



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Werkzeuge der Bioökonomie

Innovative Technologien für die biobasierte Wirtschaft



Inhaltsverzeichnis

1. Bioökonomie – nachhaltig wirtschaften	2
2. Zellen und Biomoleküle	6
3. Züchten und archivieren	12
4. Messen und analysieren	16
5. Daten sammeln und nutzen	20
6. Verarbeiten und produzieren	24
7. Kreisläufe und vernetzte Welten	28
8. Weiterführende Links	34
9. Impressum	35

ategie 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. Dabei wird die Gesellschaft auf mannigfaltige Weise beteiligt, wie etwa mit dem Wissenschaftsjahr 2020/21 – Bioökonomie.

Innovativer Zugang zu biologischen Systemen

In der Definition der Bundesregierung² 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 wissenschaftlichen 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.

„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.“

Bioökonomie-Definition der Bundesregierung

Biologische Ressourcen nutzen

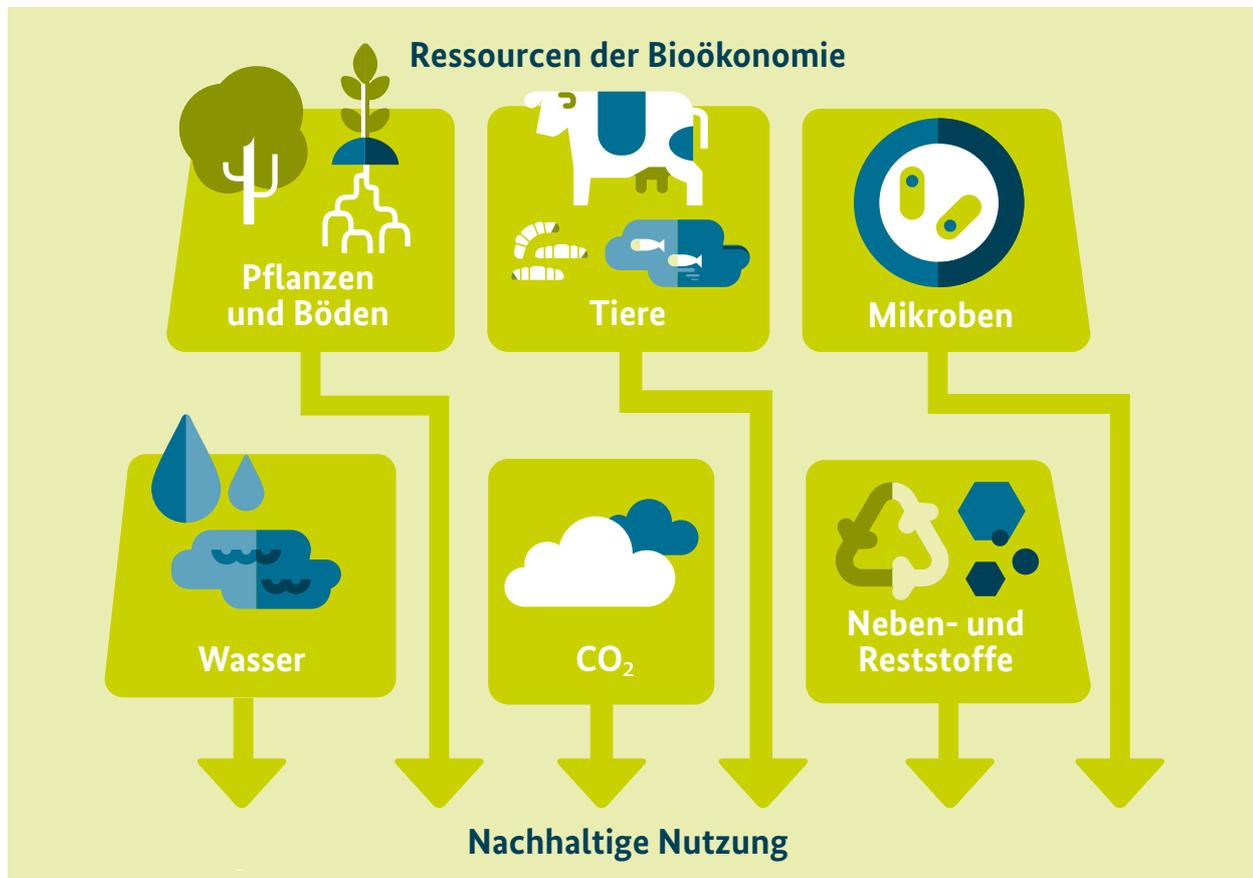
In der Bioökonomie werden biogene Rohstoffe mithilfe der Land- und Forstwirtschaft, der Meereswirtschaft mit Fischerei und Aquakultur oder durch Produktion mithilfe von Mikroorganismen erzeugt. Ein besonderes Augenmerk gilt der Verwertung und Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe. So können und 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. Ein gutes Beispiel hierfür ist die biotechnologische Gewinnung von Spinnenseide mithilfe von Mikroorganismen. Die so gewonnenen Seidenfasern sind besonders strapazierfähig. Da sie darüber hinaus hautverträglich sind, werden sie bereits heute zur Produktion von Turnschuhen und Outdoorbekleidung verwendet.

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. Das wird erreicht, indem natürliche Roh- und Abfallstoffe nicht nur be- und verarbeitet, sondern möglichst auch mehrfach genutzt und weiterverarbeitet werden. Die Nutzung über mehrere Stufen nennt man auch Kaskadennutzung. Durch die effiziente Nutzung von Biomasse entsteht im Idealfall



nicht mehr Kohlendioxid als während der Wachstumsphase CO_2 -fixierender Organismen (Pflanzen, Algen, photosynthetische Bakterien) der Atmosphäre entzogen wurde – ein Baustein auf dem Weg zu einer klimaneutralen Wirtschaftsweise.

Branchen und Produkte

Mit der Bioökonomie verbindet sich ein enormes Innovationspotenzial für zahlreiche Industriebranchen. Zu den besonders relevanten Wirtschaftszweigen zählen die Land- und Forstwirtschaft, die Chemie- und Pharmaindustrie, die Nahrungsmittelindustrie, die Konsumgüter- sowie die Papier- und Textilindustrie. Schon heute haben zahlreiche innovative, biobasierte Produkte ihren Weg vom Labor in unser alltägliches Leben gefunden. Dazu zählen unter anderem Enzyme im Waschmittel, biotechnologisch erzeugte Medikamente, Autoreifen aus Löwenzahn-Kautschuk, Algenöl als Kerosinersatz oder abbaubare Biokunststoffe.

Bioökonomie und Gesellschaft

Was aber bedeutet nun nachhaltiges Wirtschaften auf gesellschaftlicher Ebene? Es geht darum, die Bedürfnisse gegenwärtiger Generationen zu befriedigen, ohne dabei künftigen Generationen die Lebensgrundlage zu nehmen beziehungsweise ihnen die Chance zu bewahren, ihre Bedürfnisse nach eigenen Vorstellungen zu stillen. Die Nachhaltigkeit baut dabei auf drei Säulen auf, der ökonomischen, der ökologischen und der sozialen. Sie müssen gemeinsam betrachtet werden, um so Zielkonflikte frühzeitig zu erkennen und unter sorgfältiger Abwägung aller drei Säulen den jeweils nachhaltigsten Lösungsweg zu identifizieren. Wichtig für das Drei-Säulen-Modell ist, dass alle Säulen gleichgewichtet und gleichrangig sind, da es auf der Vorstellung basiert, dass eine nachhaltige Entwicklung nur zu erreichen ist, wenn umweltbezogene, wirtschaftliche und soziale Ziele gleichzeitig und gleichberechtigt umgesetzt werden, wobei sich die verschiedenen Ziele gegenseitig bedingen.

Auf diese Weise soll die ökologische, ökonomische und soziale Leistungsfähigkeit einer Gesellschaft sichergestellt und verbessert werden. Dies kann zum Beispiel dazu führen, dass eine biobasierte Innovation nicht zur Marktreife gelangt, da sie nicht oder nicht umfangreich von der Gesellschaft mitgetragen wird. Die „Tank vs. Teller“-Diskussion ist hierfür ein gutes Beispiel. Dennoch ist klar: 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.

Die Werkzeuge der Bioökonomie im Porträt

Die Bioökonomie setzt auf den wissenschaftlichen Fortschritt. Biologisches Wissen, etwa aus der modernen Molekularbiologie, den Agrarwissenschaften oder der Ernährungsforschung sowie eine breite Palette innovativer Technologien stehen zur Verfügung, um biologische Ressourcen zu nutzen, sie zu verarbeiten und daraus nachhaltige Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Die „Werkzeugkiste der Bioökonomie“ hält dabei insbesondere Entwick-

lungen der Biowissenschaften in Kombination mit den Ingenieurwissenschaften und der Informationstechnik bereit. Schlüsseltechnologien, wie etwa die Biotechnologie, die Nanotechnologie und die Künstliche Intelligenz, greifen ineinander und sind wichtige Innovationstreiber der Bioökonomie.

Mit dieser Broschüre will das BMBF die Bioökonomie für Bürgerinnen und Bürger anschaulich machen; auch indem sie eine Auswahl ihrer wichtigsten „Werkzeuge“ vorstellt. Die Broschüre liefert einen kompakten Überblick über innovative Technologien und Konzepte, die in der biobasierten Wirtschaft bereits zum Einsatz kommen und die sie vermutlich auch in Zukunft prägen werden. In Form von kurzen Einführungskapiteln und bebilderten Kurzsteckbriefen wird die „Werkzeugkiste der Bioökonomie“ präsentiert. Zunächst illustriert die Broschüre die grundlegenden biologischen, funktionalen Einheiten wie Zelltypen und Biomoleküle, die in der Bioökonomie bei der Produktion zur Anwendung kommen. Danach werden wichtige Werkzeuge der Pflanzenzüchtung und der Bioanalytik beschrieben, ebenso wie Produktionsverfahren der industriellen Biotechnologie und Ansätze für die Agrarproduktion der Zukunft.

Bioökonomie in Deutschland

Auf dem Weg in eine Bioökonomie und in den dazu unternommenen Forschungsanstrengungen nimmt Deutschland eine internationale Vorreiterrolle ein. Bereits im Jahr 2010 hat die Bundesregierung die Bioökonomie auf ihre politische Agenda gehoben und die Nationale Forschungsstrategie Bioökonomie 2030 veröffentlicht. 2,4 Milliarden Euro wurden in diesem Rahmen hierzulande in die Bioökonomie-Forschung investiert. Ihr folgte die Nationale Politikstrategie Bioökonomie aus dem Jahr 2013. Im Januar 2020 veröffentlichte das Bundeskabinett die neue Nationale Bioökonomiestrategie. Sie setzt fortan 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. Federfüh-

rend 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. Die Bundesregierung lässt sich von einem unabhängigen Expertengremium beraten – dem Bioökonomierat. Mit dem Wissenschaftsjahr 2020/21 rückt das BMBF die Bioökonomie weiter ins Rampenlicht. Zahlreiche Nachrichten, Porträts, Interviews und Dossiers zur Bioökonomie in Deutschland präsentiert das vom BMBF initiierte Informationsportal biooekonomie.de. Weitere Angebote macht das Informationsportal pflanzenforschung.de.

bmbf.de/biooekonomie, biooekonomie.de;
pflanzenforschung.de



Zellen und Biomoleküle

Mikroorganismen und eine besondere Klasse von Biomolekülen, die Enzyme, sind die Leistungsträger einer nachhaltigen industriellen Produktion. Mithilfe molekularbiologischer Verfahren ist es möglich, Zellen oder ihre Bestandteile zu Biofabriken umzufunktionieren, die aus biogenen Rohstoffen hochwertige Produkte wie Feinchemikalien oder Wirkstoffe umweltschonend in größeren Mengen liefern. Die Werkzeugkiste der Natur in technischen Anwendungen zu nutzen, um interessante neuartige und maßgeschneiderte Produkte herzustellen, ist ein zentrales Ziel der Biotechnologie. Es geht zugleich darum, dies in einer ressourcen- und umweltschonenden Art und Weise zu tun.

Die Biotechnologie ist eine anwendungsorientierte Wissenschaft im Schnittpunkt von Biologie, Medizin, Chemie und Ingenieurwissenschaften. Sie nutzt die Stoffwechselleistungen von Mikroorganismen und die besonderen Eigenschaften von Biomolekülen zum Aufbau, Umbau oder Abbau von Substanzen. Mikroorganismen, tierische und pflanzliche Zellen sowie die aus ihnen gewonnenen Biomoleküle sind somit wichtige Werkzeuge einer biobasierten Wirtschaft. Ob

in der Chemie-, Pharma- oder Lebensmittelindustrie, schon heute werden sie in vielfältiger Weise eingesetzt, um wertvolle Produkte wie Chemikalien, Medikamente oder Treibstoffe herzustellen. Die industrielle Anwendung von Mikroorganismen, Zellen oder Enzymen für verschiedene Branchen wird als industrielle oder auch „weiße“ Biotechnologie bezeichnet. Es geht bei der Bioökonomie immer auch darum, die Vielfalt an Mikroorganismen und deren Fähigkeiten für die industrielle Produktion zu ergründen und intelligent zu nutzen. Dabei erlauben es moderne molekularbiologische Techniken, Zellen und Enzyme für ihren Einsatz in der biotechnologischen Produktion zu optimieren und diese Prozesse ressourcenschonender zu gestalten. Die Biotechnologie ist eine *Enabling Technology* der Bioökonomie.

Mikroorganismen als zelluläre Minifabriken

Mikroorganismen sind mikroskopisch kleine Lebewesen. Zu ihnen zählen Prokaryoten wie die Bakterien und Eukaryoten, wie Amöben, Pilze sowie Mikroalgen. Sie existieren seit mehr als drei Milliarden Jahren auf der Erde und haben nahezu jeden Lebensraum erobert. Im Laufe ihrer Evolution haben Mikroor-

ganismen enorm vielfältige Stoffwechsellleistungen entwickelt. Der Mensch bedient sich schon seit Tausenden Jahren dieser Fähigkeiten. So sind Bakterien, Hefen und Schimmelpilze unverzichtbare Helfer für die Herstellung von verschiedenen Lebensmitteln, wie Brot, Käse, Milchprodukten, Wein, Essig oder Bier.

Als Meister der Stoffumwandlung arbeiten Mikroorganismen wie winzige Chemiefabriken. Werden sie mit Substraten aus nachwachsenden Rohstoffen „gefüttert“, setzen sie diese Nahrung mithilfe ihres spezifischen Stoffwechsels um und stellen daraus neue Substanzen her. Erkenntnisse in der Zell- und Molekularbiologie sowie die Entwicklung gentechnischer Werkzeuge haben uns neue Möglichkeiten eröffnet, die Stoffwechsellleistungen von Mikroorganismen zu erforschen und für die biotechnologische Produktion zu nutzen. Mikrobielle Produktionsprozesse laufen im Vergleich zu erdölbasierten zumeist in wässrigen Lösungen, bei Zimmertemperatur und unter Normaldruck ab. Damit hilft der Einsatz von mikrobiellen Produzenten im Vergleich zu den meisten chemisch-synthetischen Prozessen, Ressourcen und die Umwelt gleichermaßen zu schonen.

Enzyme, die Supertalente unter den Biomolekülen

Wenn die Zellen als Biofabriken betrachtet werden, sind in der Welt der Biomoleküle die Enzyme die Maschinen. In der Regel handelt es sich bei Enzymen um Proteine unterschiedlicher Komplexität. Vom Nahrungsaufschluss über den Energiestoffwechsel der Zellen, der Informationsübertragung bis hin zum Kopieren der Erbinformation, all diese Abläufe werden zumeist von Enzymen bewerkstelligt. Sie wirken als Katalysatoren von chemischen Reaktionen, die ohne ihre Anwesenheit nur unter anderen Reaktionsbedingungen, etwa durch die Zufuhr von Hitze oder erhöhtem Umgebungsdruck, ablaufen würden. Enzyme bewirken viele chemische Reaktionen bereits bei Normalbedingungen. Ohne Enzyme als potente und vielfältige Biokatalysatoren gäbe es das uns bekannte Leben auf der Erde nicht. Enzyme lassen sich als vielfältige Werkzeuge nutzen, um mannigfaltige biobasierte Produkte umzubauen, abzubauen oder zu veredeln. So sind sie etwa unverzichtbare Helfer in der Lebensmittelherstellung. Aber auch in technischen Anwendungen der Chemie-, Pharma- und Papierindustrie übernehmen die Multitalente zentrale Aufgaben. Aktuell werden derzeit mehrere Hundert Enzyme

industriell genutzt und in der Produktion eingesetzt. Auch in der molekularbiologischen Forschung und der Züchtung haben Enzyme als Werkzeuge ihren festen Platz. Biotechnologen setzen dabei nicht mehr nur auf natürlich vorkommende Enzyme. Mithilfe neuester Erkenntnisse und Technologien können sie Enzyme als neuartige Biokatalysatoren designen. Da sich zumindest komplexere Enzyme üblicherweise in funktionelle Teileinheiten von definierter Funktionalität untergliedern (Domänen), lassen sich diese Funktionalitäten rearrangieren.

Zellen auf Höchstleistung trimmen

Eine wahre Schatzkiste an bisher unbekanntem Funktionalitäten stellt die natürliche Biodiversität dar. Bisher ist nur ein Bruchteil der mikrobiellen Artenvielfalt auf der Erde erfasst, auch weil sich viele Mikroorganismen ohne spezielles Wissen nicht kultivieren lassen oder bisher nicht kultivierbar sind. Daher wurden Stammsammlungen oder sogenannte Genbibliotheken aufgebaut, die mithilfe von speziellen Testverfahren nach neuen Eigenschaften durchsucht werden können. Auch die Fortschritte in der Genomforschung helfen, die enorme natürliche Vielfalt zu erschließen. Wird ein Organismus mit einer vielversprechenden und bisher unbekanntem Funktionalität entdeckt, so kann er im Labor kultiviert und für die industrielle Produktion optimiert und auf Höchstleistung getrimmt werden. Dazu züchten Biotechnologen die Organismen weiter, bis sie die gewünschten Enzyme und Stoffwechsellleistungen optimal an die Anforderungen des jeweiligen technischen Produktionsprozesses angepasst haben.

Mithilfe gentechnischer Methoden lässt sich etwa der veränderte molekulare Bauplan eines gewünschten Enzyms zudem in andere Bakterien einschleusen. Auf diese Weise werden diese Bakterien darauf programmiert, fortan das hinzugefügte Enzym in hoher Ausbeute und Reinheit herzustellen. Das geht soweit, dass komplette Stoffwechselwege gezielt verändert oder neu konstruiert werden und in andere Mikroorganismen transferiert werden können – die Fachwelt spricht hier vom sogenannten Metabolic Engineering. In den vergangenen Jahren sind viele neue molekularbiologische Werkzeuge entdeckt und nutzbar gemacht worden, die den Biotechnologen und Bioingenieuren helfen, Produktionsorganismen mit besonderen Eigenschaften zu entwickeln.

Zellen



Bakterien

Beispiele: *Escherichia coli* – gut erforschtes Modell und Arbeitstier der Biotechnologie (Foto); *Corynebacterium glutamicum* – Aminosäureproduzent; *Bacillus subtilis* – Enzymproduzent

Merkmale: Bakterien sind einzellige Mikroorganismen ohne Zellkern und mit einem ringförmigen Chromosom. Ihre Zellwand unterscheidet sich stark von der pflanzlicher und tierischer Zellen. Dank ihrer vielfältigen Stoffwechsellösungen nutzen sie viele Typen von Biomasse als Nahrung und wandeln sie in organische Stoffe um. Einige Bakterien betreiben Photosynthese und produzieren Biomasse, so etwa Cyanobakterien und Purpurbakterien. Neben dem Chromosom besitzen Bakterien weiteres genetisches Material in Form kleiner DNA-Ringe (Plasmide), die sie untereinander austauschen können.

Verwendung: Traditionell werden Bakterien zum Konservieren und Veredeln von Lebensmitteln und Tierfutter genutzt. Sie sind Modelle der molekularbiologischen Forschung. Als Produktionsorganismen dienen sie der industriellen Herstellung von Chemikalien und Wirkstoffen.



Pilze

Beispiele: Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* – Herstellung von Backwaren, Wein, Bier, Bioethanol; *Aspergillus niger* – Zitronensäure-Produzent; Pinselschimmel *Penicillium chrysogenum* – Antibiotika-Produzent

Merkmale: Pilze sind einzellige oder mehrzellige Organismen. Sie sind sesshaft und können keine Photosynthese betreiben. Daher müssen sie sich durch die Aufnahme organischer Substanzen ernähren (Heterotrophie), die sie aus der Umgebung aufnehmen. Pilze sind bedeutsam für den Abbau organischer Materie auf der Erde. Das ist notwendig, um die großen Stoffkreisläufe in der Natur aufrechtzuerhalten.

Verwendung: Die zu den Pilzen zählenden Hefen werden traditionell in der Lebensmittelherstellung eingesetzt. Sie vergären verschiedene Zucker zu Alkoholen und Kohlendioxid (CO₂). Zugleich sind sie wichtige Modelle der molekularbiologischen Forschung. Manche Pilze stellen Antibiotika her. Hefen und Schimmelpilze sind zudem wichtige Produktionsorganismen für die Pharmazie.



Mikroalgen

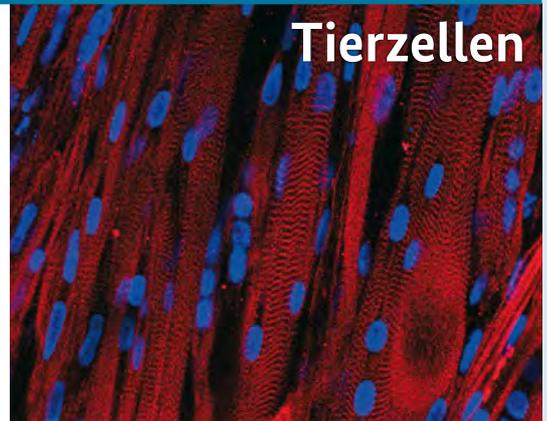
Beispiele: *Chlorella vulgaris* – Produzent von Lebensmittelzusätzen, *Clamydomonas reinhardtii* – Modellalge; *Dunaliella salina* – Beta-Carotin-Produzent; Grünalge *Haematococcus pluvialis* – Produzent des roten Farbstoffs Astaxanthin (Foto)

Merkmale: Zu den mikroskopisch kleinen, meist einzelligen Mikroalgen gehören alle Kieselalgen und Cyanobakterien (Blaualgen), viele Grünalgen, aber auch einige Rotalgen. Ihre Energie gewinnen sie, indem sie per Photosynthese Sonnenlicht und CO₂ in organische Verbindungen (Zuckermoleküle wie Glucose) umwandeln. Sie ernähren sich meist autotroph (selbsternährend aus anorganischen Stoffen) und leben im Salz- und oder Süßwasser. Mikroalgen vermehren sich schnell und sind sehr produktiv. Ihre Kultivierung in geeigneten Anlagen (etwa Photobioreaktoren, also Bioreaktoren mit Beleuchtung) benötigt kein Ackerland.

Verwendung: Mikroalgen werden zur Gewinnung von Farbstoffen, Proteinen, Vitaminen und Nahrungsergänzungsmitteln eingesetzt. Sie liefern Substanzen für den Einsatz in der Kosmetik und produzieren Biokraftstoffe und Biogas, Düngemittel und Fischfutter.

Merkmale: Tierische Zellen werden aus Geweben von Tieren gewonnen und im Labor in Zellkulturgefäßen kultiviert. Für den Einsatz in tierischen Zellkulturen werden unbegrenzt vermehrungsfähige Zellen benötigt. Hierfür eignen sich nicht-ausdifferenzierte tierische Zellen, die sogenannten Stammzellen oder mutierte immortalisierte Zellen (unsterblich). Während Stammzellen immer wieder neue Stammzellen hervorbringen und sich in spezialisierte Zelltypen ausdifferenzieren können, haben immortalisierte Zellen ihre natürliche Teilungskontrolle verloren und vermehren sich ungebremst. Zelllinien beider Zelltypen sind die Basis für Zellproduktionssysteme.

Verwendung: Tierzellen dienen als Produktionssysteme für die Herstellung von Biopharmazeutika und als Testsysteme zur Prüfung von Substanzen in diagnostischen Tests. Darüber hinaus sind Stammzellen Zellquelle für die Gewebezüchtung und den Organersatz.



Tierzellen

Beispiele: Hamsterzelllinie CHO – Biopharmazeutika-Produktion; Insektenzellen – Produktion von Proteinen

Merkmale: Aus pflanzlichen Geweben lassen sich sogenannte Pflanzenzellkulturen erschaffen. Hierbei befinden sich pflanzliche Zellen vereinzelt in einer Flüssigkultur oder auf speziellen Trägermaterialien. Sie können in dieser Form unter für sie geeigneten Bedingungen über lange Zeiträume kultiviert werden. Aus einzelnen Pflanzenzellen lassen sich dann nach Bedarf auch wieder intakte pflanzliche Gewebe und ganze Pflanzen regenerieren. Pflanzenzellen produzieren eine große Vielfalt interessanter Naturstoffe. Sie lassen sich zudem als Produktionssysteme für diverse Stoffe einsetzen.

Verwendung: Die Pflanzenzellkultur kommt in der Grundlagenforschung und in der Pflanzenzüchtungsforschung zum Einsatz. Sie erlaubt die schnelle Reproduktion von Gesamtpflanzen aus einzelnen Zellen. Pflanzenzellen sind zudem Produktionssysteme für die Herstellung von pharmazeutischen Wirkstoffen.

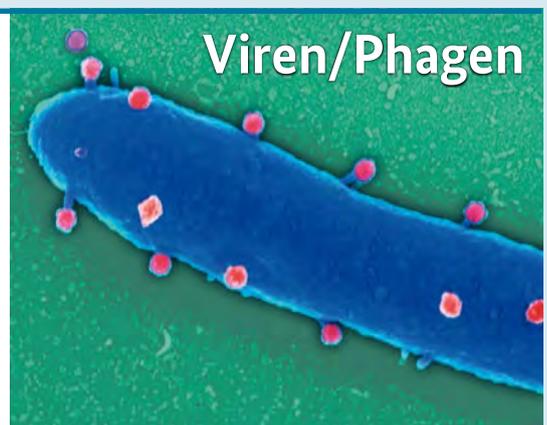


Pflanzenzellen

Beispiele: Eibenzellkulturen – Produktion des Krebsmittels Paclitaxel; Moos *Physcomitrella patens* – Produzent für Biopharmazeutika; Wasserlinse *Lemna minor* – Produzent für Futtermittel und Biotreibstoff; Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* (Foto)

Merkmale: Viren sind winzige, infektiöse Partikel. Es sind Gebilde, die zumeist aus Nukleinsäuren und Proteinen bestehen. Da Viren über keinen eigenen Stoffwechsel verfügen, werden sie üblicherweise nicht als Lebewesen klassifiziert. Zur Vermehrung dringen Viren in die Zellen eines Wirts ein. Dort reprogrammieren sie dessen Stoffwechsel, um neue Viren zu produzieren. Sogenannte Phagen sind Viren, die spezifisch und selektiv Bakterien angreifen und ihre Zellwand mithilfe lytischer Proteine zerstören.

Verwendung: Viren sind wichtige Werkzeuge in der Molekulargenetik und der Biotechnologie. Sie werden als sogenannte Genfähren eingesetzt, um artfremde Erbsubstanz in Zellen zu schleusen und diese dadurch genetisch zu verändern. Phagen dienen als mögliche Waffe im Kampf gegen antibiotikaresistente Keime, etwa unter Einsatz ihrer lytisch wirkenden Proteine.



Viren/Phagen

Beispiele: Bakteriophage Lambda als Genfähre mit *E.coli* als Wirt; Tabakmosaikvirus – Genfähre in Pflanzenbiotechnologie; Adenoviren – Genfähre für Gentherapie humaner Zellen; Phagen (im Foto rot) zur Therapie von *Pseudomonas aeruginosa*

Biomoleküle



DNA

Beispiele: Die DNA als Objekt und Ausgangsmaterial der Genomforschung und der molekularen Biotechnologie sowie molekulare n Diagnostik

Merkmale: Die Desoxyribonukleinsäure (DNA) ist der Träger und Speicher der Erbinformation eines Lebewesens oder eines Virus. Die DNA ist ein doppelsträngiges Biomolekül mit einer dreidimensionalen Leiter-Helix-Struktur. Die Abfolge ihrer chemischen Bausteine, der Nukleotide mit vier verschiedenen Basen (A, T, G, C) kodiert die genetische Information. Die DNA enthält die Baupläne für die Proteine sowie für regulatorische und enzymatisch aktive RNA-Moleküle.

Verwendung: Die DNA ist wie eine Bau- und Betriebsanleitung für Zellen und Organismen. Sie lässt sich mit modernen, molekularbiologischen Methoden analysieren. Sie ist das Schlüssel-molekül für die molekulare Biotechnologie, da mit ihr die Eigenschaften von Zellen und Organismen gezielt verändert werden können, die wiederum in der biotechnologischen Produktion in Bioreaktoren genutzt werden.

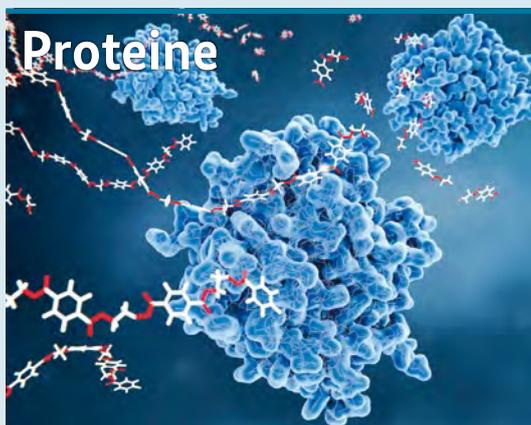


RNA

Beispiele: Vermessung der mRNA-Moleküle in einer Zelle für Genaktivitätsanalysen (Transkriptomanalysen); mRNA-Impfstoffe gegen Infektionskrankheiten und Krebs; RNA-Interferenz-Verfahren zur gezielten Inaktivierung von Genen

Merkmale: Eine Ribonukleinsäure (RNA) ist in der Regel ein einsträngiges Nukleinsäuremolekül. Im Vergleich zur DNA enthält es Ribose statt Desoxyribose als Zuckeranteil. RNAs üben in der Zelle vielfältige Funktionen aus. So ist die Boten-RNA (*messenger RNA* – mRNA) eine Abschrift der DNA-Sequenz. Sie enthält Instruktionen für die Herstellung von Proteinen und übermitteln sie an die Proteinfabriken der Zelle. Die Menge, das Vorkommen und die Art von mRNAs spiegeln wider, welche Gene in einer Zelle aktiv sind. Die Gesamtheit aller zellulären RNAs wird Transkriptom genannt.

Verwendung: Die Analyse, Herstellung und der Einsatz von RNA ist wichtig für Genomforschung, Biotechnologie und molekulare Medizin – etwa als therapeutische Wirkstoffe. Mithilfe der sogenannten RNA-Interferenz kann die Aktivität spezifischer Gene in Organismen reguliert werden.



Proteine

Beispiele: Enzyme im Waschmittel und der Lebensmittelproduktion; Peptidhormon Insulin als Therapie für Diabetiker, DNA-Endonuklease Cas9 (Genschere); PETase-Enzym – katalysiert den Abbau von PET-Plastik (Illustration)

Merkmale: Proteine sind zumeist große biologische Moleküle mit einem hohen Molekulargewicht. Sie bestehen aus einer Abfolge von Aminosäuren. Die spezifische Abfolge der Aminosäuren im Protein bestimmt dessen 3D-Struktur und damit letztendlich Funktionalität und Aktivität. Proteine übernehmen in Zellen und Organismen vielfältige Aufgaben: Sie bilden Zellstrukturen aus (Cytoskelett), wirken als Katalysatoren von Stoffwechselreaktionen (Enzyme), transportieren Substanzen (Transportproteine) oder erkennen Reize (Rezeptoren/Sensoren).

Verwendung: Enzyme sind bedeutende katalytische Spezialwerkzeuge der Biotechnologie. Vielfach sind sie auch Produkte des jeweiligen biotechnologischen Prozesses. Biotechnisch erzeugte Proteine werden als Medikamente eingesetzt und spielen in zahlreichen biochemischen Testverfahren eine Rolle.

Molekulare Biotechnologie

Die molekulare Biotechnologie beschäftigt sich mit der Gewinnung und der Konstruktion von Biomolekülen für Anwendungen in Wissenschaft und Wirtschaft. In der molekularen Biotechnologie steht insbesondere genetisches Material wie DNA und RNA im Mittelpunkt, auch um damit Proteine mit spezifischen Eigenschaften herzustellen. Diese Zusammenfassung gibt einen Überblick über die Werkzeugpalette der molekularen Biotechnologie:

DNA vervielfältigen: Ein häufig verwendetes Kopierverfahren für DNA ist die **Polymerase-Kettenreaktion** (*Polymerase Chain Reaction* – PCR). Sie erlaubt es, sehr geringe Mengen eines bestimmten DNA-Abschnitts zu vervielfältigen, bis er in gut nachweisbarer Konzentration vorliegt und einen Nachweis in visueller Form oder in weiteren, höhere Ausgangsmengen erfordernden molekularbiologischen Experimenten erlaubt. Der Nachweis der Nukleinsäuren des SARS-CoV-2-Erregers erfolgt beispielsweise mithilfe eines PCR-basierten Tests.

DNA im Reagenzglas bearbeiten: Damit man DNA im Labor bearbeiten kann, wird sie aus Organismen isoliert oder sie wird chemisch synthetisiert. Zur Lagerung, Vervielfältigung und weiteren Verwendung in Experimenten wird sie in stabile Plasmide eingefügt. Diese **Plasmide**, auch Vektoren genannt, sind extrachromosomale DNA-Ringe und lassen sich je nach Beschaffenheit wiederum in eine Vielzahl Bakterien oder andere Organismen einschleusen. Sie werden an die entsprechenden Nachkommen ihrer Trägerorganismen weitervererbt. Auf diese Weise kann man DNA-Moleküle vervielfältigen und über Genscheren (sogenannte Restriktionsenzyme) weiter analysieren, bearbeiten und neu zusammensetzen. Neben Plasmiden werden auch weitere ähnliche Strukturen eingesetzt, die größere DNA-Fragmente beherbergen können (Cosmide, Bakterielle Artificielle Chromosomen – BACs).

DNA gezielt verändern: Mithilfe der vor mehr als 40 Jahren entdeckten **Restriktionsenzyme** (präziser: Restriktionsendonukleasen) lässt sich DNA in Experimenten im Reagenzglas (*in vitro*) schneiden und durch das Entfernen arteigener oder Einfügen artfremder DNA-Sequenzen umschreiben und somit umfunktionieren. Das Verbinden (Ligieren) der DNA-Fragmente geschieht mithilfe von DNA-Ligasen. Das Schneiden der DNA durch Restriktionsenzyme erfolgt je nach Typ (Typ

I und Typ II-Restriktionsendonukleasen) an kurzen häufig palindromischen DNA-Sequenzen. Jedes Enzym weist dabei eine charakteristische Erkennungssequenz, Schnittstelle und Schnittmuster auf. Mit der herbeigeführten Sequenzänderung der DNA wird so zum Beispiel die Aminosäure-Abfolge des kodierten Proteins gezielt verändert. Vor wenigen Jahren hinzugekommen sind die **Designer-Nukleasen**. Die im aktuellen Fokus der wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Aufmerksamkeit stehenden **zielgerichteten Genscheren** stellen eine Sonderform der Restriktionsendonukleasen dar. Auch sie besitzen eine DNA-Sequenz-Aufspür-Einheit und eine DNA-Schneidfunktion. Mithilfe dieser Genscheren lässt sich Erbinformation auch in lebenden Zellen gezielt schneiden und verändern. Dieses potente Verfahren wird **Genom-Editierung** genannt. Die Erkennungssequenz der Designer-Nukleasen kann darauf „programmiert“ werden, einen beliebigen frei zu bestimmenden Ort im Genom von Organismen anzusteuern und dort einen ganz gezielten Schnitt zu setzen. Die derzeit bekannteste Genschere ist **CRISPR-Cas**.

Proteine erzeugen: Dank moderner Verfahren lassen sich DNA-Stränge heute auch chemisch im Labor von Synthese-Automaten Molekül für Molekül zusammensetzen und in vorhandene DNA-Sequenzen einfügen. Richtig eingesetzt, können gentechnische bzw. molekularbiologische Verfahren dazu genutzt werden, um die Erbsubstanz von Zellen zu verändern und die Zellen dazu zu veranlassen, spezifische vom Experimentator gewünschte Proteine gezielt herzustellen: Dazu wird die entsprechende DNA als der molekulare Bauplan eines Enzyms in Zellen eingeschleust und die korrespondierende mRNA wird an den Ribosomen zur Herstellung des gewünschten Proteins eingesetzt. Zur Optimierung der Funktionalität von Enzymen mit Blick auf ihre Reaktionseigenschaften unter verschiedenen Umgebungen (zum Beispiel Temperatur, pH-Wert, Wasserlöslichkeit) wird **Protein Engineering** betrieben. Dieser Begriff beschreibt einen Methoden-Mix, der zum Austausch von Aminosäuren des Enzyms führt und die enzymatischen Eigenschaften für den Einsatz in bestimmten Prozessen optimiert. Konsequenz und geplant angewendet können mithilfe dieser Techniken Zellen und Organismen zu Höchstleistungen im Sinne einer biotechnologischen Anwendung und Produktion getrimmt werden.



Züchten und archivieren

Neben Mikroorganismen stehen insbesondere grüne Pflanzen als Ressourcen im Fokus der Bioökonomie und der Biotechnologie. Die Pflanzenzüchtungsforschung ist der Teilbereich der Lebenswissenschaften, der sich mit der Züchtung ertragreicher und widerstandsfähiger Nutzpflanzen beschäftigt. Die Werkzeugkiste der Pflanzenzüchter hat sich in den vergangenen Jahrzehnten stark vergrößert. Tausende Jahre lang betrachteten Züchter allein die „äußeren“ Merkmale ihrer Pflanzen (Phänotyp). Heute prägt der Blick ins Erbgut, angetrieben von Genomforschung und Biotechnologie, die Innovationen in der Pflanzenzüchtung. So entstehen Pflanzen, die gezielter an den Klimawandel anpassen sind und zugleich hohe Ernteerträge liefern.

Vor 10.000 Jahren hat der Mensch begonnen, Wildpflanzen auszuwählen, sie nutzbar zu machen und anzubauen. Dabei wurden solche Pflanzen ausgesucht und vermehrt, die gewünschte Eigenschaften aufwiesen, also vor allem gute und sichere Erträge unter den jeweils vorherrschenden Anbaubedingungen erbrachten. Dieser Prozess dauerte oft sehr lange und unsere Vorfahren verstanden lange Zeit nicht, auf welchen

physiologischen Grundlagen ihre Züchtungserfolge beruhten. Erst die Entdeckungen und Innovationen der Genetik und der Molekularbiologie haben es ermöglicht, das äußere Erscheinungsbild einer Pflanze in Zusammenhang mit den zugrundeliegenden molekularen Vorgängen zu bringen und die Eigenschaften von Pflanzen gezielt und unter erheblich geringerem Zeitaufwand zu verändern. Um zu neuen Kulturpflanzen zu gelangen, die ertragreich und zugleich widerstandsfähig gegen Krankheiten, Schädlinge und extreme Witterung sind, sind drei Schritte zentral: Zunächst geht es darum, die genetische Vielfalt zu erhöhen (Variation) – zum Beispiel, indem Pflanzen mit verschiedenen vorteilhaften Eigenschaften miteinander gekreuzt werden. Dann werden unter den Nachkommen diejenigen mit den gewünschten Eigenschaften ausgewählt (Selektion). Die per Auslese gewonnenen Pflanzen werden dann in einem dritten Schritt weiter vermehrt und auf die zuverlässigen Eigenschaften geprüft. Am Ende des Prozesses steht eine neue Sorte.

Fortschritte in der Pflanzengenomforschung

Die Züchtung per Auslese wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts durch die gezieltere, wissenschaftliche

Pflanzenzüchtung abgelöst. Sie kombiniert neueste Erkenntnisse aus der angewandten Genetik und Molekularbiologie mit Methoden der modernen Agrartechnik sowie nachhaltigem Bodenmanagement. Neben dem Kreuzen von Pflanzen wurden Veränderungen im Erbgut von Nutzpflanzen auch künstlich ausgelöst. Die klassische Mutagenese bediente sich dabei chemischer Substanzen oder physikalischer Methoden, um an zufälligen Orten im Erbgut Veränderungen auszulösen. Damals musste eine große Menge an genetisch zufällig veränderten Nachkommen erzeugt werden, um in weiteren Schritten dann diejenigen Pflanzen zu identifizieren, die die gewünschten Merkmale ausprägten. Oftmals mussten dabei mehrere Runden aus Mutation und Selektion durchlaufen werden, um den gewünschten Züchtungserfolg zu erzielen. Dieser Prozess war arbeits- und zeitintensiv. Durch die Fortschritte der Molekulargenetik, vor allem bei der Erbgutanalyse, haben sich die Methoden der molekularen Pflanzenzüchtung in den vergangenen Jahrzehnten enorm weiterentwickelt. Die Verfahren zur Sequenzierung von Erbinformation ermöglichen es zum Beispiel, selbst komplexe und riesige Genome, wie sie gerade für viele Nutzpflanzen wie Weizen und Gerste typisch sind, schnell und kostengünstig zu analysieren. Auf der Basis solcher Datensätze können die Ausleseprozesse deutlich effizienter als bisher gesteuert und vorangetrieben werden.

Molekulare Züchtungsverfahren im Fokus

Zugleich steht Forschenden heutzutage eine Fülle von Analyse-Werkzeugen zur Verfügung, mit denen sich Prozesse in Zellen, Stoffwechselprodukte und die Funktion einzelner Gene untersuchen lassen. Auf diese Weise können Molekularbiologen interessante Merkmalsausprägungen bei Pflanzen (Phänotyp) mit bestimmten Abschnitten im Genom (Genotyp) in Verbindung bringen. Zudem hilft die exakte Kenntnis des genauen Aufbaus des Genoms dabei, das Erbgut mithilfe sogenannter Marker, also molekularen Orientierungsposten, abzustecken. Solche Marker – Chromosomenbereiche, Genregionen oder einzelne Gene – werden in der Regel gemeinsam mit einem gewünschten Merkmal vererbt. Molekulare Marker sind deshalb für die sogenannte Präzisionszüchtung, auch Smart Breeding genannt, von zentraler Bedeutung. Hierbei werden Nachkommen gekreuzter Pflanzen bereits in sehr frühem Stadium ihrer Entwicklung in molekulardiagnostischen Tests überprüft. Sind be-

stimmte Marker in den Pflanzen nachweisbar, deutet das darauf hin, dass die untersuchten Nachkommen die gewünschte Genvariante tatsächlich geerbt haben. Durch den gezielten Erbgut-Check kann bereits bei jungen Pflanzen oder Keimlingen festgestellt werden, welche von ihnen für die Weiterzucht geeignet sind. Der Züchtungsaufwand konnte hierdurch in den vergangenen Jahren bereits erheblich verringert werden. Manche Züchtungsziele lassen sich mittels der zuvor beschriebenen Kreuzungsverfahren nicht erreichen, da die jeweilige Pflanzenart nicht über die gewünschten Eigenschaften verfügt. Diese Herausforderung wird mithilfe der grünen Gentechnik seit den 1980er Jahren adressiert.

Mithilfe der klassischen grünen Gentechnik können artfremde Gene in das Erbgut von Pflanzen eingeschleust werden, die grundsätzlich aus jedem beliebigen Organismus stammen können. In der nachfolgenden Generation fügen Züchter dann zusätzliche Merkmale hinzu, zum Beispiel zur Produktion gewünschter Inhaltsstoffe, um die Nahrungs- oder Futterqualität zu steigern. Während beim Einsatz klassischer Methoden der Gentechnik neue Gene nur an zufälligen Orten ins Erbgut einer Pflanze eingefügt werden können, haben sich mit der Entwicklung zielgerichteter Genschere neue Möglichkeiten eröffnet (vgl. S. 11). Besonders die CRISPR-Cas-Technologie hat die Forschungslabore rund um die Welt im Sturm erobert. Mit den neuen Präzisionswerkzeugen wird eine gezielte Mutagenese möglich. Züchter erhalten so wesentlich schneller und zielgerichteter als bisher ertragreiche Nutzpflanzensorten, die besser gegen Schädlinge, Krankheiten oder Wetterextreme gewappnet sind und weniger Dünge- und Pflanzenschutzmittel benötigen. Molekulare Züchtungsverfahren können daher einen wichtigen Beitrag für eine Bioökonomie leisten, die Lösungen für die Welternährung, Ressourcennutzung und den Klimawandel bereitstellt.

Biologische Vielfalt bewahren

Für eine nachhaltige Züchtung neuer Nutzpflanzensorten ist genetische Vielfalt von großer Bedeutung. In „alten“ Pflanzensorten und in Wildformen schlummert diese Vielfalt. In sogenannten Genbanken werden Samen und Gewebe von Tausenden Pflanzen langfristig gelagert – sie sind Archive der globalen Biodiversität, die für mehr Vielfalt auf den Äckern der Zukunft sorgen können.

Züchten und archivieren

Hybridzüchtung



Beispiele: Standard bei Mais (Foto); verbreitet bei Roggen, Zuckerrübe, Raps, Sonnenblume und Tomaten; noch selten bei Weizen

Merkmale: Die Hybridzüchtung beruht auf der Kreuzung genetisch möglichst unterschiedlicher Elternlinien einer bestimmten Pflanzenart. Als Folge erhält man Nachkommen (Hybride), die besonders kräftig im Wuchs, widerstandsfähiger und ertragreicher sind als herkömmliche Pflanzen. Dieser Effekt wird Heterosis genannt. Er geht bei den Nachkommen der Hybride wieder verloren. Die molekularen Ursachen der Heterosis sind noch nicht vollumfänglich verstanden.

Verwendung: Viele Nutzpflanzen-Sorten sind durch Hybridzüchtung entstanden. Hybridsaatgut muss immer wieder neu von den Züchtern hergestellt werden.

Präzisionszüchtung/ Smart Breeding



Beispiele: Resistenzzüchtung bei Kartoffeln und Sonnenblumen; Sortenzüchtung bei Tomaten

Merkmale: Diagnostisches Verfahren, das molekulare Marker im Erbgut von Pflanzen nachweist, die gekoppelt mit gewünschten genetischen Eigenschaften vererbt werden. Durch den Erbgut-Check lässt sich viel schneller und zuverlässiger erkennen, ob eine Pflanze interessante Merkmale im Erbgut trägt oder nicht. Die Züchter müssen dadurch nicht mehr warten, bis die Pflanzen ausgewachsen sind, um sie anhand äußerlicher Merkmale auf das Vorhandensein der gewünschten Eigenschaft zu überprüfen.

Verwendung: Pflanzenbetriebe setzen Reihentests auf molekulare Marker routinemäßig zur Qualitätssicherung und für die Präzisionszüchtung neuer Sorten ein.

Zellkulturtechnik



Beispiele: Massenvermehrung von Kartoffel- und Erdbeersorten sowie tropischen Orchideen; Obstgehölze; beschleunigte Züchtung von diploiden Pflanzen aus haploiden Pollen (doppelt-haploide Pflanzen)

Merkmale: Aus pflanzlichen Gewebestücken oder teilungsfähigen Zellen lassen sich vollständige Pflanzen gewinnen. Dazu werden die Gewebe auf Nährböden und unter sterilen Bedingungen mit einem Phytohormon-Mix behandelt und kultiviert. Durch diese In-vitro-Vermehrung entstehen genetisch identische Ableger – sogenannte Klone.

Verwendung: Diese Labortechnologie eignet sich besonders zur Vermehrung von Pflanzen, die über andere Wege schwer zu vermehren sind.

Merkmale: Mithilfe gentechnischer Methoden wird Erbgut von Lebewesen eingeschleust. Das kann ein artfremder DNA-Abschnitt aus anderen Lebewesen sein, oder er stammt von der gleichen Art. Nach dem Gentransfer wird das Erbgut an zufälliger Stelle in das Genom eingebaut und abgelesen.

Verwendung: Mittels Gentransfer werden transgene Pflanzen für die Grundlagenforschung hergestellt. Zudem wird das Verfahren für die Züchtung gentechnisch veränderter Nutzpflanzen eingesetzt.



Beispiele: Soja mit gentechnisch eingeführter Herbizid-Toleranz; Mais mit gentechnisch eingeführter Resistenz gegen Schadinsekten (Produktion des Bt-Proteins); Goldener Reis mit neuer Gensequenz für Provitamin A

Merkmale: Dazu zählt vor allem die Genom-Editierung: Mithilfe programmierbarer Genschere lassen sich DNA-Abschnitte aus dem Erbgut lebender Zellen präzise ausschneiden und einfügen. So lassen sich gezielt Gene ab- oder anschalten, einfügen oder entfernen. Die bekannteste Genschere ist CRISPR-Cas.

Verwendung: Mit den neuen molekularen Züchtungstechniken lassen sich gezielt Veränderungen in das Erbgut von Nutzpflanzen einbringen. Die Verfahren sind effizient, schnell und kostensparend. Punktgenaue Veränderungen unterscheiden sich oft nicht von natürlich auftretenden Mutationen.



Beispiele: Mehlauresistenter Wein; glutenfreier Weizen; gegen den TR4-Pilz resistente Bananen, gegen mehrere Pilze resistenter Weizen (Foto)

Merkmale: Genbanken sind große Sammlungen von biologischem Material, in denen die genetische Vielfalt der Pflanzen und Tiere langfristig gelagert und erhalten wird. Bei Pflanzen werden zumeist Samen, bei Tieren Keimzellen archiviert.

Verwendung: Genbanken spielen eine bedeutende Rolle für den Erhalt der weltweiten biologischen Vielfalt. Sie sind wichtige Ressourcen für die Forschung und die Züchtung neuer Sorten.



Beispiele: Kulturpflanzen-Genbank in Gatersleben (Foto); Deutsche Genbank Zierpflanzen; Deutsche Genbank Obst; Leibniz-Institut DSMZ - Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH



Messen und analysieren

Das Vermessen und Analysieren von biologischen Prozessen ist für die Grundlagenforschung und die Anwendung in innovativen Prozessen und Produkten von großer Bedeutung. Hochempfindliche Messmethoden und Hochdurchsatzverfahren ermöglichen es, Biomoleküle in Zellen und Organismen aufzuspüren, mit höchster Präzision zu vermessen und in ihrer Gesamtheit zu erfassen.

Biologische Prozesse und die Wechselwirkungen von Biomolekülen sind äußerst komplex und noch dazu für das menschliche Auge unsichtbar. Um ihnen und ihrer Wirkungsweise auf die Spur zu kommen, werden in den Biowissenschaften zahlreiche leistungsstarke Messverfahren und Analyse-Werkzeuge eingesetzt. Sie erlauben es, biologische Prozesse in ihren molekularen Details zu beobachten und zu vermessen. Bioanalytische Messverfahren sind nicht nur für die biomedizinische und klinische Forschung – etwa für die molekulare Diagnostik und die Wirkstoffentwicklung – heute unverzichtbar. Auch die moderne Pflanzenzüchtung, die Lebensmittelindustrie oder die biopharmazeutische Industrie sind auf zuverlässige

Messungen angewiesen, um die Produktentwicklung zu optimieren und zu beschleunigen. So entstehen riesige Mengen biologischer Daten, die man computergestützt auswerten und interpretieren kann.

Schnelle Erbgut-Analysen

Fortschritte in der Molekularbiologie und Labortechnik waren für die Bioanalytik in den vergangenen Jahren wegweisend. Unter Omics-Technologien werden maschinengestützte Hochdurchsatzverfahren zusammengefasst, mit denen Biomoleküle wie DNA, RNA oder Proteine in einer biologischen Probe nahezu vollständig analysiert werden können. Moderne DNA-Sequenziermaschinen liefern immer schneller und günstiger Daten über die Zusammensetzung des Erbguts.

Durch den Einsatz von automatisierten und hochgradig parallelen Verfahren ist die Genom-Sequenzierung ein bioanalytisches Routineverfahren der Genomforschung (Genomik) geworden. Ähnliche Entwicklungen gibt es in der Protein-Analyse. In der Proteomik beschäftigen sich Forschende damit, die gesamte Vielfalt der Eiweißmoleküle in Zellen und

Organismen zu erfassen. Die Metabolomik wiederum vermisst die verschiedenen Stoffwechselprodukte (Metabolite) eines Organismus. Auch hierfür sind moderne Messverfahren elementar. Etwa die Massenspektrometrie, mit der sich chemische Verbindungen nicht nur erkennen, sondern auch quantifizieren lassen.

Trend zum Miniatur-Format

Die omics-basierte Forschung profitiert auch vom Trend zur Miniaturisierung und Automatisierung, der in den Lebenswissenschaften schon seit Langem im Gange ist. Immer häufiger werden Zellen oder Biomoleküle erfolgreich mit Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie kombiniert, um noch präzisere und schnellere Analysen von Bioprozessen durchzuführen. Dazu zählen Biochips, die auch Mikroarrays genannt werden. Hier sind winzige Proben von Biomolekülen auf Oberflächen aufgebracht. Biochips werden hierzu meist mit Erbsubstanz wie DNA, RNA oder Protein-Fragmenten bestückt. Sie können zum Beispiel wie ein Köder an einer Angel genutzt werden, um andockende Antikörper aus dem Blut von Patienten zu fischen.

Immer wichtiger wird zudem der Einsatz von Mikrofluidik: Hierfür werden Chips mit Mikrokanälen konstruiert, durch die winzige Tröpfchen oder Zellen geführt werden. Wie am Fließband können die Tröpfchen hier systematisch modifiziert, mit biologischen Komponenten gefüllt und vermessen werden.

Beispielhaft für eine Anwendung, die derzeit die Biowissenschaften revolutioniert, ist die Einzelzell-Analyse mithilfe von Mikrofluidik-Chips. Sequenzier-techniken der neuesten Generation erlauben es, selbst geringe Mengen an Erbsubstanz oder Proteine aus der einzelnen Zelle zu erfassen. So lässt sich beispielsweise messen, welche Gene zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer Zelle aktiv sind. Damit können Forschende das molekulare Profil einer Zelle ermitteln.

Den Trend zum Mini-Format spiegeln auch die sogenannten Organ-Chips wider. Hier wird Mikrosystemtechnik mit der Herstellung sogenannter Organoide kombiniert: Gemeint sind damit lebende 3D-Mini-Organsysteme, die mithilfe von Stammzellen gewonnen werden. Verschiedene solcher Mini-Organe lassen sich über einen Mikrokreislauf zu sogenannten

Multi-Organ-Chips miteinander kombinieren. So sollen künftig Miniatur-Modelle des menschlichen Organismus entstehen. Die Multi-Organ-Chips dienen beispielsweise als Prüfstände für die Pharma- und Kosmetikindustrie, um neue Substanzen zu testen. Das erlaubt aussagekräftige Studien über die Wirkweise von Substanzen und hilft, Tierversuche zu ergänzen und zu reduzieren.

Das Erscheinungsbild durchmustern

Die Erbinformation verrät zum Beispiel etwas über die genetische Ausstattung einer Pflanze oder eines Tieres. In der modernen Züchtung rückt aber auch der Phänotyp immer stärker in den Fokus. Dieser offenbart, wie sich die genetische „Innenausstattung“ tatsächlich in konkreten äußerlichen Merkmalen ausprägt.

Dies ist für Pflanzenzüchter – beispielsweise mit Blick auf die Wechselwirkung einer Pflanze mit ihrer Umwelt – von besonderer Bedeutung. In Phänotypisierungsanlagen werden Pflanzen vollautomatisiert in großer Stückzahl nach bestimmten Merkmalen durchmustert. Zum Einsatz kommen nicht-invasive Verfahren, die die Gewächse schonend analysieren – etwa bildgebende Verfahren wie Lichtmikroskopie, die Positronen-Emissions-Tomografie oder die Kernspinresonanz-Spektroskopie.

Biologische Systeme verstehen

Die genannten Hochdurchsatz-Analysetechniken liefern enorme Datenmengen über Lebensprozesse. Diese auszuwerten und zu verknüpfen, ist das Ziel der Systembiologie. Diese ganzheitliche Herangehensweise nutzt eine computergestützte Betrachtung molekularer Prozesse und strebt damit ein umfassendes Verständnis von Lebensvorgängen an.

Messen und analysieren

DNA-Sequenzierung

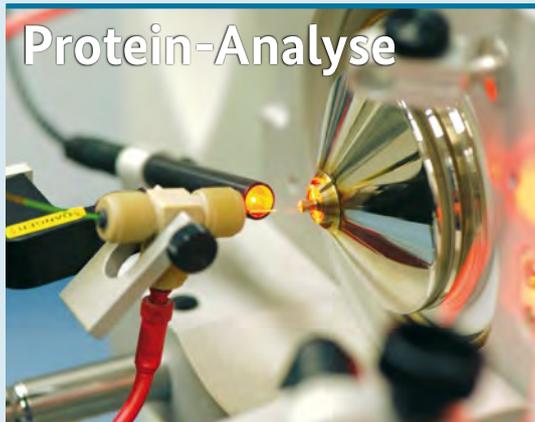


Merkmale: Maschinen ermitteln die Abfolge der Nukleotid-Bausteine in der Erbinformation DNA und entziffern so den Gen-Code. Moderne Hochdurchsatz-Sequenziergeräte können Milliarden Sequenzen gleichzeitig auslesen, die Sequenzdaten müssen dann bioinformatisch ausgewertet werden.

Verwendung: Die DNA-Sequenzierung ist ein molekularbiologisches Routineverfahren für die Erbgutanalyse – entweder von DNA-Bereichen oder der kompletten Erbinformation eines Organismus, dem Genom.

Beispiele: Humangenomprojekt; Genomprojekte bei Tieren, Pflanzen und Mikroorganismen; Abstammungsanalysen; Artenbestimmung; Forensik; molekulare Biotechnologie (Foto)

Protein-Analyse



Merkmale: Neben antikörperbasierten Tests wird für die Protein-Analyse die Massenspektrometrie eingesetzt, mit der man die Masse von Atomen und Molekülen bestimmen kann. Dazu werden Moleküle in Ionen aufgespalten. Anhand des Aufspaltungsmusters lassen sich chemische Verbindungen identifizieren und quantifizieren.

Verwendung: Massenspektrometrie-Analysen eignen sich, um die Existenz bestimmter Proteine nachzuweisen, für die Größenbestimmung und die Protein-Sequenzierung.

Beispiele: Massenspektrometrie-Analysen (Foto) zur Untersuchung der Struktur von Biomolekülen; Qualitätskontrolle bei Lebensmitteln; Umweltanalytik; Doping-Kontrollen

Omics-Technologien



Merkmale: Das Kürzel „Omics“ steht für Hochdurchsatz-Methoden, mit denen sich das Genom (Genomik), das Transkriptom (Transkriptomik), die Proteinausstattung einer Zelle (Proteomik) oder die Stoffwechselprodukte (Metabolomik) einer Zelle oder eines Organismus erfassen lässt.

Verwendung: Omics-Technologien werden für die Erstellung von physiologischen oder molekularen Profilen von Zellen, Geweben und Organismen eingesetzt. Hierbei entstehen große Datenmengen, die durch computerbasierte Verfahren für systemische Analysen und Anwendungen sinnvoll zugänglich gemacht werden.

Beispiele: Genomprojekte; Human Cell Atlas; Krebsforschung

Merkmale: Mikroskope machen Strukturen und Prozesse in lebenden oder fixierten Geweben oder Zellen sichtbar und sind unverzichtbare optische Analyse-Werkzeuge. Die Daten werden mittels bildgebender Verfahren dokumentiert und ausgewertet. Mit modernen Ansätzen der Mikroskopie und Bildgebung lassen sich heutzutage sogar Vorgänge in der lebenden Zelle in Echtzeit sichtbar machen.

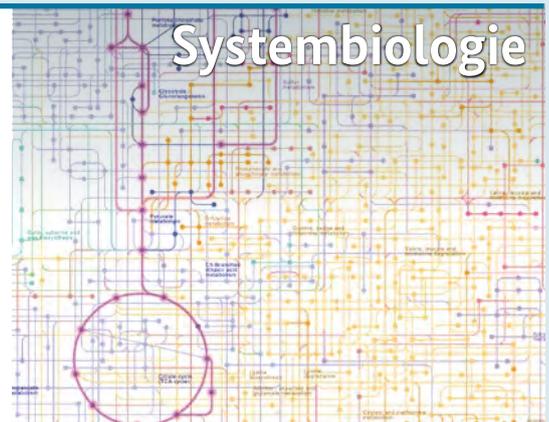
Verwendung: Mikroskope sind unverzichtbare Werkzeuge in der zellbiologischen und biochemischen Grundlagenforschung und in der Medizin. Farbstoffe und fluoreszierende Proteine erzeugen farbige Signale.



Beispiele: Lichtmikroskopie; Konfokales Laser-Scanning Mikroskop; ultrahochauflösende Fluoreszenzmikroskopie (STED); Raster-Elektronenmikroskopie; Cryo-Elektronenmikroskopie

Merkmale: Interdisziplinärer Forschungsansatz, der dynamische Lebensprozesse und komplexe biochemische Netzwerke in ihrer Gesamtheit analysiert und mithilfe computergestützter mathematischer Modelle beschreibt – von der Zelle bis zum Organismus.

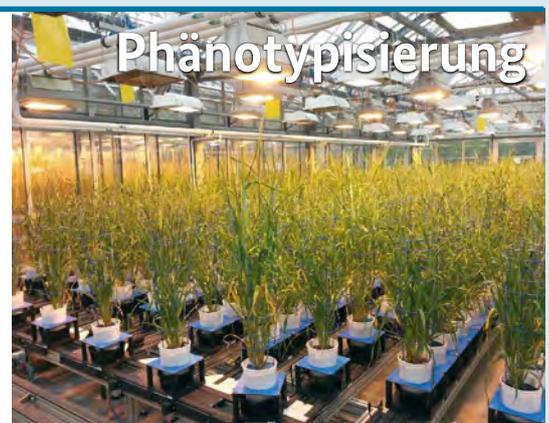
Verwendung: Mithilfe der mathematischen Modelle lassen sich Computer-Simulationen durchführen. Das ermöglicht präzise Vorhersagen über das Verhalten biologischer Systeme. Diese können im Laborexperiment überprüft werden.



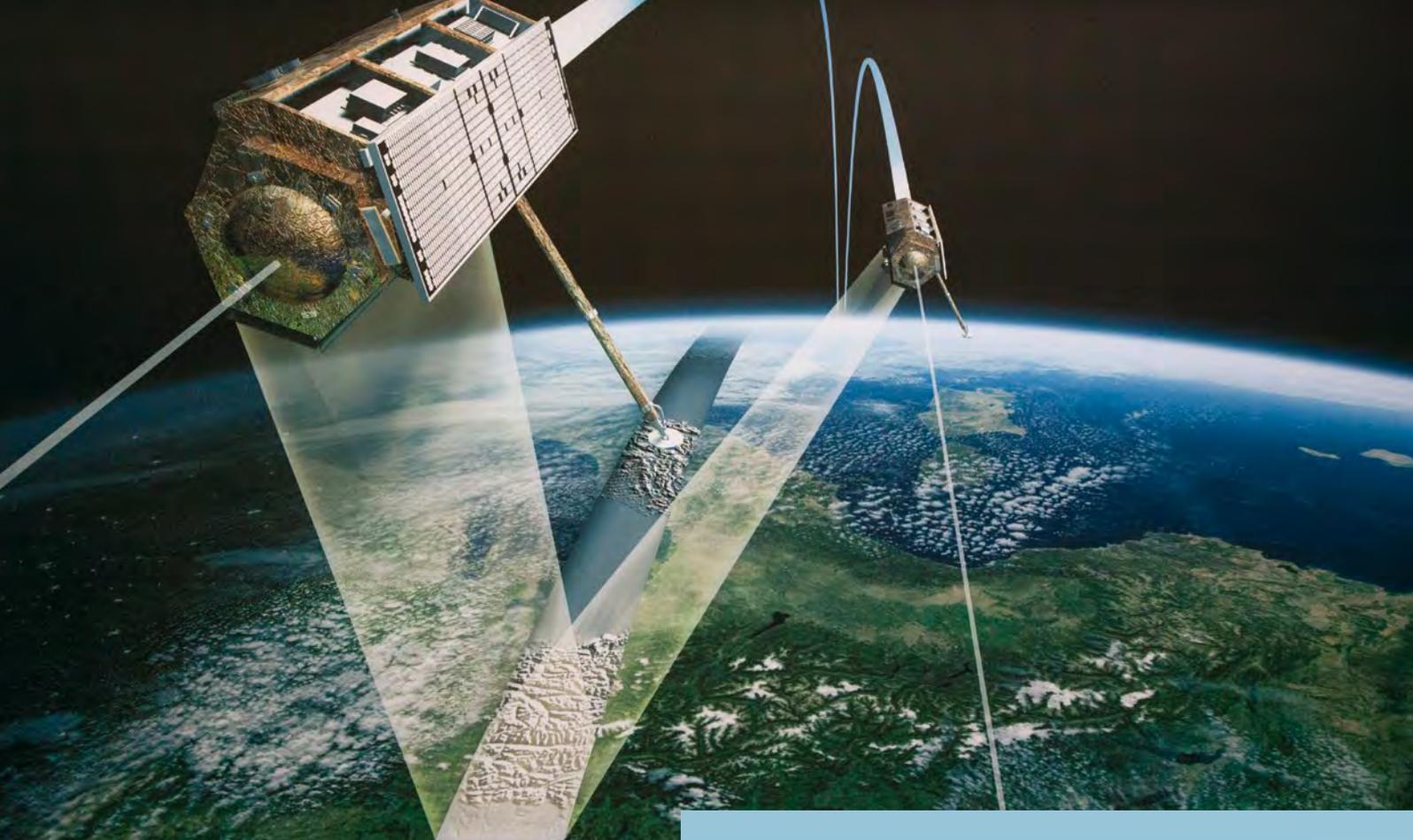
Beispiele: Optimierung von Mikroorganismen für industrielle Produktionsprozesse; Analyse und Design von Biosynthesewegen in der industriellen Biotechnologie; Pflanzenzüchtung; Krebsforschung

Merkmale: Vermessung des Erscheinungsbildes eines Organismus – dem sogenannten Phänotyp. Dazu zählen die Biomasse oder die Architektur einer Pflanze, aber auch Eigenschaften wie Stoffwechselaktivität und Wachstum.

Verwendung: In der Pflanzenforschung werden für die Phänotypisierung insbesondere bildgebende, nicht-invasive Verfahren eingesetzt, um neben Einzelpflanzen meist auch große Zahlen von Pflanzen mithilfe von Hochdurchsatz-Technologien zu vermessen.



Beispiele: Funktionelle Genomforschung und angewandte Züchtungsforschung am Deutschen Zentrum für Pflanzen-Phänotypisierung



Daten sammeln und nutzen

Biologische Daten sind neben Biomasse die bedeutendste Ressource für die Bioökonomie. Die Gewinnung von Daten und ihre Auswertung ist nicht nur für die Grundlagenforschung der Schlüssel zu biologischem Wissen. Die Digitalisierung aller Wirtschaftsbereiche ist in vollem Gange. Satelliten und Sensoren liefern immer neue Daten vom Acker, aus dem Stall oder dem Bioreaktor. Smarte Hard- und Software wird zum unverzichtbaren Helfer für die Datenanalyse und für die Gestaltung effizienter und ressourcenschonender Betriebsabläufe.

Die Digitalisierung hat die Grundlagenforschung und die Produktionsprozesse in Branchen wie der Landwirtschaft, der Lebensmittelindustrie, der Chemie und der Pharmaindustrie grundlegend verändert. Messtechnik und Sensoren liefern immer mehr Daten und machen diese Informationen in Echtzeit verfügbar. Bei der Auswertung der Datenflut helfen die enorm gestiegene Rechenpower der Computer sowie leistungsfähige Algorithmen – etwa auf der Basis von Künstlicher Intelligenz. Prozesse werden zunehmend automatisiert und sind intelligent vernetzt.

Digitalisierte Landwirtschaft

Am Beispiel der Landwirtschaft lässt sich beobachten, wie die Digitalisierung voranschreitet: 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. So können landwirtschaftliche Maschinen den Wasser- und Nährstoffbedarf der Feldfrüchte ermitteln. 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 Betriebsstoffe wie Dünger, Pflanzenschutzmittel und Saatgut sinken. Um der zunehmenden Bodenverdichtung durch große Maschinen entgegenzuwirken, eignen sich kleine, au-

tonom betriebene und GPS-gesteuerte Feldroboter oder Drohnen. Die Digitalisierung ebnet damit den Weg hin zu einer Präzisionslandwirtschaft, die ressourceneffizient und umweltschonend ist. Sie erlaubt zudem eine kleinteiligere Bewirtschaftung. Digitale Helfer unterstützen auch die Tierhaltung: Sensor- und Messtechnik hilft im Stall durch Aktivitätsmessung, bedarfsgerechte Fütterung, beim Melken oder bei der Überwachung des Gesundheitszustands der Tiere. Digitale Technologien bergen damit enormes Potenzial für eine schonende und nachhaltige Landbewirtschaftung und eine artgerechte Viehhaltung.

Mit digitalen Zwillingen zur Biofabrik

Automatisierung und Digitalisierung sind auch in Branchen wie der Chemie- oder Pharmaindustrie und der Biotechnologie wichtige Schrittmacher für die Entwicklung effizienter Herstellungsprozesse und innovativer neuer Produkte (vgl. *Kapitel Kreisläufe und vernetzte Welten*). Pipettierroboter und andere automatisierte Labortechnik übernehmen bereits heute zahlreiche Arbeitsschritte bei Wirkstoffsuche oder Zellkultivierung. Um komplexe biotechnische Produktionsprozesse effizienter und nachhaltiger zu gestalten, kommen innovative Sensortechnik und moderne Methoden der Datenanalyse und Modellierung zum Einsatz.

Ein Ziel ist eine kontinuierliche Beobachtung und Überwachung der Produktion, die höhere Prozesssicherheit und zuverlässig hohe Qualität garantieren soll. Diese Daten ermöglichen bestenfalls in Echtzeit Begutachtungen und Entscheidungen. Im Rahmen der Digitalisierung werden Produkte und Prozesse zunehmend in der virtuellen Welt entworfen, getestet und optimiert, bevor sie in der realen Welt hergestellt werden. Dafür werden die zukünftigen Produkte als Softwaremodelle erstellt und simuliert – als sogenannter digitaler Zwilling. Mithilfe virtueller Realität wird nicht nur der Entwicklungsprozess beschleunigt. Neue industrielle Bioprozesse können so je nach Wunsch besonders günstig, leistungsstark, robust oder umweltfreundlich gestaltet werden.

Datenberge erschließen und smart nutzen

Bioanalytische Verfahren und Hochdurchsatztechnologien wie die DNA-Sequenzierung sowie bildgebende Verfahren produzieren in immer kürzerer Zeit immer größere Mengen an Rohdaten. Bereits jetzt lassen

sich komplette Genome innerhalb weniger Stunden sequenzieren und neue Ansätze wie die Metagenomik oder die Einzelzell-Analyse liefern molekulare Informationen in nie dagewesener Detailfülle.

Moderne Bioinformatik-Werkzeuge sorgen für die Analyse und Auswertung dieser Datenberge und sind damit der Schlüssel zu biologischem Wissen und der Wertschöpfung in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft. Des Weiteren gibt es einen hohen Bedarf für neue Methoden zur mathematischen Modellierung und Simulation komplexer biologischer Systeme. Datenerhebungen und Analysen sind auch auf übergeordneter Ebene für das Verständnis von Ökosystemen, Klimaverläufen oder Wirtschaftssystemen wichtig.

Monitoring von Prozessen

Unter Monitoring versteht man das systematische Erfassen und Beobachten eines Prozesses mithilfe geeigneter Werkzeuge. In Bezug auf die Bioökonomie kann das die Entwicklung der Artenvielfalt in einer Region sein, der Verlauf von Biomasse-Stoffströmen oder wirtschaftliche Kennzahlen der Bioökonomie. Ein möglichst kontinuierliches Monitoring schafft eine Daten- und Wissensbasis, mit der sich Fortschritte, aber auch Fehlentwicklungen sichtbar machen lassen. Ein Monitoring zur Bioökonomie liefert daher Informations- und Entscheidungsgrundlagen, auf deren Basis auch politisches Handeln ausgerichtet und ein öffentlicher Diskurs geführt werden kann.

Daten sammeln und nutzen

Fernerkundung



Beispiele: Erdbeobachtungssatelliten Sentinel-1, Sentinel-2 und Sentinel-6 (Foto) aus dem ESA-Copernicus-Programm; Hyperspektralsatellit EnMAP

Merkmale: Fernerkundung ist das Beobachten und Erfassen von Objekten aus der Entfernung: Flugzeug- und satellitengetragene Sensoren liefern eine Vielzahl von Umweltdaten. Die Informationsgewinnung basiert meist auf der Auswertung elektromagnetischer Strahlung. Es entstehen zeitlich und räumlich hochaufgelöste Bilder der Erdoberfläche oder der Atmosphäre.

Verwendung: Fernerkundungsdaten sind eine wichtige Ressource für Bodenbearbeitung, Düngung oder Bewässerung in einer Präzisionslandwirtschaft. Zudem sind sie zentral für die Klimaforschung und die Meteorologie. Auch für das Biodiversitätsmonitoring werden Satellitendaten zunehmend eingesetzt.

Automatisierung/ Agrarindustrie 4.0



Beispiele: Agrarroboter BoniRob; Robotersystem CATCH für die Ernte von Einlegegurken (Foto); Robotik-Lösungen in der Milchwirtschaft – etwa Melksysteme

Merkmale: Die Digitalisierung der Landwirtschaft geht einher mit einer zunehmenden Automatisierung und intelligenter Vernetzung der Systeme. Robotiklösungen sind mit Sensoren und Messtechnik ausgestattet, mit denen sie ihre Umgebung wahrnehmen. Sie agieren in vielen Fällen bereits autonom.

Verwendung: In der Landwirtschaft finden Robotiklösungen Einsatz als Erntefahrzeuge, Pflanzroboter sowie Drohnen – unbemannte Fluggeräte – die Daten zu Bodenbeschaffenheit, Pflanzenwachstum und Witterungseinflüssen erfassen. Auch in der Tierhaltung kommen Robotik-Lösungen zum Einsatz.

Künstliche Intelligenz



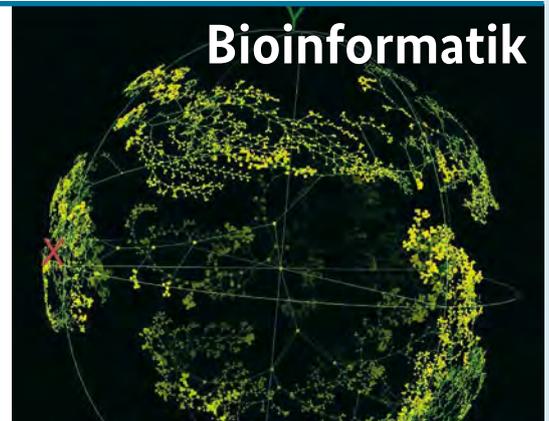
Beispiele: Landwirtschaft 4.0; Bioprozess-Analytik; Artenerkennung per Smartphone-App; Wirkstoffsuche in der Pharmaforschung

Merkmale: Künstliche Intelligenz (KI) ist eine Informatikanwendung, die einen Ausschnitt menschlicher Intelligenz nachahmen kann. Das Besondere ist die Fähigkeit zu lernen. Maschinen bearbeiten und lösen abstrakt beschriebene Aufgaben und Probleme eigenständig, ohne dass jeder Schritt vom Menschen programmiert wird. Die große Stärke von KI-Systemen ist die Mustererkennung.

Verwendung: KI kommt bei der Auswertung riesiger Datenmengen und für das Extrahieren zusammenhängender Informationen zum Einsatz. Wichtige Anwendungen sind die Bild-, Sprach- und Objekterkennung. Autonome Fahrzeuge und Roboter nutzen ebenfalls KI-Technologie.

Merkmale: Mit Methoden der Informatik und der Mathematik werden biologische Daten verwaltet und analysiert. Hochdurchsatz-Experimente liefern eine große Menge an Rohdaten, die mithilfe von Software-Werkzeugen ausgewertet werden.

Verwendung: Bioinformatik ist unverzichtbar für die Auswertung, Interpretation und Visualisierung von Daten aus DNA- und Genomsequenzierungen und Protein-Analysen. Auch für die Auswertung von Daten zur Strukturaufklärung von Biomolekülen kommen bioinformatische Werkzeuge zum Einsatz.



Beispiele: Genomprojekte; Mikrobiom- und Metagenomprojekte (Foto); systembiologische Analysen; Analysen von Virus-Mutationen in Pandemien; Deutsches Netzwerk für Bioinformatik-Infrastruktur (de.NBI)

Merkmale: Mithilfe mathematischer computergestützter Modellierung (vgl. *Systembiologie*) kann die künftige Entwicklung eines komplexen Systems auf Basis bestimmter Annahmen berechnet werden. Ein Szenario ist eine stichhaltige und häufig vereinfachte Beschreibung davon, wie die Zukunft sich gestalten könnte. Häufig wird eine Bandbreite an Entfaltungsmöglichkeiten betrachtet.

Verwendung: Anwendungsbeispiele sind Modelle in der Systembiologie, Wachstums- und Entwicklungsmodelle von Organismen, Stoffwechselmodelle sowie modellbasierte Systemanalysen.



Beispiele: Bioökonomie-Szenarien 2050; Klimafolgenforschung; globales Modell LandSHIFT – bildet für alle Kontinente die Landnutzung ab; globales Modell WaterGAP3 zur Wassernutzung

Merkmale: Unter Monitoring versteht man das systematische Erfassen, Messen und Beobachten eines Prozesses mithilfe geeigneter Werkzeuge. Das schafft eine Informations- und Entscheidungsgrundlage, um Veränderungen bewerten und steuern zu können.

Verwendung: Monitoring wird zum Erfassen der Artenvielfalt in der Biodiversitätsforschung eingesetzt. Auch die Überwachung von Bioprozessen im Bioreaktor zählt dazu. Für ein Bioökonomie-Monitoring werden Stoffströme von biobasierten Wirtschaftssektoren als Basis für Nachhaltigkeitsanalysen erfasst.



Beispiele: Gewässer-Monitoring zu den Auswirkungen des Klimawandels auf das Ökosystem Müggelsee (Foto); Insekten-Monitoring; Monitoring von Bioprozessen; Bioökonomie-Monitoring



Verarbeiten und produzieren

Aus nachwachsenden Rohstoffen lassen sich mithilfe von Zellen oder Enzymen hochwertige Produkte herstellen. Biotechnologische Verfahren halten in immer mehr Wirtschaftszweigen Einzug, um industrielle Produktionsprozesse effizienter und umweltschonender zu gestalten. In biotechnischen Produktionsanlagen kommt modernste Bioverfahrenstechnik zum Einsatz. Bioraffinerien sind die großen biotechnischen Fabrikanlagen der Bioökonomie – hier wird der Rohstoff Biomasse in seine Einzelteile zerlegt und in Chemikalien, Werkstoffe und Energieträger umgewandelt.

In einer biobasierten Wirtschaft ist eine möglichst nachhaltige und ressourceneffiziente Produktion das angestrebte Ziel. Die Vielfalt biobasierter Produktionssysteme ist groß. Am Anfang der Wertschöpfungskette steht die Primärproduktion. Aus der in Land- und Forstwirtschaft erzeugten Biomasse entstehen Lebensmittel oder die nachwachsenden Rohstoffe werden stofflich sowie energetisch genutzt. In den späteren Schritten der 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. Vom chemischen Grundbaustein, über Waschmittelenzyme, Aminosäuren, Biokunststoffe bis hin zum pharmazeutischen Wirkstoff – Verfahren der industriellen Biotechnologie liefern bereits heute eine große Palette an hochwertigen chemischen Produkten und Feinchemikalien. Zentral sind die Technologien der Bioverfahrenstechnik – Know-how aus den Naturwissenschaften und Ingenieurskunst gehen hier Hand in Hand. Das reicht vom Bioreaktor-Design über den Betrieb von Biogasanlagen bis hin zum Aufbau von Bioraffinerien als grüne Fabriken.

Zellen als industrielle Produzenten

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 Chemikalien 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, bei der Futtermittel- und der Konsumgüterindustrie sind die Biokatalysatoren als „Produktionsassistenten“ heute nicht mehr wegzudenken.

Die biotechnologische Produktion stellt gegenüber der chemischen Synthese oftmals die kostengünstigere und nachhaltigere Strategie dar. Zudem lassen sich Substanzen gewinnen, die mit klassischen chemischen Methoden nur schwer zu produzieren sind, zum Beispiel Eiweißmoleküle wie Enzyme, Hormone und Antikörper. Es sind derart komplexe und große Biomoleküle, dass man sie nicht chemisch nachbauen kann. Sie müssen durch Biosynthese hergestellt werden – das Kerngeschäft der industriellen Biotechnologie.

Für die industrielle Produktion werden bisher nur wenige Dutzend Produktionsorganismen genutzt. Neben Bakterien, Hefen und weiteren Pilzen gehören dazu auch tierische und pflanzliche Zellkulturen (vgl. *Zellen und Biomoleküle*). Für ihren Einsatz in biotechnologischen Produktionsprozessen werden sie zu leistungsfähigen Zellfabriken umfunktioniert. Mithilfe molekularbiologischer Verfahren wird ihr Stoffwechsel so umgestaltet, dass sie gewünschte Produkte in großen Mengen herstellen – und die Bildung unerwünschter Nebenprodukte verhindert wird. Für die Optimierung von Produktionsstämmen und Zelllinien gibt es verschiedene Herangehensweisen. Dazu gehört auch der Umbau und das Design neuer Stoffwechselwege. Die Fachwelt spricht vom Metabolic Engineering. Hier spielen auch systembiologische Ansätze eine wichtige Rolle (vgl. *Analysieren und messen*). Zellfreie Produktionssysteme verzichten hingegen auf den Einsatz lebender Zellen. Man konzentriert sich hier nur auf die relevanten Syntheseschritte. Für die zellfreie Proteinsynthese werden alle für die Proteinbiosynthese notwendigen Komponenten in einem Reaktionsgefäß vereint. Löst man sich vom komplexen System Zelle, können spezielle Proteine leichter und deutlich effizienter hergestellt werden.

Optimal versorgt im Bioreaktor

Damit die empfindlichen Zellfabriken Spitzenleistungen erbringen und sich optimal vermehren können, werden sie unter möglichst idealen Arbeitsbedingun-

gen herangezüchtet. Bioreaktoren – auch Fermenter genannt – sind das Kernstück jeder biotechnologischen Produktionsanlage. Meist handelt es sich um geschlossene Systeme mit Rührkesseln aus Glas oder Edelstahl. Die Reaktionsbedingungen im Bioreaktor lassen sich exakt einstellen, so die Art und Konzentration der Zutaten in der Nährlösung, die Temperatur, der Sauerstoffgehalt der zugeführten Luft oder der pH-Wert. Rührwerke sorgen dafür, dass die Nährlösung und die darin schwimmenden Zellen immerzu gut durchmischt werden und die winzigen Produzenten somit optimal versorgt sind.

Qualitätskontrolle mithilfe moderner Messtechnik wird bei Bioprozessen großgeschrieben. Ein Trend in der Bioverfahrenstechnik geht hin zum kontinuierlichen Qualitätscheck in Echtzeit und zu smarten Lösungen beim Bioprocess-Design. Die große Herausforderung besteht darin, die aufwendigen biotechnischen Produktionsprozesse stabil zu halten. Denn lebende Zellen verhalten sich in einem Produktionsprozess nicht immer wie erwartet. Was im Labor- oder im Technikumsmaßstab in bis zu 100-Liter-Bioreaktoren funktioniert, muss sich im Industriemaßstab erst noch beweisen. Heutige industrielle Produktionsanlagen arbeiten mit Bioreaktoren mit mehreren zehntausend Litern Fassungsvermögen. Ein Knackpunkt sind zudem die komplexen und teuren Aufbereitungsverfahren, mit denen man die entstandenen Produkte in reiner Form gewinnt.

Bioraffinerien – grüne Fabriken

Bioraffinerien sind die großen industriellen Fabriken der Bioökonomie. Vergleichbar mit einer Erdölraffinerie wird hier der Rohstoff Biomasse in seine 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. Nachwachsende Rohstoffe werden in Bioraffinerien mithilfe eines Mix aus Technologien in ein breites Spektrum aus Zwischen- und Endprodukten umgewandelt. Dabei koppelt man in der Regel stoffliche und energetische Nutzung miteinander, wobei die stoffliche Verwertung Vorrang vor der energetischen hat. 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.

Verarbeiten und produzieren

Zellfabriken



Merkmale: Zellfabriken sind für die industrielle Produktion optimierte Mikroorganismen sowie andere Zellen (vgl. *Kapitel Zellen und Biomoleküle*). Den Mikroorganismen dient vor allem Zucker aus nachwachsenden Rohstoffen als Futter – sie wandeln ihn in andere organische Stoffe um. Pflanzen- oder Tierzellen werden in nährstoff- und proteinreichen Nährlösungen kultiviert. Oft sind Zellfabriken gentechnisch verändert.

Verwendung: Zellfabriken kommen bei der biotechnologischen Herstellung von Wirkstoffen, Enzymen, Biopolymeren, Chemikalien zum Einsatz.

Beispiele: Chymosin (mikrobielles Lab) für die Käseherstellung; Hefe für die Herstellung von Bioethanol (Foto); Aminosäure L-Lysin für Tierfutter und L-Glutamat als Würzmittel; Zitronensäure für die Lebensmittelindustrie

Zellfreie Produktion



Merkmale: Die Synthese von Biomolekülen wie Nukleinsäuren oder Proteinen wird nicht mithilfe von Zellen, sondern in einem Reaktionsgefäß durchgeführt. Alle Bestandteile der Zellmaschinerie, die für die Biosynthese nötig sind, werden hier vereint. Da anders als bei Zellfabriken die Schritte der Zellvermehrung und das Aufschließen der Zellen entfallen, ist die zellfreie Produktion günstiger und deutlich schneller. Durch den Einbau modifizierter Aminosäuren lassen sich Proteine mit völlig neuen Eigenschaften herstellen.

Verwendung: Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien für Pharmaforschung und Diagnostik, die Lebensmitteltechnologie, Agrar-, Kosmetik- und Waschmittelindustrie. Geeignet zur Produktion von Membranproteinen oder Molekülen, die in höheren Konzentrationen toxisch auf Zellen wirken (Chemotherapeutika).

Beispiele: Zellfrei synthetisierte Membranproteine (Foto) für die Pharmaforschung; Herstellung von mRNA-Impfstoffen (z. B. gegen SARS-CoV-2), Antikörpern, Enzymen oder Chemotherapeutika

Bioprozesstechnik



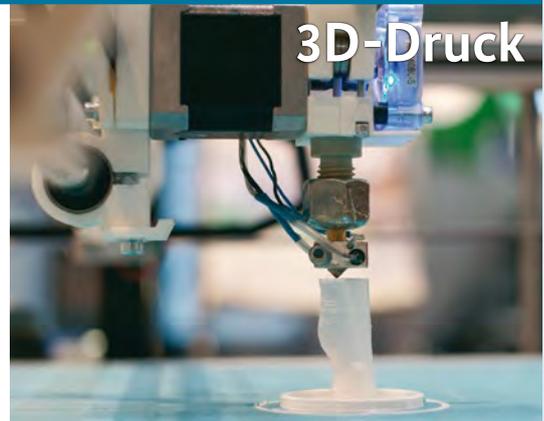
Merkmale: Ingenieurskunst und biologisches Wissen kommen zusammen, um biotechnologische Produktionsprozesse zu entwickeln, zu betreiben und zu optimieren. Das Ziel ist eine Produktion im Industriemaßstab. Dazu zählt der kontrollierte Betrieb von Bioreaktoren mithilfe von Mess- und Regeltechnik sowie die Aufarbeitung und Reinigung der entstehenden Produkte.

Verwendung: Betrieb biotechnologischer Produktionsanlagen, Bioreaktoren sind geschlossene Behälter, in denen Mikroorganismen oder Zellen unter möglichst optimalen Bedingungen in einem Nährmedium kultiviert werden, um entweder die Zellen selbst, Teile von ihnen oder eines ihrer Stoffwechselprodukte zu gewinnen. Bioreaktoren werden auch als Fermenter bezeichnet.

Beispiele: Industrielle biotechnologische Produktion von pharmazeutischen Wirkstoffen, Lebensmitteln, chemischen Grundstoffen

Merkmale: 3D-Druck ist die computergestützte Fertigung von dreidimensionalen Produkten durch das schichtweise Auftragen von Werkstoffen – dazu zählen insbesondere Kunststoffe. Die Basis der additiven Fertigung bilden digitale Konstruktionsvorlagen.

Verwendung: In den Anwenderindustrien werden auch biobasierte 3D-Druckmaterialien, die sogenannten Filamente, eingesetzt. Das können Biokunststoffe wie etwa Polymilchsäure (PLA) sein. Beim sogenannten Bioprinting werden Zellen für den 3D-Druck von Gewebeersatz eingesetzt.



Beispiele: 3D-Druckmaterialien auf Basis von PLA, Holzfasern, Kaffeesatz oder Algen

Merkmale: Biogasanlagen bestehen aus riesigen Gärbehältern. In diesen Fermentern wandeln Mikroorganismen Biomasse aus Pflanzen, Gülle oder Lebensmittelreste zu Biogas und anderen Gärprodukten um. Biogas ist ein Gemisch aus Methan und Kohlendioxid, das vor Ort in einem Blockheizkraftwerk zu Strom und Wärme umgewandelt wird.

Verwendung: Biogasanlagen eignen sich für die dezentrale Erzeugung erneuerbarer Energien, zudem helfen sie, Treibhausgas-Emissionen aus Gülle und Mist einzusparen. Zudem dienen sie der Erzeugung von Dünger und der energetischen Verwertung von Abfällen.



Beispiele: In Deutschland gibt es rund 9.000 Biogasanlagen: landwirtschaftliche Anlagen mit Energiepflanzen und Gülle; industrielle Anlagen mit Material aus der Biotonne

Merkmale: Bioraffinerien sind technische Anlagen, in denen pflanzliche Biomasse in ihre Bestandteile zerlegt und möglichst vollständig genutzt beziehungsweise veredelt wird – analog zu einer Erdölraffinerie. Typisch ist die Herstellung mehrerer Produkte in einem Prozess. Zudem wird die stoffliche Nutzung mit der Energiegewinnung gekoppelt.

Verwendung: Je nach Rohstoffbasis werden in Bioraffinerien Chemikalien, Biowerkstoffe und Energieträger hergestellt.



Beispiele: Lignocellulose-Bioraffinerie in Straubing – Stroh als Basis; Bioraffinerie am Fraunhofer CBP Leuna – Holz als Basis (Foto); Algen-Bioraffinerie; Synthesegas-Bioraffinerie am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



Kreisläufe und vernetzte Welten

In Kreisläufen zu wirtschaften und Materialien mehrfach zu nutzen, ist ein Ziel der Bioökonomie. Dabei hilft der ganzheitliche Blick auf Systeme – von der Zelle zum Organismus bis zum Produktions- oder Ökosystem. Innovationen für die Bioökonomie entstehen oft an der Schnittstelle unterschiedlicher Technologiefelder – etwa wenn Biologie auf Technik und Informatik trifft. Vernetzung wird dabei nicht nur durch die Digitalisierung erreicht. Indem Branchen auf neue Weise zusammenarbeiten, entstehen neue Wertschöpfungsnetze.

In der Natur gehen biologische Ressourcen in die Stoffkreisläufe ein- und auch wieder aus ihnen hervor. Der Stoffwechsel der Lebewesen ist Teil des größeren Kohlenstoffkreislaufs oder Stickstoffkreislaufs der Natur. Die Kreislaufprozesse sind so ausbalanciert, dass die Nutzung und die Neubildung von Ressourcen im Gleichgewicht stehen. Dabei entstehen möglichst kein Abfall und keine Reste. Biomasse ist nicht nur eine erneuerbare Ressource. Sie 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 auch energetisch verwendet werden. Dabei wird im Prinzip nicht mehr Kohlendioxid 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.

Stoffkreisläufe schließen

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. Der 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. Das

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 ungenutzte Potenzial von Ernterückständen und Reststoffen wie Stroh, Waldrestholz oder Gülle. Hinzukommen Reststoffe, die in der industriellen Produktion und Weiterverarbeitung anfallen: Hierzu zählen klassische Abfallstoffe wie Raps-Presskuchen, Algen-Restbiomasse, Gärreste, Molke oder Fruchtschalen. Aber auch Abfallströme wie Kohlendioxid oder Klärschlämme gehören dazu.

Geschlossene Nährstoff- und Wertstoffkreisläufe spielen in innovativen Anbausystemen wie der Aquaponik oder der vertikalen Landwirtschaft eine wesentliche Rolle. Hier werden moderne Anbautechnologien klug miteinander kombiniert. In der industriellen Produktion wird das Prinzip der Kaskadennutzung in Bioraffinerien besonders konsequent umgesetzt (vgl. *Produzieren und verarbeiten*).

Technologien verschmelzen

Großes Potenzial für die Entwicklung innovativer Prozesse und Produkte in der Bioökonomie entsteht insbesondere, wenn das Know-how unterschiedlicher Technologiebereiche zusammenkommt: Angetrieben von der Digitalisierung und Fortschritten in Technologiefeldern wie der Nanotechnologie und Mikrosystemtechnik, der Robotik oder der Material- und Verfahrenstechnik eröffnen sich für die Biotechnologie ganz neue Anwendungsmöglichkeiten. Von großer Bedeutung für die Bioökonomie sind Technologietrends wie die Miniaturisierung, Automatisierung und die intelligent vernetzte Produktion in einer Industrie 4.0.

Ein Beispiel dafür, wie sich Biowissenschaften und Ingenieurwissenschaften immer stärker miteinander verzahnen, liefert die Synthetische Biologie. Hier arbeiten Biologen, Ingenieure, Physiker und Chemiker, Materialforscher und Computerwissenschaftler eng zusammen, um biologische Systeme modularartig zu entwerfen und zu konstruieren. Auf diese Weise wollen sie biologische Bauteile, Zellen oder Organismen mit Eigenschaften und Fähigkeiten ausrüsten, die in der Natur bisher so nicht vorkommen. Das eröffnet nicht nur neue grundlegende Erkenntnisse über Lebensprozesse. Für die Bioökonomie birgt die

Synthetische Biologie das Potenzial für völlig neue biobasierte Prozesse und Produkte.

Nicht nur Technologien konvergieren, sondern ganze Wertschöpfungsketten. Branchen kooperieren, die vorher nicht zusammengearbeitet haben. Durch die komplexen Stoffgemische von Biomasse entstehen neben dem gewünschten Produkt oftmals Stoffnebenströme, die ihrerseits als Rohstoff für einen anderen Prozess dienen können (siehe Koppelnutzung). In diesem Zuge entstehen neue Wertschöpfungsnetze.

Ganze Systeme im Blick

Welternährung, Klimawandel, knappe Ressourcen, schwindende Biodiversität – die großen gesellschaftlichen Herausforderungen sind komplex. Um Lösungen mithilfe einer biobasierten Wirtschaft zu entwickeln, ist ein ganzheitlicher Blick gefragt. Es geht sowohl um Wechselwirkungen zwischen biologischen Systemen und ihrer Umwelt als auch um die Rolle weiterer Rohstoff- und Energiekomponenten. Unterschiedliche Perspektiven müssen verbunden und Wechselwirkungen auf allen Ebenen beachtet werden.

Der ganzheitliche Blick richtet sich auf biologische Systeme wie Zellen oder Organismen, Ökosysteme bis hin zu Agrarsystemen. Besonders wichtig bei dieser Betrachtung ist es, bei allen Maßnahmen neben den ökologischen Auswirkungen auch die sozialen und wirtschaftlichen Effekte zu berücksichtigen. Angesichts der Komplexität der Herausforderungen und der Vielzahl der damit verbundenen Ziele können Zielkonflikte entstehen. Systemisches Denken und ganzheitliche Ansätze helfen dabei, solche Konflikte zu erkennen und auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse zu mindern.

Kreisläufe und vernetzte Welten

Kreislaufwirtschaft



Beispiele: Reinigung von Abwässern in Klärwerken (Foto) und Rückführung in den Wasserkreislauf; Kaskadennutzung in einer Bioraffinerie; Kreislaufwirtschaftsgesetz; Circular-Economy-Strategie der EU

Merkmale: Ein Konzept, das darauf abzielt, Abfälle zu verwerten und zu vermeiden. Es gilt, Material so lange wie möglich im Wirtschaftskreislauf zu halten, den Ressourcenverbrauch und die Erzeugung von Abfällen zu minimieren. Ziel ist ein hoher Wiederverwendungsgrad, das beginnt schon beim Produktdesign. Insbesondere die Prinzipien der Koppel- und Kaskadennutzung von Biomasse bilden wichtige Eckpfeiler einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft.

Verwendung: Instrument für den Umwelt- und Ressourcenschutz, Recyclingorientierte Abfallwirtschaft, Wasserwirtschaft, Bioraffinerie

Recycling



Beispiele: Altpapier-Recycling (Foto); Kunststoff-Recycling; Phosphat-Rückgewinnung in Klärwerken

Merkmale: Recycling ist die Aufarbeitung von Abfällen zu Materialien oder Stoffen, die erneut für die Herstellung von Produkten genutzt werden können. Gilt für Werkstoffe und Rohstoffe. Beim Downcycling verliert das aufbereitete Produkt an Qualität. Beim Upcycling wird durch kreatives Umarbeiten oder durch Aufarbeiten ein höherwertigeres Produkt im Vergleich zum Ausgangsprodukt geschaffen.

Verwendung: Recycling ist insbesondere in der Abfallwirtschaft etabliert.

Geschlossene Produktionssysteme



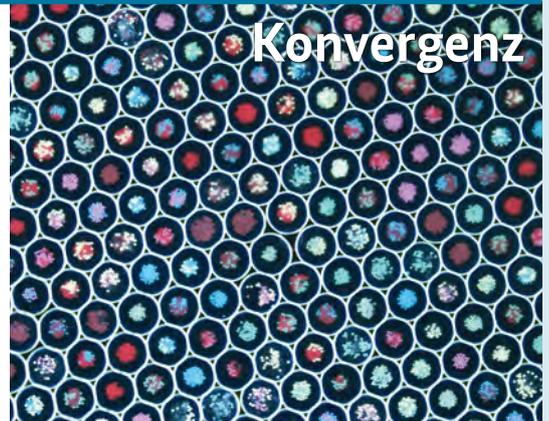
Beispiele: Kombination von Fischzucht und Gemüseproduktion in geschlossenen Kreisläufen - Aquaponik; Indoor-Farming-Systeme für die urbane Landwirtschaft (Foto)

Merkmale: Kombination von landwirtschaftlichen Produktionsformen wie Gemüseanbau und Tierhaltung unter hochgradig kontrollierten Produktionsbedingungen. Angestrebt werden platzsparende Produktionssysteme mit weitgehend geschlossenen Stoff- und Energieströmen und gekoppelte Kreisläufe.

Verwendung: Vertikale Agrarsysteme in Städten unter Einsatz von Hydrokulturen, LED-Lichttechnik, Heizung, Sensoren und intelligenter IT. Gemüseanbau in Containern oder versuchsweise im Weltall

Merkmale: Das Zusammenwachsen verschiedener Technologie- und Wissensbereiche sowie neue Verflechtungen von Produktions- und Wertschöpfungsketten. Häufig sind hier Querschnittstechnologien wie Nano-, Bio- und Informationstechnologien sowie Kognitionswissenschaften beteiligt.

Verwendung: Konvergenz wird für die Entwicklung innovativer Technologien und Produkte genutzt. Ein Beispiel ist die Produktion von Textilien aus Spinnenseideprotein – hier kommen Biotechnologie, Material- und Ingenieurwissenschaften zusammen, um innovative Textilfasern zu entwickeln.



Beispiele: Synthetische Biologie – Design und Konstruktion von biologischen Systemen nach Ingenieursprinzipien; Textilfasern aus Spinnenseideproteinen; Mikrofluidik, optische Technologien und KI für Mikrobiomanalysen (Foto)

Merkmale: Digitalisierte Produktion und Fertigung unter Einsatz intelligenter vernetzter Maschinen, Anlagen und Produkte. Die Systeme werden durch IT und kontinuierlichen Datenaustausch gesteuert. Per Cloud-Technologien wird über das Internet auf zentral gespeicherte Daten zugegriffen. Die Produktion wird flexibler und effizienter.

Verwendung: Das Konzept Industrie 4.0 hält in allen für die Bioökonomie relevanten Branchen Einzug – darunter Landwirtschaft, Chemie, Pharma und Biotechnologie.



Beispiele: Agrarsysteme der Zukunft – Projekt Fahrerkabine 4.0; Stem Cell Factory – automatische Produktionsstraße für Stammzellprodukte; Digitalisierung in der industriellen Biotechnologie (Projekt DigInBio, Foto)

Merkmale: Lebenszyklusanalysen, bei denen Produkte oder Prozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette untersucht werden. So lässt sich abschätzen, wie sich Biomasse-Produktion und das biobasierte Produkt auf die Umwelt auswirken. Es werden Sachbilanzen erstellt und ökologische, ökonomische und soziale Komponenten bewertet. Als wichtige Werkzeuge werden Indikatoren eingesetzt.

Verwendung: Ökobilanzen werden für die Nachhaltigkeitsbewertung eines Produkts oder eines Prozesses eingesetzt. Sie spielen auch beim Bioökonomie-Monitoring eine bedeutende Rolle.



Beispiele: Life Cycle Assessments (LCA) nach DIN 14040; Ressourcen- und Klima-Fußabdrücke; Deutsches Bioökonomie-Monitoring



Weiterführende Links

Bioökonomie auf [bmbf.de](https://www.bmbf.de)

Mehr Informationen zum Thema Bioökonomie auf der Website des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

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

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

Mehr Informationen zum Thema Bioökonomie im Rahmen des Forschungsrahmenprogramms „Forschung für Nachhaltigkeit (FONA)“ des BMBF.

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

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

Die offizielle Website des Wissenschaftsjahres 2020/21 - Bioökonomie bietet spannende Meldungen und viele Hintergrundinformationen sowie Informationen zu den Mitmach-Aktionen. Die Wissenschaftsjahre sind eine Initiative für Wissenschaftskommunikation des BMBF.

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

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

Das Informationsportal zum Thema Bioökonomie in Deutschland und weltweit. Hier finden sich Nachrichten, Porträts, Interviews und Themendossiers, Videos und Podcasts sowie Datenbanken zu Forschungseinrichtungen und Förderprojekten. [bioökonomie.de](https://www.biooekonomie.de) ist eine Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

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

Informationsportal [pflanzenforschung.de](https://www.pflanzenforschung.de)

Das Informationsportal bietet Nachrichten und Hintergründe rund um das Thema Pflanzenforschung. Das Online-Portal wird vom BMBF gefördert.

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

Impressum

Herausgeber

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

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

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

Februar 2021

Text

bioökonomie.de
Dr. Philipp Graf (BIOCOM AG)

Gestaltung

Michaela Reblin (BIOCOM AG)

Druck

Zarbock GmbH & Co. KG

Bildnachweise

Titel: Fraunhofer IME/ Andreas Reimann
S.2,4: Florian Sänger für BMBF
S.6: ETH Zürich/Anne Greet Bittermann
S.8: Bakterien: National Institut of Allergy and Infectious Diseases, NIH; Pilze: BIOCOM AG; Mikroalgen: Algenbiotechnologie/ Hochschule Anhalt
S.9: Tierzellen: Nenad Bursac/Duke University/NIH Image Gallery, Pflanzenzellen: Fernan Federici & Jim Haseloff (CC BY 4.0), Wellcome Collection; Viren: HZI/Manfred Rohde
S.10: DNA: National Institute of Mental Health, National Institutes of Health, Department of Health and Human Services, RNA: CROCOTHERY/stock.adobe.com, Proteine: Juan Gartner/stock.adobe.com
S.12: IPK Leibniz-Institut
S.14: Hybridzüchtung: KWS Saat SE, Präzisionszüchtung: Fotostudio Ulrich Loeper/Celle; Zellkulturtechnik: KWS Saat SE
S.15: Gentechnik: Janina Braatz/CAU; Neue Züchtungstechniken: Alexander Schlichter; Genbank: IPK Leibniz-Institut
S.16: Novozymes Berlin GmbH
S.18: DNA-Sequenzierung: ETH Zürich/Jonathan Venetz; Protein-Analyse: Wolfgang Filsler/TUM; Omics: Salk Institute
S.19: Mikroskop: Deutscher Zukunftspreis/Ansgar Pudenz, Systembiologie: KEGG Pathway Database; Phänotypisierung: IPK Leibniz-Institut
S.20: Deutscher Zukunftspreis/Ansgar Pudenz

S.22: Fernerkundung: ESA/ATG Medialab;
S.22: Automatisierung: Fraunhofer IPK, Künstliche Intelligenz: CC 4.0 aus Remote Sensing of Environment, Volume 220, Jan 2019, p.135
S.23: Bioinformatik: Prof. Dr. Christoph Tebbe/ Thünen-Institut; Modelle & Szenarien: Martin Kunsting/Alfred-Wegener-Institut; Monitoring: David Ausserhofer/IGB
S.24: Jennewein Biotechnologie GmbH/Frank Pichler
S.26: Zellfabriken: Biozentrum, Universität Basel; Zellfreie Produktion: Stefan Kubick/Fraunhofer IZI-BB; Bioprozesstechnik: Sartorius AG
S.27: 3D-Druck: BIOPRO Baden-Württemberg GmbH; Biogasanlagen: André Naumann/Fraunhofer IFF, Bioraffinerien: Gunther Binsack/ Fraunhofer CBP
S.28: Algenbiotechnologie/Hochschule Anhalt
S.30: Kreislaufwirtschaft: Berliner Wasserbetriebe/Joachim Donath; Recycling: gmg9130/stock.adobe.com; Geschlossene Produktionssysteme: Fraunhofer IME/ Andreas Reimann
S.31: Konvergenz: Oksana Shvydkiv, Leibniz-HKI; Industrie 4.0: Tobias Hase/TUM, okobilanzen: Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH im Auftrag des BMBF
S. 32: Algenbiotechnologie/Hochschule Anhalt

