetzung konzipiert.

Die geförderten Projekte reichten von poetisch-kreativen Formaten (Poetry & Science Slams, Podcasts, Design Fiction) hin zu spielerische Lernansätzen (Geocaching, Video Challenges, Gaming) oder regten zum Mitmachen und Ausprobieren an (Verkostungen, Experimentier-Workshops, Wahlarenen). Forum für aktuelle Meldungen und Meinungsbeiträge von Forschenden, Informationen über Förderprojekte und Terminhinweise war die Webseite wissenschaftsjahr.de. Die Webseite bot auch Spiele, informative Kurzvideos und Do-it-Yourself-Anleitungen an. Wissenschaft im Dialog organisierte Diskussionsveranstaltungen, den Hochschulwettbewerb (vgl. Kap. Karriere), Online-Events zum Thema nachhaltige Mode (Hack Your Fashion) und ging mit einem mobilen Escape Room auf Tour. Das Ausstellungsschiff MS Wissenschaft als schwimmendes Science Center war in den Sommermonaten auf Deutschlands Wasserstraßen unterwegs und machte an 30 Orten halt. Bei der großen Citizen-Science-Aktion „Expedition Erdreich“ stand Bürgerforschung zur Bodengesundheit im

Schnittstellen für den gesellschaftlichen Dialog

Bioökonomierat: Zu den Aufgaben des seit Ende 2020 amtierenden Bioökonomierates gehört nicht nur das Erarbeiten von Empfehlungen, Stellungnahmen und Gutachten an die Bundesregierung; Das Fachgremium wird auch öffentliche Debatten zur Bioökonomie fördern. Unter breiter Beteiligung der Zivilgesellschaft soll der Bioökonomierat künftig auch Konflikte thematisieren, die bei der Umsetzung der mit der Bioökonomie verknüpften Nachhaltigkeitsziele auftreten können und in einem partizipativen Prozess Vorschläge und Empfehlungen für einen Umsetzungsplan der Nationalen Bioökonomie-Strategie entwerfen. Gelingen soll das mithilfe thematischer Arbeitsgruppen, in die auch Interessenvertreter eingeladen werden können und mit denen der offene Dialog zwischen Öffentlichkeit, Wissenschaft und Politik intensiviert werden soll, und einem jährlichen Bioökonomie-Forum.

Dialogplattform Industrielle Bioökonomie: Dieser Think-Tank wurde 2018 auf Initiative des Bundeswirtschaftsministeriums gegründet, um den Austausch zwischen Industrievertretern auf der einen und Wissenschaft sowie Zivilgesellschaft auf der anderen Seite zum zu verbessern. Vertreten sind Akteure aus Industrie, Verbänden, Wissenschaft, Gewerkschaft und Bundes- sowie Landesministerien. Die Mitglieder der Plattform geben Empfehlungen, wie man den öffentlichen Dialog besser gestalten könnte. Eine wichtige Rolle wird in Best-Practice-Beispielen und Beispielregionen gesehen.

Vordergrund. Herzstück der Aktion war die Tea-Bag-Index-Methode, mit der bestimmt werden kann, wie schnell organisches Material im Boden zersetzt wird. Dafür wurden von den Mitwirkenden an 9.000 Standorten genormte Teebeutel vergraben, drei Monate lang der Zersetzung im Boden ausgesetzt und dann wieder ausgegraben und gewogen. Das Wissenschaftsjahr fand auf einem Event im Berliner Museum für Naturkunde im November 2021 seinen Abschluss. Dort fand auch zeitgleich die Ausstellung „NaturFutur – Bioökonomie erleben“ statt, ein Kooperationsprojekt der Informationsplattform biooekonomie.de mit dem Museum für Naturkunde Berlin.



Karriere in der Bioökonomie

Die Bioökonomie erstreckt sich über alle wirtschaftlichen Sektoren und zahlreiche wissenschaftliche Disziplinen. Dafür werden Fachkräfte mit interdisziplinärer Expertise an den Schnittstellen von Nachhaltigkeit, Produktionsprozessen, Märkten und Konsum gesucht. Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen sind die Orte, an denen der wissenschaftliche Nachwuchs ausgebildet wird. Auch für gründungswillige Menschen mit innovativen Geschäftsideen bietet die biobasierte Wirtschaft vielfältige Perspektiven.

Durch die Verknüpfung unterschiedlicher Felder, Wissensgebiete und Wirtschaftszweige in der Bioökonomie entstehen neue Möglichkeiten, aber auch neue Anforderungen an berufliche Qualifikationen. Sie sind die Voraussetzung für Innovation und Wachstum und leisten einen notwendigen Beitrag zur nachhaltigen Bioökonomie in Deutschland. Es werden Expertinnen und Experten mit breitem Fachwissen und interdisziplinären Qualifikationen benötigt.

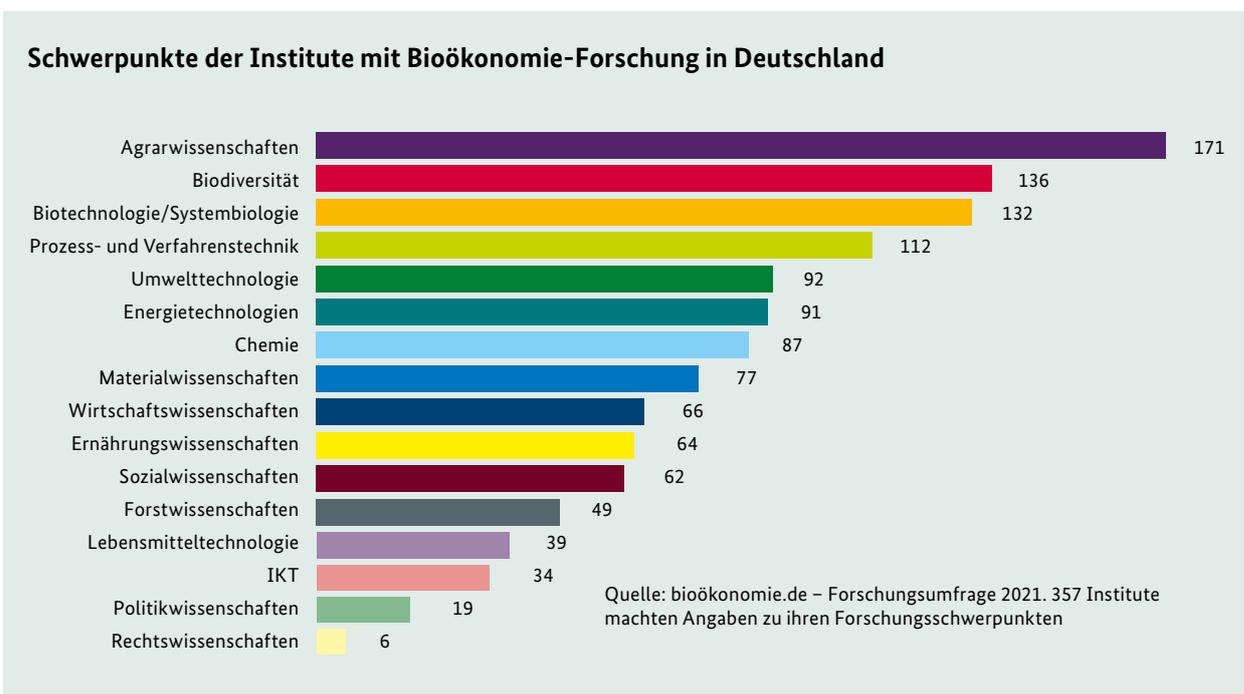
Forschungslandschaft Bioökonomie

Hochschulen und außeruniversitäre Einrichtungen sind die zentralen Orte der Bioökonomie-Forschung in Deutschland. Mehr als 800 Institute und Forschungseinrichtungen in Deutschland befassen sich laut der Forschungsumfrage 2021 der Informationsplattform bioökonomie.de mit diesem Thema. Mehr als 70 Universitäten und 64 Hochschulen für Angewandte Wissenschaften sind in der Bioökonomie-Forschung aktiv. Hinzu kommen mehr als 156 außeruniversitäre Institute der Fraunhofer-Gesellschaft, der Max-Planck-Gesellschaft, der Leibniz-Gemeinschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft sowie rund 40 Einrichtungen der Ressortforschung (vgl. Grafik S. 6). Die Forschungsaktivitäten in der Bioökonomie umfassen viele verschiedene Fächer. Das spiegelt sich auch in

der Forschungsumfrage wider: Von den 357 Instituten, die sich an der Umfrage zu fachlichen Schwerpunkten beteiligten, forschen die meisten im Bereich Agrarwissenschaften, Biodiversitätsforschung, Biotechnologie, Prozess- und Verfahrenstechnik und Umwelttechnologien (vgl. Grafik S. 85). Aber auch in den Sozialwissenschaften, Wirtschaftswissenschaften und Politikwissenschaften hat sich hierzulande eine Forschungsgemeinschaft zur Bioökonomie entwickelt.

Mit der Forschungsförderung zur Bioökonomie hat die Bundesregierung den Wissensaufbau und die interdisziplinäre Vernetzung in der Wissenschaft vorangetrieben. In über 2.000 Forschungsprojekten, die seit dem Jahr 2010 im Rahmen der Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie gefördert wurden, konnten nicht zuletzt viele junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wertvolle Qualifikationen für eine akademische oder unternehmerische Laufbahn erwerben. Im Rahmen der geförderten Vorhaben sind mehrere tausend Qualifizierungsarbeiten entstanden.

Die Bundesregierung knüpft daran an und hat die Qualifikation und Ausbildung von Fachkräften als eines der übergreifenden Instrumente zur Umsetzung der Nationalen Bioökonomiestrategie bestimmt.



Nachwuchsgruppen für nachhaltige Bioökonomie-Forschung

Eine besonders attraktive Form der Qualifizierung stellt die Förderung von Nachwuchsgruppen dar. Diese wird im Rahmen verschiedener Fördermaßnahmen unterstützt. Dazu zählte der Forschungspreis der Initiative Biotechnologie 2020+. Den Preisträgern wurde für fünf Jahre eine Forschungsgruppe finanziert, mit der sie an neuen biotechnologischen Produktionsverfahren von morgen arbeiten konnten. Die geförderten Projekte reichen von der Bioelektrotechnologie zur Produktion von Feinchemikalien (Falk Harnisch), über Cyanobakterien als Wasserstofffabriken (Kirstin Gutekunst), bis hin zu Designer-Organellen als neuartige Reaktionsräume in Zellen (Stefan Schiller).

Im Rahmen der Maßnahme „Bioökonomie als gesellschaftlicher Wandel“ fördert das BMBF Nachwuchsgruppen, die sich in ihrer Forschung insbesondere mit relevanten Themen aus den Sozial-, Politik- und Wirtschaftswissenschaften befassen. Die Forschenden adressieren ein breites Spektrum an Themen – von der Kreislaufwirtschaft in der Bioökonomie, der Analyse

Jobperspektiven für Bioökonomie-Studierende

Die Universität Hohenheim bietet neben einem internationalen Masterstudiengang „Bioeconomy“ viele weitere Studiengänge mit Bezug zur Bioökonomie an, etwa Nachwuchsende Rohstoffe und Bioenergie, Lebensmitteltechnologie und Agrarwissenschaften. Iris Lewandowski, Chief Scientific Officer an der Uni Hohenheim und Co-Vorsitzende des Bioökonomie-rates, im bioökonomie.de-Interview:

„Für unsere Studiengänge interessieren sich vor allem Studierende, die an der Gestaltung einer nachhaltigen Zukunft mitwirken wollen. Die Aufgaben sind hierbei sehr vielfältig wie die Profile und Jobs, in die unsere Absolventen und Absolventinnen starten. Viele werden von den Nachhaltigkeitsabteilungen von Unternehmen angeheuert, andere für das Management von Projekten oder zur Entwicklung biobasierter Produkte eingestellt. Einige Absolventen gehen aber auch zu nationalen oder internationalen Forschungseinrichtungen und Institutionen, andere wiederum gründen ihre eigenen Start-ups.“

von Innovationsprozessen in Bioclustern, sozialen Ungleichheiten im Bioenergie- oder im Lebensmittel-sektor, oder der gesellschaftliche Wandel in anderen Ländern rund um den Globus.

Auch das BMEL unterstützt im Rahmen seiner Förderaktivitäten Nachwuchsgruppen. Die thematische Spannweite reicht von innovativen holzbasierten Baustoffen über neue Oleochemikalien und neue Ansätze zur Verarbeitung von Biokunststoffen bis zur Optimierung der Prozessführung von Biogasanlagen.

Die Förderung des wissenschaftlichen sowie unternehmerischen Nachwuchses wird durch das im Jahr 2021 veröffentlichte BMBF-Konzept „Nachwuchsförderung für eine nachhaltige Bioökonomie“ mit der in der Nationalen Bioökonomiestrategie verankerten Nachhaltigkeitsagenda verbunden. Damit macht das BMBF den Nachhaltigkeitsbezug zu einem zentralen Kriterium seiner Nachwuchsförderung in der Bioökonomie.

Im Rahmen des BMBF-Konzepts richtet sich die 2021 gestartete Förderinitiative „Kreativer Nachwuchs forscht für die Bioökonomie“ an Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Natur-, Informationstechnologie- und Ingenieurwissenschaften an Hochschulen, weiteren Forschungseinrichtungen sowie an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft. Die im Projekt verfolgten Lösungsansätze zur Realisierung der Bioökonomie müssen sich deutlich an den Zielen der Vereinten Nationen für nachhaltige Entwicklung (SDGs) orientieren und diese aufgreifen.

Die Nachwuchsgruppen werden bis zu fünf Jahre dabei unterstützt, Forschungsfragen interdisziplinär zu bearbeiten und Brücken zwischen den Sozial-, Natur- und Technikwissenschaften zu schlagen. Zu der Förderinitiative sind im Jahrestakt mehrere Ausschreibungsrunden geplant. Darüber hinaus unterstützt die Fördermaßnahme auch die Rückkehr von jungen Forschenden, die bislang im Ausland gearbeitet haben, wie auch junge ausländische Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Ihnen werden mit dieser Förderung gute Karrierechancen am Forschungsstandort Deutschland geboten. Um bestmögliche Rahmenbedingungen in der für junge Forschende entscheidenden Phase ihrer Karriere zu schaffen, ist in den Maßnahmen zur Nachwuchsförderung eine Begleitung durch – auch internationale

– Mentorinnen und Mentoren angelegt. Aus dem Kreis der erfolgreich abgeschlossenen Nachwuchsgruppen soll ein Alumni-Netzwerk aufgebaut werden.

Bioökonomie studieren

Genauso breitgefächert wie die Forschungsaktivitäten zur Bioökonomie ist auch das Spektrum möglicher Ausbildungswege an Berufs- und Fachschulen, Fachhochschulen und Universitäten. Ein Weg sind klassische Abschlüsse in Agrarwissenschaften, Biotechnologie, Chemie, Lebensmitteltechnik, Wirtschaftswissenschaften oder Gesellschaftswissenschaften. Daneben richten immer mehr Universitäten und Hochschulen spezialisierte Studiengänge und Abschlüsse zum Thema Bioökonomie ein. In Deutschland werden interdisziplinäre Bioökonomie-Studiengänge an der Technischen Universität München (B.Sc. Bioökonomie) und der Universität Hohenheim (M.Sc. Bioeconomy) angeboten. An der Universität Greifswald wird derzeit ein Masterstudiengang „Bioeconomy“ aufgebaut. Hinzu kommen zahlreiche Studiengänge bundesweit zum Thema Nachhaltigkeit, Ressourcenmanagement und Sozioökonomie. Die Bioökonomie-Ausbildung sollte Fachleuten zufolge stark multi- und transdisziplinär sowie praxisnah ausgerichtet sein. Zudem sind Integrations- und Kooperationsfähigkeit und die Fähigkeit zum systemischen Denken gefragt. Immer wichtiger werden digitale Technologien und Anwendungen.

Mit innovativen Geschäftsideen durchstarten

Viele gute Ideen entstehen während der wissenschaftlichen Forschungsarbeit, doch bis aus einer Idee ein marktreifes Produkt wird, ist es oft ein langer und kostenintensiver Weg. Wie wird aus einer Geschäftsidee ein Unternehmen? Es hat sich gezeigt, dass für die Umsetzung einer biobasierten Wirtschaft mitunter außergewöhnliche Ideen und Förderinstrumente mit neuartigem Charakter gefragt sind.

Der Ideenwettbewerb „Neue Produkte für die Bioökonomie“ richtet sich vor allem an junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Das Ziel ist es, Menschen mit originellen Produktideen

Hochschulprojekte im Wissenschaftsjahr



An den Aktivitäten des Wissenschaftsjahres 2020/21 zum Thema Bioökonomie waren junge Forschende in vielfältiger Weise beteiligt. Beim Hochschulwettbewerb von „Wissenschaft im Dialog“ wurden insgesamt 25 Projekte von Nachwuchsforschenden für ihre Kommunikationsideen zum Thema Bioökonomie mit je 10.000 Euro ausgezeichnet. Es beteiligten sich Studierende, Promovierende und Postdocs.

Das Bioökonomie-Camp im Herbst 2021 war die Forschungs-Convention im Wissenschaftsjahr. Veranstaltet wurde die digitale Veranstaltung vom BMBF und von der Universität Hohenheim. Das Programm setzte sich interaktiven Podiumsdiskussionen, Barcamp-Sessions, Deep-Dive-Workshops und Diskussionsrunden zusammen und konnte aufzeigen, wie wichtig in der Bioökonomie inter- und transdisziplinäres Arbeiten ist.

für eine biobasierte Wirtschaft eine unkomplizierte Fördermöglichkeit zu bieten. Die Förderung umfasst zunächst eine Sondierungsphase, in der neue Ideen für biobasierte Produkte oder Verfahren ausgearbeitet werden können. Daran schließt sich eine zweijährige Machbarkeitsphase an. Auch in anderen Förderformaten, wie GO-Bio oder EXIST, ergeben sich attraktive Möglichkeiten der Frühförderung für gründungswillige Forscherteams, die mit ihren Bioökonomie-Innovationen durchstarten wollen.

Auf europäischer Ebene gibt es mit dem von der EU initiierten European Circular Bioeconomy Fund (ECBF) eine Möglichkeit, an Wagniskapital zu gelangen. Der Fonds hat bereits mehr als 300 Mio. Euro eingesammelt und investiert unter anderem in deutsche Unternehmen.

Weiterführende Links

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Auf diesen Webseiten finden sich mehr Informationen zur Nationalen Bioökonomiestrategie und zur Bioökonomie-Förderung des BMBF

bmbf.de/biooekonomie
fona.de

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

Diese Website gibt einen Überblick über die Bioökonomie-Förderung des BMEL

bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/biooekonomie-nachwachsende-rohstoffe/ueberblick-biooekonomie.html

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Auf dieser Webseite stellt das BMWK unter anderem das Förderprogramm Industrielle Bioökonomie vor

bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/industrielle-biooekonomie-wachstum-und-innovation.html

Bioökonomierat

Die Website des Beratungsgremiums der deutschen Bundesregierung zum Thema Bioökonomie

biooekonomierat.de

Informationsportal bioökonomie.de

Das Informationsportal zum Thema Bioökonomie in Deutschland und weltweit. Hier finden sich Nachrichten, Porträts, Interviews und Themendossiers, Videos und Podcasts, Multimedia-Storys sowie Datenbanken zu Förderprojekten und Forschungseinrichtungen. biooekonomie.de ist eine Initiative des BMBF.

biooekonomie.de

Informationsportal pflanzenforschung.de

Das Informationsportal bietet Nachrichten, Hintergründe rund um das Thema Pflanzenforschung.

Das Online-Portal wird vom BMBF gefördert
pflanzenforschung.de



wissenschaftsjahr.de

Die Wissenschaftsjahre sind eine Initiative für Wissenschaftskommunikation des BMBF. Bioökonomie war das Thema des Wissenschaftsjahres 2020/21. Auf der offiziellen Website finden sich Meldungen, Hintergründe und Informationen zu den Mitmachaktionen.
wissenschaftsjahr.de/2020-21

Projektträger Jülich

Der Projektträger Jülich ist für viele Bioökonomie-Projekte der Projektträger des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

ptj.de/fokusthemen/biooekonomie

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe

Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe ist Projektträger des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

fnr.de

Nachwachsende Produktwelt

Produkte- und Anbieterkatalog der FNR, die Beschaffungsverantwortlichen der öffentlichen Hand und Verbrauchern die vielfältige Produktwelt nachwachsender Rohstoffe vorstellt.

die-nachwachsende-produktwelt.de

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat 725 Nachhaltiges Wirtschaften; Bioökonomie
11055 Berlin

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
(BMEL)
Referat 525
Wilhelmstraße 54
10117 Berlin

Bestellungen

schriftlich an
Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 48 10 09
18132 Rostock
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
Internet: bmbf.de
oder per
Tel.: 030 18 272 272 1
Fax: 030 18 10 272 272 1

Stand

April 2022 (unveränderter Nachdruck Juli 2022)

Text

Informationsplattform bioökonomie.de c/o BIOCOM AG
(Dr. Philipp Graf, Björn Lohmann, Beatrix Boldt)

Gestaltung

BIOCOM AG (Michaela Reblin)

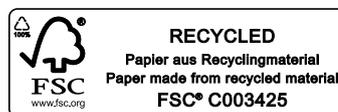
Druck

Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt/M.

Bildnachweise

Titel: Norbert Michalke/Fraunhofer CBP
S.2: IGv GmbH
S.5: BMBF; Mocup: Artimasa - Freepik.com
S.6: bioökonomie.de
S.8: Pixabay
S.10: 17ziele.de
S.12: Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich im Auftrag des BMBF
S.13: Global Bioeconomy Summit 2018
S.14: bogitw/Pixabay
S.15: Steffen Eichner/adobe.stock.com
S.18: Masakazu Kobayashi/Pixabay
S.19: BIOCOM AG, Icons dvarg, julvektoria, raven, ktinte, ratsch 0013/stock.adobe.com
S.20: Norbert Michalke /Fraunhofer CBP
S.21: Thomas Stephan/BLE Bonn
S.22: Biozentrum, Universität Basel
S.23: Clariant
S.25: BMBF; Mocup: Artimasa - Freepik.com
S.26: Radu Bercan/shutterstock.com
S.27: Illustrationen: Florian Sänger für BMBF
S.28: FNR/Norbert Breuer
S.29: Leibniz INM /Uwe Bellhäuser
S.30: Fraunhofer WKI/ Federico Böhm
S.31: FNR/Dr. Fred Eickmeyer; Deutscher Zukunftspreis/Ansgar Pudenz
S.32: ICD/ITKE Universität Stuttgart
S.33: Gregor Peter Schmidt
S.34: Roland Wehinger/HK Architekten
S.35: Dr. Philipp Graf/BIOCOM AG

S.36: Norbert Michalke/Fraunhofer CBP
S.37: Andreas Heddergott/TU München
S.39: Gunter Binsack/Fraunhofer CBP
S.41: Clariant
S.42: KIT/Markus Breig
S.43: Jürgen Fälchle/stock.adobe.com
S.44: Clariant
S.45: TU München /Andreas Heddergott
S.46: Industriepark Hoechst
S.47: Forschungszentrum Jülich/Sascha Kreklau
S.48: Hendrik Schneider /ZALF
S.49: Hochschule Osnabrück
S.50: Nicolas Tyborski/Rhizotraits
S.51: IPK Leibniz-Institut
S.52: 3N/Colja Beyer
S.53: Agrarsysteme der Zukunft
S.54: mhp/stock.adobe.com
S.55: FNR/M. Weitz
S.56: Entwicklungsgesellschaft Westholstein (egw)
S.57: Fraunhofer IME/Andreas Reimann
S.58: Exzellenzcluster livMatS
S.59: Wolfgang Jargstorff/adobe.stock.com
S.61: Susanne Neumann/Fraunhofer IVV
S.62: Andres Rodriguez/adobe.stock.com
S.63: Fraunhofer EMFT /Bernd Müller
S.64,65,66,67: BIOCOM AG
S.66: Deutscher Zukunftspreis/Ansgar Pudenz
S.68: Sartorius
S.69: Tobias Haase/ TU München
S.70: Eleva GmbH
S.71: Frank Marthe/JKI
S.72: FotoLyriX/adobe.stock.com
S.73: F. Büschelberger/Hochschule Anhalt
S.75: BIO-LUTIONS International AG
S.76: BIOCOM AG
S.77: Fraunhofer IGB
S.78: adidas Group / Hannah Hlavacek
S.79: AMSilk GmbH; ScobyTec GmbH
S.80, S.82: BMBF/Wissenschaftsjahr 2020/21
S.81: BIOCOM AG
S.84: moodboard/stock.adobe.com
S.87: BMBF/ Wissenschaftsjahr 2020/21/Christian Thiele
S.88: Illustration: Florian Sänger für BMBF



Diese Publikation wird als Fachinformation des Bundesministeriums für Bildung und Forschung sowie des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

bmbf.de
bmel.de

 @BMBF_Bund

 @bmbf.de

 @bmbf.bund

 @bmel

 Lebensministerium