



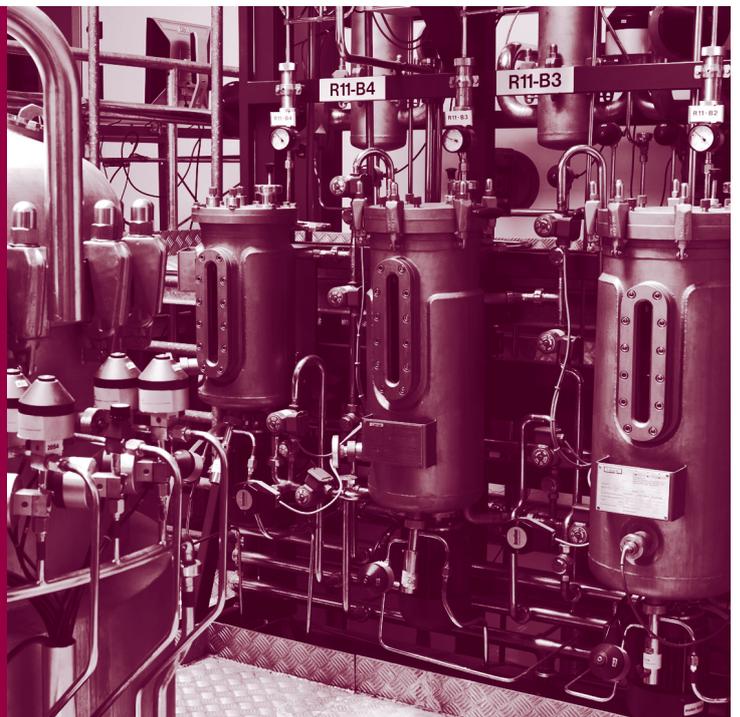
BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

Heike Aichinger
Bärbel Hüsing
Sven Wydra

Weißer Biotechnologie

Stand und Perspektiven der
industriellen Biotechnologie:
Verfahren, Anwendungen,
ökonomische Perspektiven

Innovationsanalyse – Teil I



November 2016
Arbeitsbericht Nr. 168

Weiße Biotechnologie – Innovationsanalyse Teil I



Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse seit 1990 in Fragen des technischen und gesellschaftlichen Wandels. Das TAB ist eine organisatorische Einheit des Instituts für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) im Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zur Erfüllung seiner Aufgaben kooperierte es von 2003 bis 2013 mit dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe. Seit September 2013 besteht eine Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.



Heike Aichinger
Bärbel Hüsing
Sven Wydra

Weißer Biotechnologie

**Stand und Perspektiven der
industriellen Biotechnologie:
Verfahren, Anwendungen,
ökonomische Perspektiven**

Innovationsanalyse Teil I



Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag (TAB)
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Fon: +49 30 28491-0

Fax: +49 30 28491-119

buero@tab-beim-bundestag.de

www.tab-beim-bundestag.de

2016

Umschlagbild: © Kristian Barthen, Archiv B.R.A.I.N. Biotechnology Research
and Information Network AG

Papier: *Circleoffset* Premium White

Druck: Wienands Print + Medien GmbH, Bad Honnef

ISSN-Print: 2364-2599

ISSN-Internet: 2364-2602



Inhalt

Zusammenfassung	7
I. Einleitung	25
II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der industriellen Biotechnologie	31
1. Rohstoffbasis	31
1.1 Definition	31
1.2 Biomassepotenzial	32
1.3 Aktuelle Nutzung von Biomasse	35
1.4 Ausgewählte Ansätze zur Erweiterung des industriell nutzbaren Biomasse- und Substratspektrums	38
2. Produktionsplattformen	45
2.1 Vor- und Nachteile organismenbasierter und zellfreier Produktionsplattformen	46
2.2 Organismenbasierte Produktionsplattformen	47
2.3 Zellfreie Produktionsplattformen	51
3. Methoden zur Optimierung biotechnischer Prozesse	52
3.1 Screening nach neuen Mikroorganismen und Enzymen	52
3.2 Optimierung von Produktionsorganismen – Metabolic Engineering, Systembiologie und Synthetische Biologie	55
3.3 Optimierung von Enzymen – Enzymengineering und Enzymdesign	58
3.4 Prozessdesign und Bioverfahrenstechnik	60
4. Bioraffinerien	63
III. Anwendungen und Produkte der industriellen Biotechnologie	71
1. Chemische Industrie	71
1.1 Fein- und Spezialchemikalien	73
1.2 Bulkchemikalien	76
2. Körperpflege, Wasch- und Reinigungsmittel	92
3. Lebensmittel- und Getränkeherstellung	98
4. Textilherstellung und -veredlung	105



5. Lederherstellung	110
6. Zellstoff- und Papierherstellung	111
7. Bergbau und Metallgewinnung	117
8. Umweltbiotechnik: Abfall-, Abwasser-, Abgas- und Bodenbehandlung	118
9. Automobilindustrie	122
<hr/>	
IV. Ökonomische Perspektiven der industriellen Biotechnologie	127
1. Marktentwicklung	127
2. Industrielle Entwicklung und Geschäftsmodelle	133
3. Internationale Wettbewerbsfähigkeit	139
4. (Kosten-)Wettbewerbsfähigkeit	150
5. Volkswirtschaftliche Bedeutung	158
6. Fazit	162
<hr/>	
Literatur	165
<hr/>	
Anhang	181
1. Abbildungsverzeichnis	181
2. Tabellenverzeichnis	182
3. Ergänzende Tabellen	184
4. Glossar	190

Zusammenfassung

Seit vielen Jahren werden große Erwartungen an das ökonomische und ökologische Potenzial der industriellen Biotechnologie (IBT) formuliert. Nachdem sich das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) bereits 1996 mit »Stand und Perspektiven der Katalysator- und Enzymtechnik« befasst hatte, wurde es vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages beauftragt, einen Überblick über Verfahren, Anwendungen und ökonomische Perspektiven der industriellen Biotechnologie zu erstellen sowie die aktuellen wissenschaftlichen Diskussionen zu Umwelt- und Nachhaltigkeitspotenzialen der IBT aufzubereiten. Die resultierende Innovationsanalyse umfasst zwei komplementäre Sachstandsberichte: Der hier vorliegende TAB-Arbeitsbericht Nr. 168 behandelt die technischen Entwicklungen der IBT und betrachtet die Marktpotenziale verschiedener Produkte der IBT. Der TAB-Arbeitsbericht Nr. 169 fokussiert hingegen auf die Umweltwirkungen und Nachhaltigkeitseffekte von Produkten und Prozessen der IBT.

Die industrielle Biotechnologie, häufig auch als weiße Biotechnologie bezeichnet, umfasst den Einsatz biotechnischer Verfahren in der industriellen Produktion. Biotechnische Verfahren nutzen die Stoffwechselleistungen bzw. katalytischen Eigenschaften von Mikroorganismen (Bakterien, Hefen, Pilze, Mikroalgen) und subzellulären Komponenten, meist Enzyme, zum Auf-, Um- oder Abbau von Substanzen. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um enzymatische Verfahren oder Fermentationen zur Umwandlung von Biomasse für die industrielle stoffliche Nutzung. Diese biokatalytischen Prozesse laufen – im Vergleich zur klassischen Chemie – unter milden Bedingungen in Bezug auf Temperatur, Druck und pH-Wert, in wässrigen Medien und mit hoher Selektivität und Spezifität ab. Zudem entfalten biotechnische Verfahren klassischerweise ihre besonderen Stärken dort, wo es um die Umwandlung von Naturstoffen, insbesondere von Biomassekomponenten, geht. Deshalb bergen sie das Potenzial, Beiträge zu einer nachhaltigen Gestaltung von industriellen Produktionsprozessen leisten zu können.

Innovationspolitisch wird der industriellen Biotechnologie national und international ein hoher Stellenwert zugemessen: Sie ist Grundlage und Impulsgeber für die sogenannte Bioökonomie und wird als eine der Schlüsseltechnologien (»Key Enabling Technologies«) zum Erhalt und Ausbau der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der Industrie eingestuft. Unter Bioökonomie werden die wissensbasierte Erzeugung und die Nutzung nachwachsender Ressourcen verstanden, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen. Das Konzept der Bioökonomie umfasst danach alle Wirtschaftssektoren



und ihre zugehörigen Dienstleistungsbereiche, die nachwachsende Ressourcen – wie Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen und deren Produkte – erzeugen, be- und verarbeiten, nutzen oder damit handeln. Aufgrund der Endlichkeit der fossilen Ressourcen sowie zur Erreichung von Klimaschutzziele wird mit der Bioökonomie angestrebt, die bislang ganz überwiegend fossile Rohstoffbasis der Industrie durch biogene Rohstoffe zu ergänzen und zu ersetzen. In der Bioökonomie wird Biomasse als Rohstoff für die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln, Energieträgern oder als Rohstoff für die Herstellung von Chemikalien und Materialien verwendet. Dabei ist es eine besondere Herausforderung im Transitionsprozess zu einer Bioökonomie, die Wertschöpfungsketten im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung so zu gestalten, dass mit natürlichen Lebensgrundlagen wie Wasser und Boden nachhaltig umgegangen, die Biodiversität erhalten und soziale Belange berücksichtigt werden.

Es ist Aufgabe dieses Arbeitsberichts, die Wissens- und Technologiebasis der industriellen Biotechnologie zu charakterisieren, eine Übersicht über den Stand der aktuellen Anwendungen der industriellen Biotechnologie in verschiedenen Wirtschaftszweigen des verarbeitenden Gewerbes zu geben und wichtige Produktgruppen vorzustellen sowie die aktuelle wirtschaftliche Bedeutung der industriellen Biotechnologie darzustellen und Einflussfaktoren aufzuzeigen, die für die Marktdurchdringung und die erfolgreiche Realisierung von wirtschaftlichen Effekten am Standort Deutschland wichtig sind.

Wissens- und Technologiebasis der industriellen Biotechnologie

Biomasse als Rohstoffbasis der industriellen Biotechnologie

Die langfristige Verfügbarkeit von nachhaltig produzierter Biomasse in ausreichenden Mengen ist essenzielle Voraussetzung für jedwede Ausweitung der industriellen Biotechnologie. Dabei ist unumstritten, dass der Lebens- und Futtermittelproduktion Vorrang einzuräumen ist. Strategien zur langfristigen Sicherung einer nachhaltigen Biomasseversorgung umfassen die Steigerung der nachhaltigen und effizienten Produktion biobasierter Rohstoffe, ihre effizientere Verwertung sowie die Etablierung von Rahmenbedingungen, die eine nachhaltige Entwicklung der Bioökonomie national und international absichern. Die industrielle Biotechnologie trägt insbesondere zur Strategie der effizienteren Verwertung der Biomasse bei.

Als biobasierte Rohstoffe werden in der industriellen Biotechnologie vor allem Agrarrohstoffe genutzt. Demgegenüber kommt anderen möglichen Biomassequellen (wie z. B. Reststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft, organische Fraktion des Hausmülls) zurzeit eine sehr geringe Bedeutung zu. Bei den Agrarrohstoffen, die in Deutschland für Nichtnahrungs- und Nichtfuttermittelzwecke

produziert werden, dominiert jedoch die energetische Nutzung: Im Jahr 2014 wurden in Deutschland auf 12,5 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche (das sind ca. 2.074.000 ha) Nutzpflanzen für energetische Zwecke angebaut. Auf den Anbau von Pflanzen für die stoffliche Nutzung entfielen 1,8 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche (263.000 ha). Zu Industrieprodukten werden in Deutschland etwa 3,5 Mio. t Agrarrohstoffe/Jahr verarbeitet, und zwar ganz überwiegend in der chemischen Industrie.

Die wichtigsten Agrarrohstoffe für Verfahren der industriellen Biotechnologie sind Kohlenhydrate, meist in Form von Glucose, Saccharose und Stärke bzw. Stärkehydrolysaten. Im Jahr 2011 betrug die Gesamtmenge an Kohlenhydraten für die stoffliche Nutzung 1,4 Mio. t. Weil eine direkte Konkurrenz um die Nutzung der Kohlenhydrate zwischen industriellen biotechnischen Verfahren und der Nahrungs- und Futtermittelverwendung besteht, ist es ein Schwerpunkt von Forschung und Entwicklung (FuE) in der industriellen Biotechnologie, das Spektrum der stofflich nutzbaren Substrate über Zucker und Stärke hinaus zu erweitern, um zusätzliche Biomassepotenziale zu erschließen. In diesem Bericht werden ausgewählte Optionen vorgestellt, und zwar CO₂ als Kohlenstoffquelle für biotechnische Prozesse, Glycerin als Kuppelprodukt der Biodieselproduktion sowie die Erschließung lignocellulosehaltiger Biomasse aus holzigen Pflanzen als Fermentationsrohstoff. Der letztgenannten Option kommt das mengenmäßig größte Potenzial zu: Die Kohlenhydrate Cellulose, Hemicellulose sowie Lignocellulose machen große Anteile der holzigen Biomasse aus, werden bislang aber in der industriellen Biotechnologie nicht genutzt, da sie aufgrund ihrer Molekülstruktur einer biokatalytischen Umsetzung sehr viel schwerer zugänglich sind als Stärke und Zucker. In den letzten Jahren wurden international verschiedene Verfahren bis zur großtechnischen Reife und zum erstmaligen kommerziellen Einsatz entwickelt, die diese Kohlenhydratfraktion so aufbereiten, dass sie als Fermentationsrohstoff verwendet werden kann. Dennoch besteht hier noch weiterer Entwicklungs- und Optimierungsbedarf, ehe dieses Biomassepotenzial industriell breit genutzt werden kann.

Deutschland weist für die großmaßstäbliche Produktion von Biomasse für die industrielle Nutzung aufgrund der im internationalen Vergleich geringeren Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen weniger günstige Voraussetzungen auf. Daher ist es zurzeit eine offene Frage, inwieweit und mit welcher Schwerpunktsetzung sich Deutschland als Produktionsstandort in der industriellen Biotechnologie etablieren können. Für Bulkchemikalien, für deren industrielle Produktion sehr große Mengen an kostengünstiger Biomasse verfügbar sein müssen, sind in den letzten Jahren Produktionskapazitäten vor allem in Asien, aber auch in den USA und Brasilien in räumlicher Nähe zu hochproduktiven Agrarregionen auf- und ausgebaut worden. Während es für Deutschland schwierig sein dürfte, sich in diesem Massensegment als interna-



tional wettbewerbsfähiger Standort zu positionieren, sind größere Standortvorteile für Deutschland und auch Europa in Märkten zu erwarten, in denen Rohstoffpreise und -verfügbarkeit eine geringere Rolle als bei Bulkchemikalien spielen. Hierzu zählen beispielsweise biobasierte Fein-/Spezialchemikalien, Enzyme, die Weiterverarbeitung von im Ausland hergestellten Biokunststoffen sowie Dienstleistungen auf der Basis von Technologie-Know-how.

Produktionsplattformen

Industrielle biotechnische Verfahren sind meist sogenannte Fermentationen, in denen die Stoffwechsellleistungen ganzer Zellen für die Stoffumwandlung genutzt werden. Eine weitere Option ist die Stoffumwandlung im zellfreien System. Hierbei werden Enzyme eingesetzt, die zuvor in Mikroorganismen hergestellt und aus ihnen für die nachfolgende Stoffumwandlung isoliert wurden. Die in den industriellen Verfahren eingesetzten Produktionsorganismen bzw. Enzyme werden auch als Produktionsplattformen bezeichnet.

Organismenbasierte Produktionsplattformen werden vor allem für solche Prozesse eingesetzt, in denen mehrere aufeinanderfolgende Reaktionen koordiniert ablaufen müssen, um die gewünschte Stoffumsetzung zu erzielen. Dabei macht man sich die jeweiligen natürlichen Stoffwechselwege der hierzu befähigten Mikroorganismen zunutze, die ursprünglich aus der Natur isoliert und sukzessive durch Mutation und Selektion im Hinblick auf den jeweiligen industriellen Produktionsprozess optimiert wurden. Ihre besondere Eignung für industrielle Produktionsprozesse erweist sich durch bekannte, stabile Eigenschaften, die auch über viele Zellteilungen des Produktionsorganismus hinweg unverändert bleiben, in sehr guter Kultivierbarkeit auf kostengünstigen Kohlenstoff- und Energiequellen in hoher Organismenkonzentration, in der Robustheit gegenüber harschen oder wechselnden Kulturbedingungen, in hoher Produktivität sowie in ihrer Ungefährlichkeit für Mensch und Umwelt. In der industriellen Biotechnologie werden nur wenige Dutzend Mikroorganismenarten (Bakterien, Hefen, Pilze) als Produktionsplattformen routinemäßig eingesetzt.

Durch die Kombination der wissenschaftlichen und gezielten Verfahren der gentechnischen Veränderung, des fortgeschrittenen Metabolic Engineering und der Systembiologie können heutzutage Produktionsstämme konstruiert werden, die in Bezug auf produktionsrelevante Eigenschaften mit konventionell durch wiederholte Mutation und Selektion über Jahrzehnte optimierten Produktionsstämmen gleichwertig sind. Konzeptionell wird dabei angestrebt, das »Basis-Chassis« eines bewährten Produktionsorganismus je nach konkreten Prozess- bzw. Produkthanforderungen mit den jeweils erforderlichen Stoffwechsellleistungen »auszurüsten«.



Im Bereich der Forschung kommen wesentliche Impulse für eine konzeptionelle und qualitative Weiterentwicklung des systembiologisch unterstützten Metabolic Engineering aus der Synthetischen Biologie, die jedoch noch nicht von Relevanz für den konkreten Einsatz in industriellen Produktionsprozessen sind. Es wird angestrebt, in einem Top-down-Ansatz sogenannte Minimalorganismen aus den bislang verwendeten industriellen Produktionsplattformen zu konstruieren. Diese Minimalorganismen wären nur mit denjenigen physiologischen Funktionen ausgestattet, die für die (industrielle) Produktion der Zielsubstanz zwingend erforderlich sind; alle anderen Zelleistungen würden als für den jeweiligen Zweck »überflüssig« entfernt. Komplementär dazu wird auch der Bottom-up-Ansatz verfolgt, synthetische Zellen für bestimmte Produktionszwecke durch die Assemblierung nichtlebender chemischer Bausteine aufzubauen. Darüber hinaus wird im Rahmen der Synthetischen Biologie angestrebt, das Repertoire der Stoffumwandlungen, zu denen Organismen befähigt sind, zu erweitern und damit die Möglichkeiten der Biosynthese denen der chemischen Synthese anzunähern.

Bei den zellfreien Produktionsplattformen sind Stoffumwandlungen unter Beteiligung eines Enzyms oder weniger Enzyme Stand der industriell eingesetzten Technik. Industrielle Anwendungen finden sich vor allem bei der Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien, da hier häufig nichtnatürliche Substrate enzymatisch umgesetzt werden, die in zellbasierten Systemen möglicherweise gar nicht verstoffwechselt werden könnten. In der Regel müssen die Enzyme durch Protein Engineering für den industriellen Einsatz optimiert werden: Anfang der 2000er Jahre konnten typischerweise ein bis fünf Aminosäurebausteine in einem Enzym verändert werden; im Jahr 2010 waren 30 bis 40 Aminosäureaustausche nicht ungewöhnlich. Auf diese Weise können Substrat- und Reaktionsspezifität, Selektivität und Stabilität des Enzyms deutlich verändert werden. Dies hat zur Folge, dass heutzutage nicht mehr der Produktionsprozess an das Enzym angepasst werden muss, sondern umgekehrt das Enzym auf die Anforderungen des Produktionsprozesses hin optimiert werden kann. Während Enzyme von Relevanz für industrielle Produktionsprozesse zurzeit stets Optimierungen von natürlicherweise vorkommenden Enzymen sind, wird perspektivisch auch das De-novo-Design von maßgeschneiderten Enzymen angestrebt, insbesondere für nichtnatürliche Reaktionen. Dies ist noch im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelt.

Andere Weiterentwicklungen zielen darauf ab, die Zahl der in einem Prozess koordiniert zusammen wirkenden Enzyme zu erhöhen, um auf diese Weise komplexere Umsetzungen zu ermöglichen und dadurch das Produktspektrum zellfreier Produktionsplattformen zu erweitern. Für derartige Multienzymkaskaden müssen die Enzyme in definierter räumlicher Nähe zueinander ange-



ordnet werden, wobei neue Ansätze der Immobilisierung, u. a. aus der Nanobiotechnologie, vielversprechend erscheinen.

Zudem wird daran geforscht, die jeweiligen Vorteile von chemischer und enzymatischer Synthese – in der Regel in zellfreien Ansätzen – miteinander zu kombinieren. Strategien umfassen die Kombination von nichtenzymatischen Katalysatoren und Enzymen *in vitro* sowie das Engineering von Enzymen, um nichtnatürliche Substrate umzusetzen bzw. nichtnatürliche Reaktionen zu katalysieren.

Bioprozessentwicklung und Bioverfahrenstechnik

Für die Entwicklung industrieller Bioprozesse müssen die Reaktionsbedingungen für die jeweiligen Produktionsplattformen optimiert, die Verfahrensstufen Prozessvorbereitung (Upstream Processing), Bioprozess und Produktaufarbeitung (Downstream Processing) optimal aufeinander abgestimmt und der Prozess vom Labor- in den Produktionsmaßstab hochskaliert werden.

Der Produktionsprozess findet in einem Bioreaktor statt, der eine geeignete Umgebung für die biologische Stoffumwandlung bereitstellt. Für verschiedene Einsatzzwecke steht eine große Bandbreite an technisch ausgereiften Bioreaktoren zur Verfügung. In der industriellen Biotechnologie sind Bioprozesse am häufigsten, bei denen sich die Mikroorganismen bzw. Enzyme in wässriger Lösung befinden, die gerührt und begast wird. Durch entsprechende Prozessanalytik und -steuerung werden die Bedingungen im Bioreaktor im jeweils optimalen Bereich gehalten.

Es hat sich gezeigt, dass für eine effiziente Bioprozessentwicklung eine integrierte Biokatalysator- und Prozessentwicklung erforderlich ist: Durch die spezifischen Eigenschaften des Biokatalysators werden bereits zahlreiche Prozessparameter vorgegeben. Durch Optimierung des Biokatalysators können aber möglicherweise Prozessschritte eingespart oder weniger aufwendig ausgestaltet werden. Umgekehrt können unerwünschte Eigenschaften des Biokatalysators durch eine geeignete Auslegung des Prozesses kompensiert werden.

Eine technische Unterstützung dieser integrierten Bioprozessentwicklung bieten Minibioreaktoren im Millilitermaßstab, die mit Mess- und Steuerungstechnik ausgerüstet sind, in großer Zahl parallel betrieben werden können und eine Kultivierung unter kontrollierten Bedingungen ermöglichen, die mit Bioreaktoren im großvolumigen Maßstab vergleichbar ist. Auch der Simulation und Modellierung von Bioprozessen kommt große Bedeutung zu.

Bioraffinerien

In sogenannten Bioraffinerien sollen mehrere Biomassenutzende Umwandlungs- und Produktionsprozesse in einer Anlage synergistisch so kombiniert werden, dass eine möglichst vollständige Nutzung des eingesetzten Rohstoffs Biomasse zu Produkten (Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie einschließlich Biokraftstoffe) mit möglichst hoher Wertschöpfung erreicht werden kann. An der Konzeption und Implementierung verschiedener Bioraffinerietypen wird intensiv gearbeitet. Allerdings erscheint die Etablierung integrierter Bioraffinerien nur in einem langfristigen Prozess realisierbar: Schätzungen zufolge werden vom Funktionsprinzip und Technologiekonzept bis zum erfolgreichen kommerziellen Einsatz mehr als zehn Jahre zu veranschlagen sein. Den höchsten Technologiereifegrad des kommerziellen Einsatzes haben Zucker-, Stärke-, Öl- und Zellstoffbioraffinerien erreicht, da sie auf Know-how und Produktionsanlagen für die konventionelle Verarbeitung dieser Agrarrohstoffe zu Nahrungs- und Futtermitteln, Biodiesel bzw. Papier aufbauen und zunehmend weitere Prozesse für die stoffliche und energetische Nutzung der Biomasse integrieren. Die Pilot- und Demonstrationsphase erreicht haben Lignocellulosebioraffinerien, die fermentierbare Kohlenhydrate bereitstellen und verarbeiten, Bioraffinerien, in denen Biomasse zu Synthesegas vergast und dieses anschließend weiterverarbeitet wird, sowie die grüne Bioraffinerie, die Gras als Rohstoff verarbeitet. Hingegen besteht bei der »marinen Bioraffinerie« auf der Basis von Mikroalgen noch erheblicher grundlegender Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Zurzeit liegt der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten bei Bioraffinerien auf der technologischen Entwicklung. Wenn sich der konkrete Entwicklungsbedarf auch zwischen den verschiedenen Bioraffineriekonzepten unterscheidet, so sind konzeptübergreifend noch erhebliche Anstrengungen insbesondere bei der Weiterverarbeitung zentraler Zwischenprodukte (sogenannte Sekundärraffination) sowie bei der Optimierung und Integration der Einzelprozesse und -produkte in eine Gesamtanlage erforderlich. Zudem besteht in den nächsten Jahren Bedarf, die technologische Analyse durch ökonomische und ökologische Untersuchungen zu ergänzen. Damit soll eine Daten- und Wissensbasis geschaffen werden, die eine vergleichende ökonomische und ökologische Bewertung der Bioraffineriekonzepte untereinander sowie mit anderen Biomassenutzungspfaden erlaubt.

Verfahren und Produkte der industriellen Biotechnologie in verschiedenen Wirtschaftszweigen

Der industriellen Biotechnologie wird – neben anderen Schlüsseltechnologien – das Potenzial zugemessen, in technologischer Hinsicht wesentlich zur Zu-

kunftsorientierung des verarbeitenden Gewerbes beizutragen. Verfahren der industriellen Biotechnologie sind traditionell in Branchen etabliert, die Agrarrohstoffe und Naturstoffe industriell verarbeiten. Dies sind die Lebensmittel- und Getränke-, die Leder-, Zellstoff- und Papier- sowie die Textilindustrie. Auch in der Umwelttechnik sind biotechnische Verfahren zur Behandlung von Abwasser, Abluft, kontaminierten Böden sowie organischen Reststoffen weit verbreitet.

Chemische Industrie

Eine Schlüsselrolle nimmt jedoch die chemische Industrie in der industriellen Biotechnologie und bei der Transition zu einer Bioökonomie ein: Sie ist traditionell forschungsintensiv und innovativ, und die hieraus resultierenden Innovationen kommen nicht nur in der Chemieindustrie zum Tragen. Vielmehr fungiert die chemische Industrie auch für nachgelagerte Branchen als Innovator: Sie ist Vorleister für die Branchen Lebensmittel- und Getränkeherstellung, Textil und Leder, Zellstoff- und Papierherstellung, Automobilbau, Bauwirtschaft und erbringt – zusammen mit dem Maschinen- und Anlagenbau – einen wesentlichen Anteil der Innovationsleistungen dieser Branchen. In den letzten Jahren haben Unternehmen der chemischen Industrie strategische Schwerpunkte in der industriellen Biotechnologie und Bioökonomie gesetzt, Biotechnologiekompetenz in den Unternehmen aufgebaut und diese durch externe Kooperationen und internationale Netzwerke ergänzt. Dadurch ist die Biotechnologie in den Unternehmen inzwischen als integraler Bestandteil der Chemie etabliert und kommt in zunehmendem Maße gleichberechtigt neben chemischer Synthese und Katalyse zum Einsatz.

In der chemischen Industrie kommen vor allem fermentative Verfahren mit Mikroorganismen sowie enzymatische Verfahren zur Anwendung, um Fein- und Spezialchemikalien, Plattform- und Bulkchemikalien herzustellen.

Fein- und Spezialchemikalien, Enzyme

Der Schwerpunkt des Einsatzes biotechnischer Verfahren in der Chemie liegt in der Produktion von Fein- und Spezialchemikalien, der wirtschaftlich bedeutendsten Sparte der deutschen Chemieindustrie: Hier bieten die spezifischen Eigenschaften biokatalytischer Verfahren, nämlich hohe Spezifität, Selektivität und Aktivität bei moderaten Reaktionsbedingungen, komparative Vorteile gegenüber »herkömmlicher Synthesechemie«. Innerhalb der Fein- und Spezialchemikalien stellen Enzyme eine besondere Kategorie dar, da sie zum einen »Werkzeug« für die Herstellung vieler Fein- und Spezialchemikalien sind. Zum ande-

ren stellen sie Produkte dar, die an andere Branchen verkauft werden, denn enzymatische Verfahren spielen in der Lebensmittel- und Getränkeherstellung, bei Wasch- und Reinigungsmitteln, in der Textilveredlung, der Lederherstellung sowie der Zellstoff- und Papierherstellung eine immer größere Rolle. Der weltweite Umsatz mit industriellen Enzymen wird auf ca. 3,5 Mrd. Euro geschätzt. Der ganz überwiegende Teil der technischen Enzyme wird in gentechnisch veränderten Organismen produziert, insbesondere deshalb, weil auf diese Weise die Entwicklungszeit für neue Enzymprodukte bis zur Marktreife verkürzt und die Produktivität der Enzymherstellungsprozesse gesteigert werden kann.

Bulk- und Plattformchemikalien

Um mengenmäßig bedeutsame Effekte im Hinblick auf die Nutzung regenerativer Rohstoffe erzielen zu können, wäre die (biotechnische) Produktion biomassebasierter Bulkchemikalien wünschenswert und erforderlich. Der Begriff »Bulkchemikalien« bezeichnet chemische Erzeugnisse, die in großen Mengen produziert und abgesetzt werden. Die Jahresproduktion liegt oberhalb von 20.000 t/Jahr, teilweise sogar im Mio.-t-Bereich. Zu den Bulkchemikalien zählen organische Grundstoffe, das sind Petrochemikalien, die durch Kracken von fossilen Rohstoffen gewonnen werden, sowie Polymere (Kunststoffe, synthetischer Kautschuk, Chemiefasern). Petrochemikalien und Polymere machten im Jahr 2013 zusammen knapp die Hälfte des Produktionswerts der deutschen Chemieindustrie aus. Jedoch unterscheidet sich die Produktion von Bulkchemikalien in mehreren Punkten von der Produktion von Fein- und Spezialchemikalien, was zur Folge hat, dass die biotechnische Herstellung von biobasierten Bulkchemikalien vor allem in wirtschaftlicher Hinsicht eine größere Herausforderung darstellt als die von Fein- und Spezialchemikalien. Die Spezifika der Bulkchemikalien sind die Produktion in sehr großem Maßstab in sehr großen Mengen in eigens dafür gebauten und prozessspezifisch optimierten Anlagen, die niedrigen Produktpreise je Mengeneinheit, die viel höhere Bedeutung der Prozess gegenüber der Produktinnovation sowie der Wettbewerb mit petrochemischen, seit Jahrzehnten optimierten Herstellungsprozessen. Hinzu kommt, dass die Implementierung entsprechender großtechnischer Prozesse unter großer Unsicherheit erfolgen muss, da sich der Implementierungsprozess über Jahrzehnte hinziehen kann. Eine Ausweitung biotechnischer Produktionsverfahren auf Bulkchemikalien in der chemischen Industrie macht meist auch andere chemische Reaktionen und neue Synthesewege erforderlich: Während es sich bei fossilen Rohstoffen um Kohlenwasserstoffverbindungen handelt, die Ausgangsstoffe für oxidative Synthesen sind, enthält der Rohstoff Biomasse als Hauptbestandteil Kohlenhydrate, die in chemischen Reduktionsreaktionen weiterverarbeitet werden müssen. Dadurch können und müssen Chemikalien erschlossen



werden, die in der herkömmlichen Petrochemie keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen, aber aus Biomasse einfach und in großer Menge gewonnen werden können.

Im vergangenen Jahrzehnt wurden international in verschiedenen Strategieprozessen Substanzen identifiziert, die das Potenzial aufweisen, als Bulkchemikalie aus Biomasse und/oder biotechnisch hergestellt zu werden. Dabei werden verschiedene Innovations- und Markteintrittsstrategien verfolgt:

- › Direkte Substitution einer Bulkpetrochemikalie (Drop-in): Eine Bulkchemikalie, die bislang aus fossilen Rohstoffen hergestellt wird, wird durch eine identische Chemikalie ersetzt, die biotechnisch bzw. aus Biomasse hergestellt wird. Beispiel: Ethylen wird aus Bioethanol statt durch Dampfreformierung von Naphtha hergestellt. Vorteile dieser als Drop-in bezeichneten Strategie bestehen darin, dass die Märkte und Kundenbeziehungen für diese Produkte bereits existieren und die Einflussfaktoren des Marktgeschehens bekannt sind, sodass die künftige Entwicklung mit geringeren Unsicherheiten abgeschätzt werden kann. Nachteilig ist, dass meist Kostenwettbewerbsfähigkeit mit den korrespondierenden Petrochemikalien erreicht werden muss. Dies ist besonders herausfordernd, da die petrochemischen Prozesse über lange Zeiträume sukzessive optimiert werden konnten und teilweise in bereits abgeschriebenen Anlagen »am goldenen Ende« produziert werden, wohingegen diese günstigen Bedingungen für biobasierte Produkte noch nicht gegeben sein können.
- › Funktionelle Substitution einer Bulkpetrochemikalie: Da sich Biomasse chemisch deutlich von fossilen Rohstoffen unterscheidet, wird es bei einem Wechsel der Rohstoffbasis weder möglich noch erforderlich sein, jede bisher genutzte Petrochemikalie durch die identische biobasierte Substanz zu ersetzen. Vielmehr könnten biobasierte Chemikalien an Bedeutung gewinnen, die zwar dieselbe Funktionalität liefern wie die korrespondierende Petrochemikalie, jedoch eine andere chemische Struktur aufweisen. Beispielsweise kann das biobasierte Polymer Polymilchsäure (PLA) aufgrund seiner Eigenschaften die petrochemischen Kunststoffe Polyethylenterephthalat (PET) oder Polypropylen (PP) in bestimmten Anwendungen ersetzen.
- › Biobasierte Plattformchemikalien: Als Plattformchemikalien werden biobasierte Chemikalien bezeichnet, die mit wenigen Prozessschritten aus Biomasse gewonnen werden können, von denen sich ganze »Produktstamm-bäume« von Industriechemikalien ableiten lassen, und die deshalb in großen Mengen für eine weitergehende Umsetzung nachgefragt werden könnten. Plattformchemikalien werden üblicherweise nach der Anzahl der Kohlenstoffatome ihres Grundgerüsts klassifiziert. Für diese Plattformchemikalien gibt es nicht unbedingt ein petrochemisches, zu substituierendes Pendant, sodass die beiden vorgenannten Strategien »direkte Substitution«

und »funktionelle Substitution« hier nicht notwendigerweise zum Tragen kommen. Die Marktrisiken können bei Plattformchemikalien wegen der Breite der potenziellen Produktpalette möglicherweise geringer bzw. überschaubarer ausfallen. Während biotechnische Verfahren bei der Herstellung von Plattformchemikalien wegen der Umsetzung des Rohstoffs Biomasse eine wichtige Rolle spielen, dominieren bei der Umsetzung der Plattformchemikalien zu weiteren chemischen Erzeugnissen in der Regel chemische Verfahren. Sie eröffnen eine größere Vielfalt möglicher chemischer Veränderungen der Plattformchemikalie, als dies durch biotechnische Verfahren derzeit möglich ist.

- › Verwertung aller Biomassebestandteile: Die Herstellung von biobasierten Bulkchemikalien kann nur dann wirtschaftlich sein, wenn alle Bestandteile der Biomasse zu möglichst hochwertigen Produkten umgesetzt werden können. Bisherige Verfahren nutzen vor allem bestimmte Zuckerkomponenten (Hexosen) der Biomasse, während für Substanzen wie Glycerin, Pentosen wie Xylose und Arabinose, Furfural und Lignin, die in der Biomasse in großen Mengen vorkommen, Verwertungsmöglichkeiten, möglichst im Sinne von Plattformchemikalien, zusätzlich erschlossen werden müssen.

Dass biotechnische Verfahren nicht mehr allein auf die kleinvolumige Produktion von Fein- und Spezialchemikalien beschränkt sind, lässt sich daran ablesen, dass in den letzten Jahren Produktionsanlagen für biotechnisch aus Biomasse hergestellte Bulkchemikalien mit einer Kapazität von 1,4 Mio. t/Jahr in Betrieb genommen bzw. gebaut wurden. Sie dienen der Herstellung von Produkten, die hauptsächlich zu biobasierten Polymeren, d.h. Kunststoffen und Kunstfasern, weiterverarbeitet werden. Die größten Anlagenkapazitäten sind zurzeit bei Drop-in-Chemikalien (Ethylen, Propylen, 1,2-Ethan-diol, 1,2- und 1,3-Propan-diol) zu verzeichnen. Unter den Chemikalien, die Petrochemikalien funktionell substituieren können, kommen derzeit der Plattformchemikalie Bernsteinsäure sowie dem biobasierten Polymer Polymilchsäure die größte Bedeutung zu. Gemessen an der gesamten Chemieproduktion sind diese Produktionskapazitäten allerdings als sehr gering einzustufen: Beispielsweise beläuft sich der Anteil der aktuell aufgebauten Produktionskapazitäten von 200 kt Bioethylen an der Weltjahresproduktion von Ethylen im Umfang von schätzungsweise 142 Mio. t (2010) lediglich auf 0,1 %.

Biobasierte Polymere, d.h. biobasierte Kunststoffe und Kunstfasern, stellen ein wichtiges Produktsegment der industriellen Biotechnologie und Bioökonomie dar. Innerhalb dieses Segments kann keine trennscharfe Fokussierung auf den Kernbereich (also die biotechnische Herstellung aus Biomasserohstoffen) aufrechterhalten werden. Dies liegt daran, dass sich die Bezeichnung »Bio« auf den Rohstoff (Biomasse statt fossile Rohstoffe), die Herstellungsweise (biotech-



nologisch statt chemisch) oder die biologische Abbaubarkeit beziehen kann. Außerdem werden biobasierte Kunststoffe zunehmend mit Polymeren aus fossilen Rohstoffen gemischt, um die für eine bestimmte Anwendung gewünschten Materialeigenschaften zu erhalten. Darüber hinaus gibt es Polymere, die sich aus petrochemischen und biobasierten Bausteinen zusammensetzen. Beispiele hierfür sind Biopolyethylterephthalat (Bio-PET 30) oder Polytrimethylterephthalat (PTT), bei denen die Alkoholkomponente biotechnisch aus Biomasse hergestellt wird, während der Terephthalatbaustein aus fossilen Rohstoffen stammt.

Im Jahr 2013 belief sich die weltweite Produktionskapazität für Biokunststoffe auf 1,6 Mio. t. Darin enthalten sind Produktionskapazitäten für Biokunststoffe mit biotechnischen Verfahrensschritten im Umfang von rund 1,4 Mio. t, was 75% der weltweiten Produktionskapazität für Biokunststoffe entspricht. 1,1 Mio. t dieser Produktionskapazität entfallen auf Drop-in-Chemikalien, was auf die aktuell hohe Bedeutung dieser – risikomindernden – Markterschließungsstrategie hinweist. Die Weltproduktion für Kunststoffe betrug im Jahr 2013 299 Mio. t. Wenn auch Produktionskapazitäten und Produktionsmengen nicht direkt vergleichbar sind, lässt sich aus diesen Zahlen doch abschätzen, dass sich der Anteil der Biokunststoffe an allen Kunststoffen auf ca. 0,5% belaufen dürfte. Auch wenn ein erheblicher Ausbau der Produktionskapazität für Biokunststoffe von 1,6 Mio t (2013) auf 6,7 Mio. t (2018) erwartet wird, werden Biokunststoffe im Gesamtkunststoffmarkt vorerst eine Nische bleiben.

Somit lässt sich konstatieren, dass die Produktionskapazitäten für Biokunststoffe sowie die korrespondierenden Marktgrößen – von niedrigem Niveau aus – in den letzten Jahren deutlich gewachsen sind. Hierbei ist eine stetige Zunahme der Anzahl und Vielfalt von Biokunststoffen sowie der daraus hergestellten Produkten zu verzeichnen. Hierzu haben die kontinuierliche Verbesserung der Qualität der Biokunststoffe sowie die bessere Verfügbarkeit materialtechnischer Informationen wesentlich beigetragen. Stand Ende der 1980er Jahre bei der Biokunststoffentwicklung die Eigenschaft der biologischen Abbaubarkeit im Vordergrund, so hat sich der Schwerpunkt in den letzten Jahren von den bioabbaubaren zu den beständigen Biokunststoffen verlagert. Das künftige Marktwachstum wird ganz wesentlich von den beständigen Biokunststoffen bestimmt werden, nicht zuletzt deshalb, weil sie es ermöglichen werden, neue Anwendungsbereiche für Biokunststoffe über den Verpackungssektor hinaus zu erschließen, insbesondere im Automobilbau, der Bauwirtschaft sowie bei Konsumgütern. In materialtechnischer Hinsicht werden sich zudem die Grenzen zwischen den früher klar getrennten Bereichen der Biokunststoffe einerseits und der petrochemischen Kunststoffe andererseits zunehmend verwischen, da naturfaserverstärkte petrochemische Kunststoffe, chemiefaserverstärkte Biokomposite sowie petrochemische Kunststoffe mit biobasierten Anteilen (z. B. Bio-PET 30) an Bedeutung gewinnen.

Zurzeit ist erst bei wenigen Biokunststoffen (PLA, Bio-PE, Bio-PET) Kostenwettbewerbsfähigkeit mit petrochemischen Kunststoffen erreicht bzw. absehbar. Durch weitere Prozessverbesserungen, Steigerung der Ausbeute und Skaleneffekte in größeren Produktionsanlagen wird sich die Preisdifferenz zwischen Biokunststoffen und petrochemischen Kunststoffen in den kommenden Jahren voraussichtlich verkleinern lassen. Produktionsstandorte für Biokunststoffe werden vor allem in Asien und Südamerika aufgebaut. Während Deutschland als Biokunststoffproduktionsstandort (Produktionskapazität im Jahr 2011 79.000 t) aktuell und künftig nur eine untergeordnete Bedeutung zugesprochen wird, wird bei Forschung, Entwicklung, Verarbeitung und Anwendung von Biokunststoffen Deutschland eine international bedeutende Rolle zugemessen. Diese Einschätzung beruht auf dem umfassenden technischen Kunststoff-Know-how in der chemischen Industrie Deutschlands, einem gut entwickelten Kunststoffmaschinenbau, zahlreichen mittelständischen Kunststoffverarbeitern sowie potenziell großen Absatzmärkten, beispielsweise im Automobilbau, der Bauwirtschaft und im Verpackungsbereich.

Lebensmittel- und Getränkeherstellung

Der Biotechnologie kommt bei der Lebensmittel- und Getränkeherstellung eine wichtige Rolle zu. Seit Jahrtausenden werden Lebensmittel und Getränke durch Gärungsmethoden hergestellt. Die zunächst traditionellen und handwerklichen Verfahren sind heutzutage auf eine moderne wissenschaftliche Grundlage gestellt und im Hinblick auf industrielle Produktionsprozesse weiterentwickelt und optimiert worden. Der Biotechnologie kommt in den industriellen Verarbeitungsprozessen der Lebensmittel- und Getränkeindustrie – zusätzlich zu den traditionellen biotechnischen Verfahren – wachsende Bedeutung zu, sofern sie zu folgenden Zielen signifikante Beiträge leistet:

- > Kostensenkung durch Ertrags- und Ausbeuteerhöhung, Verkürzung von Prozessdauer und Reifezeiten, Erschließung kostengünstiger Rohstoffe, Verringerung der erforderlichen Zahl der Prozessschritte, Verringerung von Rest- und Abfallstoffen bzw. Gewinnung von Wertstoffen aus Reststoffen;
- > Erhöhung von Prozesssicherheit und -stabilität, Vermeidung von Fehlproduktionen und Qualitätsmängeln;
- > Erhöhung der Produktqualität bzw. Gewährleistung eines einheitlichen Qualitätsniveaus;
- > innovative Produkte mit höheren Gewinnmargen.

Eine Besonderheit des Lebensmittelmarktes innerhalb der industriellen Biotechnologie ist, dass der Einsatz gentechnisch veränderter Organismen (GVO) durch die ablehnende Haltung von Handel und Verbrauchern stark einge-



schränkt ist. So werden auf dem deutschen Markt keine bzw. nur sehr wenige Lebensmittel angeboten, die ein GVO sind, aus einem GVO hergestellt wurden oder GVO enthalten und deshalb kennzeichnungspflichtig sind. Gleichwohl ist ein beträchtlicher Anteil der Produkte der Lebensmittel- und Getränkeindustrie indirekt mit Gentechnik verbunden, da ihr Produktionsprozess nicht kennzeichnungspflichtige Gentechnikanwendungen beinhaltet. Dies betrifft beispielsweise tierische Lebensmittel, wenn die Tiere mit Futter aus gentechnisch veränderten Pflanzen gefüttert werden, sowie Lebensmittelenzyme, Zusatzstoffe, Vitamine und Aromen, die mithilfe gentechnisch veränderter Mikroorganismen hergestellt werden.

Textilherstellung und -veredlung

In der Textilindustrie werden traditionell nasschemische Verfahren zur Verarbeitung der Fasern eingesetzt, was Potenziale bietet, chemische durch biotechnische Prozesse zu ergänzen bzw. zu ersetzen. Enzymatische Prozesse kommen bei der industriellen Verarbeitung von Naturfasern (vor allem Baumwolle, Wolle, Seide sowie aus Faserzellstoff hergestellte Fasern) zu Geweben in der Bekleidungsindustrie routinemäßig zum Einsatz. Allerdings verarbeitet die Textilindustrie vor allem synthetische Fasern. Es ist Gegenstand der aktuellen FuE-Arbeiten, für eine breitere Nutzung biotechnischer Prozesse bzw. Prozessschritte das Potenzial von Enzymen zur Oberflächenmodifikation und Funktionalisierung synthetischer Fasern auszuloten. Der Nachweis der Machbarkeit einer enzymatischen Oberflächenmodifikation wurde für die wirtschaftlich bedeutendsten synthetischen Fasern, nämlich für Polyester, insbesondere Polyethylterephthalat (PET), für Polyamide sowie für Polyacrylnitril erbracht. Um die Prozesse zur industriellen Anwendungsreife zu bringen, werden die Optimierung der Enzyme, ihre effiziente Herstellung im industriellen Maßstab sowie die Entwicklung entsprechender Textilveredlungsprozesse erforscht.

Eine für die deutsche Textilindustrie besonders wichtige Produktgruppe sind technische Textilien. Für die Herstellung und Funktionalisierung technischer Textilien sind biotechnische Verfahren insofern von Interesse, als Enzyme oder andere funktionelle Biomoleküle an Fasern gekoppelt werden können. Durch die Aktivität der Enzyme könnte beispielsweise die kontrollierte Freisetzung bestimmter funktioneller Stoffe aus den Textilien ausgelöst werden, um beispielsweise Textilien antimikrobiell auszurüsten, Verstopfungen von textilen Filtern zu verzögern oder Wundheilung durch textile Verbandsmittel zu fördern. Die praktische Relevanz solcher Konzepte ist noch gering, da erst noch kosteneffiziente Lösungen entwickelt werden müssen, die die Langzeitstabilität und -aktivität der an der textilen Matrix immobilisierten Biomoleküle im praktischen Gebrauch der Textilien (z. B. häufiges Waschen) gewährleisten.

Zellstoff- und Papierindustrie

In der Zellstoff- und Papierindustrie sind enzymatische Verfahren zum Bleichen von Faserstoffen, zur enzymatischen Fasermodifikation sowie zur Kontrolle von Störstoffen im Papierherstellungsprozess kommerzialisiert. Noch im Stadium von Pilotanlagen befinden sich biotechnische Verfahren zur Herstellung von Faserstoffen (Biopulping).

Ökonomische Perspektiven der industriellen Biotechnologie

Durch die zunehmende Reife und Kommerzialisierungsmöglichkeiten in der industriellen Biotechnologie wächst ihre ökonomische Bedeutung. Für die nächsten Jahre sagen zahlreiche Marktstudien ein erhebliches Wachstum voraus. Für die Segmente Bulkchemikalien, Fein- und Spezialchemikalien sowie Polymere wird jeweils ein deutlicher Anstieg des Anteils der biotechnologisch hergestellten Produkte am Gesamtmarkt erwartet. Die Marktgröße für biotechnologisch hergestellte Chemikalien insgesamt wird für das Jahr 2012/2013 in den meisten Marktstudien auf etwas über 100 Mrd. Euro bzw. US-Dollar geschätzt. Für das Jahr 2017/2018 wird in vielen Studien eine Marktgröße von über 250 Mrd. Euro bzw. US-Dollar und im Jahr 2025 von über 500 Mrd. US-Dollar prognostiziert. Der Anteil biotechnologisch hergestellter Produkte am gesamten Chemiemarkt würde demnach deutlich steigen: vom niedrigen einstelligen Prozentbereich 2005 bis auf 20 bis 30% im Zeitraum 2020 bis 2025. In der Rückschau erwiesen sich die Marktprognosen bisher als zu optimistisch, die künftigen Zuwächse wurden überschätzt. Dies liegt nicht zuletzt auch daran, dass die Kommerzialisierung der industriellen Biotechnologie von einer Vielzahl von sehr unterschiedlichen Treibern und Barrieren beeinflusst wird – darunter Rohstoffpreise, technologische Durchbrüche und Herausforderungen, Nachhaltigkeitsbilanzanforderungen sowie Finanzierungsfragen. Hierzu wurden im Rahmen dieses Berichts schwerpunktmäßig ausgewählte wirtschaftliche Aspekte betrachtet, und zwar die Entwicklung der Unternehmen der industriellen Biotechnologie und ihrer Geschäftsmodelle, die Kostenwettbewerbsfähigkeit biobasierter Produkte mit chemischen Produkten auf fossiler Rohstoffbasis sowie die internationale Standortwettbewerbsfähigkeit Deutschlands.

Rohstoffkosten: Wegen der Marktbedingungen werden für biotechnologisch hergestellte bzw. biobasierte Bulkchemikalien die Rohstoffkosten eine ganz entscheidende Rolle spielen. Allerdings kann – wie vor allem die Entwicklung des Ölpreises in den Jahren 2014 und 2015 zeigt – nicht davon ausgegangen werden, dass in absehbarer Zeit Agrarrohstoffe deutlich kostengünstiger als fossile Rohstoffe werden, denn aufgrund von zahlreichen Angebots- und Nachfragebeziehungen sind die Preise für Agrarrohstoffe und -produkte eng mit dem

Ölpreis gekoppelt. Deshalb ist eine erhebliche Verbesserung der relativen Kostenvettbewerbsfähigkeit biobasierter Produkte gegenüber ölbasierten Produkten vorerst nicht zu erwarten.

Industrielle Entwicklung und Geschäftsmodelle: Mit dem zunehmenden Reifegrad der Technologie nehmen die Unternehmensaktivitäten in Deutschland zu. Die Unternehmenslandschaft in der industriellen Biotechnologie ist aber sehr differenziert. Bei den dedizierten Biotechnologieunternehmen (das sind Unternehmen, die sich auf Biotechnologie spezialisiert haben) sind etwa 10% der industriellen Biotechnologie zuzuordnen, die absolute Anzahl dieser in der Regel kleineren Unternehmen lag in den letzten Jahren gleichbleibend bei etwa 60. Häufig handelt es sich dabei schwerpunktmäßig um Dienstleister und Technologieentwickler. In einigen Fällen lässt sich eine Weiterentwicklung hin zu hybriden Geschäftsmodellen mit Dienstleistungs- und Produktionsaktivitäten beobachten. Solche Aktivitäten können dazu beitragen, das Marktpotenzial biobasierter Produkte künftig besser auszuschöpfen. So könnte eine größere Anzahl diversifizierter kleiner und mittlerer Unternehmen durch neue Produkte und Dienstleistungen Märkte schaffen, die für Großunternehmen (zunächst) unattraktiv sind, weil sie (noch zu) klein sind. In der Unternehmenslandschaft der industriellen Biotechnologie kommt großen diversifizierten Unternehmen, in denen Biotechnologie nur einen Teil der Geschäftstätigkeit ausmacht, eine wichtige Rolle zu. Diese Unternehmen sind häufig von ihrem Kerngeschäft in der Chemie bzw. im Agro-Food-Bereich ausgehend in der industriellen Biotechnologie aktiv. Die Unternehmen haben ihre Aktivitäten, Strategien und Geschäftsmodelle in unterschiedlicher Weise weiterentwickelt, indem sie entweder verstärkt internes biotechnologisches Know-how aufbauen oder zunehmend Kooperationen eingehen. Ein einheitliches Kooperations- oder Geschäftsmodell lässt sich dabei aber nicht feststellen. Insgesamt zeigt sich somit ein zunehmend ausdifferenziertes Bild von Akteuren und Kooperationen, das aber lediglich eine Momentaufnahme darstellt. Noch ist nicht abzusehen, wohin sich die Industriestruktur letztlich weiterentwickeln wird.

Internationale Wettbewerbsfähigkeit: Zur Bestimmung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Unternehmen in der industriellen Biotechnologie liegen nur begrenzt vergleichbare Daten vor. Anhand verschiedener Indikatorgruppen können tendenziell folgende Erkenntnisse abgeleitet werden.

- > Patente: Gemessen an Patenten verfügt Deutschland im internationalen Vergleich über eine gute technologische Basis in der industriellen Biotechnologie. Dies liegt allerdings an der allgemein hohen Patentierungsaktivität deutscher Akteure, es ist keine Spezialisierung Deutschlands in der industriellen Biotechnologie zu erkennen.
- > Anzahl der Unternehmen: Zur Anzahl der in der industriellen Biotechnologie aktiven Unternehmen liegen keine vollständigen Daten im internatio-

- nenal Vergleich vor. Die verfügbaren Daten zu dedizierten Biotechnologieunternehmen in der industriellen Biotechnologie und die Aktivitäten der entsprechenden deutschen Großunternehmen deuten darauf hin, dass Deutschland im internationalen Vergleich über eine vielversprechende Basis an industriellen Akteuren in der industriellen Biotechnologie verfügt.
- › Produktionsstandort: Deutschland hat als Produktionsstandort bei traditionellen Produkten, die mit industriellen biotechnologischen Verfahren hergestellt werden (u. a. Enzyme, Vitamine, Aminosäuren wie Lysin), eine nur begrenzte Bedeutung. Zudem findet der Aufbau von Produktionsstätten für biobasierte Bulkchemikalien bislang außerhalb Deutschlands statt. Als Hauptgründe gelten die in Deutschland vergleichsweise geringe Rohstoffverfügbarkeit und die hohen Rohstoffkosten.
 - › Exporte: Deutschland hat als Exporteur bei etablierten Produkten der industriellen Biotechnologie (u. a. Enzyme, Vitamine, Lysin) an Bedeutung verloren und liegt weltweit mittlerweile an fünfter Stelle bei den Handelsanteilen. Außerdem ist die deutsche Außenhandelsbilanz bei den Produktgruppen, die der industriellen Biotechnologie zuzuordnen sind, deutlich schlechter als bei Industriewaren insgesamt.

Wie bei der internationalen Wettbewerbsfähigkeit in anderen Technologiebereichen zeichnet sich auch für die industrielle Biotechnologie ab, dass Deutschland eine starke Position bei technologischem Wissen einnimmt, aber eine nur begrenzte Bedeutung als Produktionsstandort bei Massenprodukten hat. Aus ökonomischer Perspektive wäre anzustreben, dass Deutschland nicht nur eine Rolle als Technologieführer in der industriellen Biotechnologie erreicht, sondern auch in der Produktion eine nennenswerte Stellung einnimmt, die langfristig auch Rückwirkung für die Entwicklung als FuE-Standort hat. Die Etablierung von Produktionsprozessen für Produkte mit vergleichsweise geringem Produktionsvolumen und geringem Rohstoffkostenanteil an den Produktionskosten erscheint für den Standort Deutschland im internationalen Wettbewerb am ehesten möglich. Hierzu zählen beispielsweise Fein- und Spezialchemikalien sowie die Verarbeitung von Biokunststoffen.

Sofern sich das erhoffte Marktwachstum für Produkte und Verfahren der industriellen Biotechnologie realisieren lässt und es Deutschland gelingt, eine gute Wettbewerbsposition in den aufkommenden Segmenten zu erreichen, sind erhebliche positive Auswirkungen für die heimische Volkswirtschaft zu erwarten – allerdings gibt es nur wenige einschlägige Studien mit quantifizierten Ergebnissen. In der Tendenz weisen die Studien darauf hin, dass signifikante Effekte vor allem in der Sicherung bestehender Arbeitsplätze liegen können. Ein deutlicher absoluter Zuwachs an Arbeitsplätzen in den betreffenden Industrien ist durch die industrielle Biotechnologie hingegen nicht zu erwarten, da es voraussichtlich meist zu einer Substitution existierender Märkte und Wertschöp-



fungsketten – mit nur begrenzt unterschiedlicher Produktionsstruktur – kommen wird. Da Deutschland bereits jetzt einen hohen Marktanteil in diesen Wertschöpfungsketten innehat, ist ein deutlicher Zugewinn von Marktanteilen in diesen Wertschöpfungsketten eher unwahrscheinlich. Diese Art von volkswirtschaftlichen Effekten ist jedoch typisch für Querschnittstechnologien. Deshalb sollte die Bedeutung der industriellen Biotechnologie für das Wachstum etablierter Branchen nicht unterschätzt werden.

Einleitung

I.

Biotechnische Verfahren zur Stoffproduktion und -umwandlung nutzen die Stoffwechselleistungen von Mikroorganismen (Bakterien, Hefen, Pilze, Mikroalgen) und die katalytischen Eigenschaften von subzellulären Komponenten, meist Enzymen, zum Auf-, Um- oder Abbau von Substanzen. Diese biokatalytischen Prozesse laufen – im Gegensatz zur klassischen Chemie – unter milden Bedingungen in Bezug auf Temperatur, Druck und pH-Wert, in wässrigen Medien und mit hoher Selektivität und Spezifität ab. Zudem entfalten biotechnische Verfahren klassischerweise ihre besonderen Stärken dort, wo es um die Umwandlung von Naturstoffen, d. h. von Lebewesen synthetisierten Substanzen geht. Dies sind insbesondere Biomassekomponenten.

Seit mit der Biotechnologie als Natur- und Ingenieurwissenschaft die eher handwerklich-empirisch entwickelten biotechnischen Verfahren, beispielsweise zur industriellen Antibiotika-, Enzym- oder Aminosäureproduktion, auf eine wissenschaftliche Basis gestellt und durch Anwendung gentechnischer Methoden und der Bioverfahrenstechnik in ihrer Leistungsfähigkeit signifikant verbessert wurden, hat sich die Anwendung biotechnischer Verfahren in der industriellen Produktion, die sogenannte industrielle oder auch weiße Biotechnologie, sehr dynamisch entwickelt.

Zunächst wurden biotechnische Verfahren nur eingesetzt, um Naturstoffe zu produzieren, die mit anderen Methoden nicht in großem Maßstab wirtschaftlich herstellbar waren. In den 1980er und 1990er Jahren wurden außerdem die Eigenschaften von Enzymen genutzt, hochspezifisch und -selektiv Stoffumwandlungen zu katalysieren, die mit klassischer Syntheschemie nicht oder nur sehr aufwendig durchführbar waren, um hochpreisige Fein- und Spezialchemikalien industriell herzustellen. Mit der Ergänzung des nachsorgenden durch den produktionsintegrierten Umweltschutz in den 1990er Jahren wurde auch ausgelotet, inwieweit biotechnische Verfahren aufgrund ihrer zuvor genannten Spezifika Beiträge zur Ressourcenschonung und zur Vermeidung von Umweltbelastungen leisten könnten. Im Mittelpunkt des Interesses standen Feinchemikaliensynthesen in der chemischen Industrie sowie nasschemische Prozesse in der Lebensmittel-, Getränke-, Textil-, Leder- und Zellstoff- und Papierindustrie bei der Umsetzung von Naturstoffen (Brellocks et al. 2001; Hüsing et al. 1998 u. 2003; Marscheider-Weidemann/Hüsing 2004; Rhein et al. 2002). An zahlreichen Fallbeispielen konnte gezeigt werden, dass durch die Substitution von chemischen durch biotechnische Prozesse oder Verfahrensschritte eine umweltfreundlichere, risikoärmere und wirtschaftlicher zu betreibende Produktion erreicht werden kann (Hoppenheidt et al. 2005; OECD 2001 u. 2011; Renner/Klöpfer 2005). Denn wegen der besonderen Eigenschaften der Biokatalysa-



toren kann ihr Einsatz in Produktionsprozessen dazu führen, dass Wirkungsgrad bzw. Ausbeute steigen, Rohstoff- und Energieverbräuche sinken und die Entstehung nicht erwünschter Neben- und Kuppelprodukte, Reststoffe und Emissionen minimiert wird. Auch der Einsatz giftiger oder nicht abbaubarer Stoffe kann fallweise verringert werden.

Allerdings zeigte sich, dass der Biotechnologie in industriellen Produktionsverfahren nur eine Art Exotenstatus zukam und ihr Einsatz weitgehend auf Nischen und Spezialprodukte begrenzt bleibt, solange ihr Lösungsbeitrag auf die Vermeidung von Umweltverschmutzungen reduziert wird. Dies hat sich inzwischen gewandelt: Biotechnische Verfahren in der Industrie haben auch das Potenzial, zu industrieller Wettbewerbsfähigkeit und Innovation beizutragen, indem sie innovative Prozesse und Produkte mit neuartigen Produktqualitäten ermöglichen, sodass auf diese Weise die internationale Wettbewerbsfähigkeit der Industrie erhalten bzw. ausgebaut werden kann.

Deshalb wird die industrielle Biotechnologie heute als eine der Schlüsseltechnologien (»Key Enabling Technologies«; Europäische Kommission 2012) für die industrielle Produktion aufgefasst. Die industrielle Biotechnologie ist sowohl Grundlage als auch Impulsgeber für die sogenannte Bioökonomie, der zurzeit international und national innovationspolitisch ein hoher Stellenwert zugemessen wird (BMBF 2010 u. 2014; BMEL 2014; Bundesregierung 2012; European Commission 2012; Staffas et al. 2013; Strategiekreis Bioökonomie 2013). Unter Bioökonomie werden die wissensbasierte Erzeugung und die Nutzung nachwachsender Ressourcen verstanden, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen. Das Konzept der Bioökonomie umfasst danach alle Wirtschaftssektoren und ihre zugehörigen Dienstleistungsbereiche, die nachwachsende Ressourcen – wie Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen und deren Produkte – erzeugen, be- und verarbeiten, nutzen oder damit handeln (BMEL 2014). Damit wird mit der Bioökonomie angestrebt, die bislang ganz überwiegend fossile Rohstoffbasis der Industrie durch biogene Rohstoffe zu ergänzen und zu ersetzen. Biomasse wird als Rohstoff für die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln, Energieträgern oder als Rohstoff für die Herstellung von Chemikalien und Materialien verwendet. Indem die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet wird, wird von der Bioökonomie ein signifikanter Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung erwartet. Dies schließt den nachhaltigen Umgang mit den natürlichen Lebensgrundlagen Wasser und Boden, den Schutz der Biodiversität sowie die Berücksichtigung sozialer Interessen ein (Strategiekreis Bioökonomie 2013, S. 13).

Zielsetzung

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages hat sich zuletzt 1996 mit der Katalyse, einem wichtigen Teilbereich der industriellen Biotechnologie, befasst (TAB 1996). Seitdem hat sich die industrielle Biotechnologie sehr dynamisch entwickelt.

Deshalb wird in diesem Sachstandsbericht der aktuelle Wissensstand zu wissenschaftlich-technischen und ökonomischen Aspekten der industriellen Biotechnologie dokumentiert. Der Sachstandsbericht bildet Teil I der TAB-Innovationsanalyse »Weiße Biotechnologie«. Teil II (TAB 2016) analysiert vertiefend die Umwelt- und Nachhaltigkeitspotenziale der industriellen Biotechnologieanwendungen.

Definition und Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes

Die industrielle Biotechnologie, häufig auch als weiße Biotechnologie bezeichnet, umfasst die Nutzung biotechnischer Verfahren in der industriellen Produktion. Sie ist Grundlage und wichtiger Impulsgeber für die Bioökonomie, stellt jedoch nur einen Teilbereich innerhalb der Bioökonomie dar. . Biotechnische Verfahren nutzen die Stoffwechselleistungen bzw. katalytischen Eigenschaften von Mikroorganismen (Bakterien, Hefen, Pilze, Mikroalgen) und subzellulären Komponenten, meist Enzyme, zur Auf-, Um- oder Abbau von Substanzen. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um biotechnische Verfahren (Fermentationen, enzymatische Verfahren) zur Konversion von Biomasse für die industrielle stoffliche Nutzung.

Relevante Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes sind die chemische Industrie, die Lebensmittel-/Getränkeherstellung, die Textilherstellung/-veredlung, die Lederherstellung, die Zellstoff-/Papierherstellung, die Automobilindustrie sowie Bergbau und Metallgewinnung und Umweltbiotechnik.

Relevante Produktgruppen sind Bulk-, Fein- und Spezialchemikalien, technische Enzyme, Biopolymere und Biowerkstoffe, Wasch- und Reinigungsmittel, Lebensmittel und Getränke, Textilien, Leder, Zellstoff, Papiere und Pappe, Metalle. Dazu kommen Verfahren zur Wasser-, Boden- und Luftbehandlung.

In diesem Sachstandsbericht werden nicht zur industriellen Biotechnologie gezählt:

- > die land- und forstwirtschaftliche sowie gartenbauliche Erzeugung von Biomasse,
- > die Herstellung von Bioenergieträgern (z.B. Wasserstoff) und Biokraftstoffen (z.B. Bioethanol, Biodiesel) bzw. die energetische Nutzung von Biomasse, selbst wenn dabei biotechnische Verfahren zum Einsatz kommen,



- › die Erzeugung, Verarbeitung und Nutzung nachwachsender Rohstoffe, deren Verarbeitung keine biotechnischen Verfahren umfasst (z. B. Holz, Pflanzenfasern), sowie
- › die pharmazeutische Industrie und ihre Produkte, selbst wenn zu ihrer Herstellung biotechnische Verfahren eingesetzt werden, da dieses Anwendungsfeld aufgrund seiner vielen Besonderheiten traditionell als Teil der roten Biotechnologie separat behandelt wird.

In der Produktgruppe der Biokunststoffe kann eine trennscharfe Fokussierung auf den zuvor abgegrenzten Untersuchungsgegenstand des Sachstandsberichts nicht durchgängig aufrechterhalten werden. Dies liegt zum einen daran, dass sich für diese Produktgruppe keine einheitlich verwendeten Begrifflichkeiten durchgesetzt haben. So kann sich »Bio« auf den Rohstoff (Biomasse statt fossile Rohstoffe), die Herstellungsweise (biotechnisch statt chemisch) oder die biologische Abbaubarkeit beziehen. Ein als Biokunststoff bezeichnetes Material kann (je nach Definition) eine oder mehrere dieser Eigenschaften aufweisen. Zum anderen geht in dieser Produktgruppe die Entwicklung in Richtung beständiger Werkstoffe, die also gerade nicht leicht abbaubar sein sollen. Zur Optimierung der Werkstoffeigenschaften werden zunehmend Werkstoffe auf Biomasse- und fossiler Rohstoffbasis miteinander in einem Produkt kombiniert, und es kommen zunehmend sowohl biotechnische als auch konventionelle chemische Verfahren im Produktionsprozess zum Einsatz. Welche Definition und Abgrenzung fallweise verwendet wird, wird in den jeweiligen Textpassagen kenntlich gemacht.

Gliederung des Berichts

In Kapitel II werden die aktuelle Wissensbasis und die zurzeit verfolgten wissenschaftlich-technischen Entwicklungslinien in der industriellen Biotechnologie dargestellt. Zunächst wird der Rohstoff Biomasse charakterisiert und seine aktuelle und mögliche künftige Nutzung dargestellt. Anschließend werden die Biokatalysatoren beschrieben, die die Stoffumwandlung der Biomasse zu den gewünschten Produkten katalysieren. Hierbei werden sowohl industriell relevante organismenbasierte als auch zellfreie Produktionsplattformen berücksichtigt. Es folgt eine Übersicht über Methoden zur Optimierung biotechnischer Prozesse, die vom Screening über Metabolic und Protein Engineering, Systembiologie und Synthetische Biologie bis zur Bioverfahrenstechnik reichen. Abschließend wird ein Überblick über den Entwicklungsstand von Bioraffinerien gegeben.

In Kapitel III wird der aktuelle Stand der Anwendungen und Produkte der industriellen Biotechnologie in relevanten Wirtschaftszweigen dargestellt.



In Kapitel IV werden die wirtschaftliche Entwicklung und die wirtschaftliche Bedeutung der industriellen Biotechnologie untersucht. Es werden sowohl die bisherige Entwicklung als auch treibende und hemmende Faktoren für die zukünftige Entwicklung dargestellt. Dabei werden mit der Marktentwicklung, der Entwicklung der Industrie und ihre Geschäftsmodelle, der Betrachtung der (Kosten-)Wettbewerbsfähigkeit der Prozesse und Produkte der industriellen Biotechnologie sowie der internationalen Wettbewerbsfähigkeit vier Aspekte analysiert, die für die Marktdurchdringung und die Realisierung von wirtschaftlichen Effekten am Standort Deutschland von zentraler Bedeutung sind. Zudem werden die aktuellen Erkenntnisse über die volkswirtschaftlichen Effekte der industriellen Biotechnologie dargestellt.

Im Anhang finden sich Tabellen mit vertiefenden Informationen sowie ein Glossar der verwendeten Fachbegriffe.



Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der industriellen Biotechnologie

II.

In diesem Kapitel werden die aktuelle Wissensbasis und die zurzeit verfolgten wissenschaftlich-technischen Entwicklungslinien in der industriellen Biotechnologie dargestellt. Zunächst wird der Rohstoff Biomasse charakterisiert und seine aktuelle und mögliche künftige Nutzung dargelegt (Kap. II.1). Anschließend werden die Biokatalysatoren beschrieben, die die Stoffumwandlung der Biomasse zu den gewünschten Produkten katalysieren. Hierbei werden sowohl industriell relevante organismenbasierte als auch zellfreie Produktionsplattformen berücksichtigt (Kap. II.2). Es folgt eine Übersicht über Methoden zur Optimierung biotechnischer Prozesse, die vom Screening über Metabolic und Protein Engineering, Systembiologie und Synthetische Biologie bis zur Bioverfahrenstechnik reicht (Kap. II.3). Abschließend wird ein Überblick über den Entwicklungsstand von Bioraffinerien gegeben (Kap. II.4).

Rohstoffbasis

1.

Dem Wandel zu einer biobasierten Wirtschaft ist inhärent, dass Biomasse verstärkt als Roh- und Ausgangsstoff für Produktionsprozesse genutzt werden muss. Im Folgenden wird dargelegt, wie Biomasse definiert wird, wie viel Biomasse potenziell industriell genutzt werden kann und wie viel tatsächlich genutzt wird. Abschließend werden drei ausgewählte Ansätze zur Erweiterung des industriell nutzbaren Biomasse- und Substratspektrums vorgestellt.

Definition

1.1

Unter Biomasse versteht man Stoffe biologischen Ursprungs, d.h. die von Lebewesen stammen (Thrän/Gawor 2013). Hierzu zählen üblicherweise lebende und tote Mikroorganismen und Pilze, Pflanzen (darunter Algen, landwirtschaftliche Nutzpflanzen, Bäume) und Tiere. Außerdem werden Reststoffe biologischen Ursprungs zur Biomasse gezählt: Dies sind beispielsweise Reststoffe aus der Forstwirtschaft und Pflanzenproduktion (z.B. Rinden, Stroh, Kraut und Stängel), aus der Tierproduktion (z.B. Gülle, Mist), Reststoffe aus der Lebensmittel- und Getränkeherstellung (z.B. Melasse, Trester, Schlempen), Belebtschlamm aus der biologischen Abwasserreinigung und die organische Fraktion des Hausmülls. Obwohl ebenfalls biologischen Ursprungs, wird in geologische

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

Formationen eingeschlossenes Material nicht zur Biomasse gerechnet. Dies umfasst die fossilen Rohstoffe Kohle, Erdgas und Erdöl.

Biomasse ist ein komplexes Substanzgemisch. Sie besteht schätzungsweise zu 75 % aus Kohlenhydraten (vor allem Stärke, Cellulose, Chitin und Saccharose), zu 20 % aus Lignin und zu ca. 5 % aus Fetten und Ölen, Proteinen und verschiedenen anderen Inhaltsstoffen (Soetaert/Vandamme 2010, S.6f.), wobei sich die Gehalte sowohl in qualitativer als auch quantitativer Hinsicht je nach Organismus, der die jeweilige Biomasse liefert, in weiten Grenzen unterscheiden.

Biomassepotenzial

1.2

Eine zentrale Frage für die weitere Entwicklung der industriellen Biotechnologie sowie der Bioökonomie insgesamt ist, welche Biomassepotenziale überhaupt zur Verfügung stehen und inwieweit diese – im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung – für die industrielle Nutzung erschlossen werden können. Bei der Interpretation von Angaben zum Biomassepotenzial muss aber stets berücksichtigt werden, welches Potenzial abgeschätzt wurde. Tabelle II.1 gibt eine Übersicht zu den verschiedenen Typen von Potenzialabschätzungen:

Theoretisches Potenzial: Das theoretische Potenzial entspricht der gesamten Biomasse auf der Erde. Basis für die Bildung von Biomasse ist die Primärproduktion, bei der photo- oder chemoautotrophe Organismen (Pflanzen, Bakterien) unter Nutzung der Energie aus dem Sonnenlicht oder aus chemischen Verbindungen Biomasse aus anorganischen Substanzen aufbauen und damit die Grundlage für den Kohlenstoffkreislauf legen. Etwa 1 % der Sonnenstrahlung, die die Erde erreicht, wird in Biomasse umgesetzt. Die globale Bruttoprimärproduktion wird auf 123 +/- 8 Mrd. t Kohlenstoff/Jahr (Beer et al. 2010; Ciais et al. 2013) geschätzt. Das sind mehr als 170 Mrd. t Biomasse/Jahr (Trockengewicht), die jeweils etwa zur Hälfte an Land bzw. in den Meeren produziert werden (Field et al. 1998).

Technisches Potenzial: Das technische Potenzial bezieht sich auf denjenigen Teil der Biomasse, der der menschlichen Nutzung zugänglich ist und mit den derzeit bzw. künftig verfügbaren Technologien für eine weitere Nutzung erschlossen werden kann.

Wirtschaftliches Potenzial: Das wirtschaftliche Potenzial bezieht sich auf denjenigen Teil des technischen Biomassepotenzials, dessen Nutzung auch unter Einbezug alternativer Nutzungspfade bzw. alternativer Rohstoffe und Technologien wirtschaftlich ist bzw. künftig wirtschaftlich werden kann.

Realisierbares Potenzial: Maßgeblich für den Bau und Betrieb von biomassebasierten Produktionsanlagen ist letztlich das realisierbare Potenzial. Es ist auf eine bestimmte Region bezogen und muss die konkrete, möglicherweise



aber unsichere Ausprägung einer Vielzahl von gesellschaftlichen, institutionellen, technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Einflussfaktoren berücksichtigen, die miteinander in Wechselwirkung stehen.

Tab. II.1 Einflussfaktoren auf Biomassepotenziale

Art des Biomassepotenzials	Einflussfaktoren
theoretisches Potenzial	klimatische, geografische und geologische Gegebenheiten, die die Nettoprimärproduktion beeinflussen
geografisches Potenzial	Eignung der Flächen für eine Bewirtschaftung, z. B. hinsichtlich Zugänglichkeit, Bodenfruchtbarkeit
technisch erschließbares Potenzial	Art und Leistungsfähigkeit der Biomasseumwandlungstechnologien Infrastruktur politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen
wirtschaftlich erschließbares Potenzial	Investitions- und Betriebskosten Kostenwettbewerbsfähigkeit mit Alternativen konkurrierende Land-, Ressourcen- und Biomassenutzungen politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen, Nachfrage
realisierbares Potenzial	auf konkrete Region bezogene Wechselwirkung zwischen relevanten gesellschaftlichen, institutionellen, technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Faktoren

Quelle: nach Thrän et al. 2010

Biomassebasierte Rohstoffe müssen generell mehrere technisch-wirtschaftliche Anforderungen erfüllen, um für die industrielle Biotechnologie geeignet zu sein. Hierzu zählen (Nusser et al. 2007, S. 41 f.):

- > Eignung für die herrschenden klimatischen und landwirtschaftlichen Bedingungen,
- > verlässliche Verfügbarkeit in den benötigten (großen) Mengen,
- > gleichbleibende Qualität und Zusammensetzung,
- > möglichst vollständige Bioverfügbarkeit und Umsetzbarkeit durch die in den jeweiligen biotechnischen Verfahren eingesetzten Organismen bzw. Biokatalysatoren, insbesondere Abwesenheit von Hemm-, Gift- und Störstoffen,

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

- › möglichst vollständige Nutzung aller Bestandteile des komplexen Biomassesubstanzgemisches,
- › möglichst geringe absolute Kosten, da die Wirtschaftlichkeit von Fermentationsverfahren wesentlich durch die Investitionskosten, Betriebskosten und Rohstoffkosten bestimmt wird,
- › Preisstabilität und Kalkulierbarkeit der Rohstoffkosten,
- › möglichst günstige Logistik, d. h. kurze Transportwege, ganzjährige Verfügbarkeit bzw. gute Lagerfähigkeit.

Durch die in den letzten Jahren intensiv geführte Tank-Trog-Teller-Diskussion (Rosegrant/Msangi 2014) wurde deutlich, welche Konkurrenzbeziehungen zwischen den verschiedenen Biomassenutzungsarten bestehen und welche indirekten Landnutzungsänderungseffekte (z. B. Intensivierung der Landwirtschaft, Umwandlung von bislang nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen in landwirtschaftlich genutzte, sozioökonomische und geopolitische Effekte) mit einer verstärkten Biomassenutzung für Nichtnahrungs- und Futtermittelzwecke verbunden sein können. Deshalb sind die zuvor genannten wirtschaftlich-technischen Anforderungen an die Nutzung von Biomasse als industriellem Rohstoff durch Nachhaltigkeitsaspekte zu ergänzen, die auch die soziale und ökologische Dimension berücksichtigen. Hierzu zählen die in Tabelle II.2 aufgeführten Aspekte. Während eine Nachhaltigkeitszertifizierung von Biomasse für die direkten Effekte von Biokraftstoffen im Transportsektor auf EU-Ebene eingeführt ist, sind entsprechende Standards für andere Nutzungsarten von Biomasse noch in der Erarbeitung (Ros et al. 2012).

Zu der Frage, inwieweit genügend Biomasse für eine Bioökonomie bereitgestellt werden kann, seien exemplarisch die Ergebnisse einer Literaturstudie genannt (Ros et al. 2012): Das realisierbare Biomassepotenzial hängt wesentlich von der Strenge der anzulegenden Nachhaltigkeitskriterien ab. Es erscheint möglich, mit nachhaltig produzierter Biomasse bis zum Jahr 2030 einen Anteil von 10 % am Rohstoff- und Energiebedarf der EU zu decken. In der Studie werden der Flächenbedarf und die mit den Landnutzungsänderungen verbundenen indirekten Effekte auf Biodiversität und Treibhausgasemissionen als kritischste Faktoren identifiziert. Daraus werden folgende Prioritäten für die künftige Biomassenutzung abgeleitet (Ros et al. 2012):

- › Erhöhung des Biomasseaufkommens durch Technologien, Prozesse und Infrastrukturen, ohne die Landnutzung direkt oder indirekt auszuweiten. Hierzu können beispielsweise Produktivitätssteigerungen in der Landwirtschaft durch Pflanzenzüchtung, verbesserte Anbaumethoden, verringerte Ernte- und Lagerverluste und die verstärkte Sammlung und Nutzung von biogenen Reststoffen beitragen.

- > Erschließung lignocellulosehaltiger Biomasse (Kap. II.1.4) und prioritäre Nutzung von Biomasse in Wirtschaftszweigen, in denen kaum Alternativen zu fossilen Rohstoffen bestehen (z.B. Biotreibstoffe im Flug- und Lastwagenverkehr; Kunststoffproduktion).
- > Entwicklung und Implementierung eines Zertifizierungssystems für nachhaltig produzierte Biomasse für alle Nutzungsarten.

Tab. II.2 Nachhaltigkeitsaspekte der Nutzung von Biomasse für industrielle Zwecke

Bereich	Ziele, Aspekte, Indikatoren
Landnutzung, Flächenverfügbarkeit, Landnutzungskonflikte	Klärung der Eigentumsverhältnisse der Flächen; Vermeidung negativer Folgen der durch die stoffliche Biomassenutzung getriebenen Landnutzungsänderung; Priorität für Sicherung der Ernährung und Lebensmittelproduktion
Biodiversität, Waldschutz	Vermeidung weiterer Verluste an Biodiversität, Vermeidung weiterer Entwaldung
Klimagasemissionen	Minimierung der Klimagasemissionen
Bodenerosion und Bodenfruchtbarkeit	Minimierung der Bodenerosion und der Verringerung der Bodenfruchtbarkeit; Erhalt des Humusgehalts des Bodens
Wasserressourcen	Minimierung des Wasserverbrauchs und der Wasserverschmutzung, Minimierung von Emissionen, die Eutrophierung und Versauerung von Gewässern bewirken
sozioökonomische Aspekte	Verbesserung von Arbeitsbedingungen und -sicherheitsstandards, Sicherung der Beschäftigung, faire Löhne und Teilhabe an der Wertschöpfung, Vermeidung gesundheitlicher Belastungen (insbesondere durch Stäube, NO _x , CO, Sommersmogverursachende Substanzen, Pilzsporen)
kulturelle Funktion der Natur	Schutz von Naturlandschaften; Erhalt traditioneller Kulturlandschaften

Quelle: adaptiert aus Thrän/Gawor 2013, S. 528

Aktuelle Nutzung von Biomasse

1.3

In diesem Teilkapitel wird eine Übersicht über die derzeitige Nutzung von Biomasse für industrielle Zwecke gegeben. Hierfür kommen grundsätzlich Rohstoffe aus der Forstwirtschaft (d.h. Holz), aus der Landwirtschaft sowie bio-basierte Reststoffe in Betracht. Eine erste Abschätzung für Deutschland wurde

^
 > II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
 v

durch Carus et al. 2014 durchgeführt. Sie ermittelten, dass sich das Gesamtaufkommen von Biomasse in Deutschland für stoffliche und energetische Nutzung im Jahr 2008 auf 168,4 Mio. t belief. Hieran hatte Holz einschließlich Restholz mit einem Aufkommen von 76,1 Mio. t den größten Anteil, gefolgt von Getreidestroh (> 35 Mio. t), sonstigen Ernteresten und landwirtschaftlichen Abfällen (> 30 Mio. t), sonstigen Reststoffe (z.B. Bioabfalltonne, Gartenabfälle) (15 Mio. t) und Agrarrohstoffen (3,5 Mio. t). Für die industrielle Biotechnologie spielen zurzeit die Agrarrohstoffe die wichtigste Rolle. Deshalb beschränken sich die weiteren Ausführungen auf diese in der landwirtschaftlichen Produktion gewonnenen Agrarrohstoffe.

Tab. II.3 Anbau von Nutzpflanzen für energetische und stoffliche Nutzung in Deutschland 2014

Art der Nutzung	Anbaufläche in 1.000 ha	landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland in %
landwirtschaftliche Nutzfläche	16.779	100
Pflanzen für Futtermittel	9.802	58,3
Pflanzen für Nahrungsmittel	4.440	26,2
Pflanzen für Nichtnahrungs- und Futtermittelnutzung	2.337	14,3
davon: Pflanzen für energetische Nutzung	2.074	12,5
darin: für Biodiesel	629	3,7
für Bioethanol	168	1,0
für Biogas	1.268	7,6
für Festbrennstoffe	9	0,1
davon: Pflanzen für stoffliche Nutzung	263	1,8
darin: für Öle	140	0,8
für Stärke	100	0,6
für Zucker	10	0,1
für Arznei- und Färbemittel	12	0,1
für Fasern	0,5	
Brache, Stilllegung	200	1,2

Quelle: FNR 2014a

Im Jahr 2014 wurden in Deutschland auf insgesamt 2.337.000 ha (das entspricht 14,3% der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland) landwirtschaftliche Nutzpflanzen für Nichtnahrungs- und Futtermittelzwecke angebaut. Dabei ent-

fielen 2.074.000 ha auf den Anbau von Pflanzen für energetische Nutzung und nur 263.000 ha auf den Anbau von Pflanzen für die stoffliche Nutzung (1,8 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche) (FNR 2014a) (Tab. II.3).

Tab. II.4 Einsatzmengen von Agrarrohstoffen für die industrielle stoffliche Nutzung in Deutschland 2011

	Einsatzmengen von Agrarrohstoffen	
	in 1.000 t	in %
gesamt	3.553	100
Kohlenhydrate	1.415	40
davon: Stärke	910	26
Chemiestärke	636	18
Papierstärke	274	8
Chemiezellstoff	401	11
Zucker	104	3
Naturfasern	163	5
Öle	1.210	34
Arzneipflanzen	30	1
Sonstige	734	21
davon: Naturkautschuk	270	8
Glycerin	170	5
Kork	32	1
Wachse, Harze, Gerbstoffe	113	3
andere biogene Reststoffe	149	4

Quelle: FNR 2014a

Tabelle II.4 gibt eine Übersicht, welche Agrarrohstoffe in welchen Mengen im Jahr 2011 in Deutschland stofflich für Nichtnahrungs- und Futtermittelzwecke genutzt wurden. Dabei kommt pflanzlichen Ölen mit 34% der eingesetzten Agrarrohstoffmengen die größte Bedeutung zu, gefolgt von Kohlenhydraten in Form von Stärke (26%), Chemiezellstoff (11%) und Zuckern (3%). Trotz wachsender Bedeutung der industriellen Biotechnologie liegen die Mengen biobasierter Agrarrohstoffe, die stofflich genutzt werden, seit dem Jahr 2007 gleichbleibend in der Größenordnung von etwa 3,5 Mio. t (FNR 2014a). Die Nutzung dieser Agrarrohstoffe erfolgt ganz überwiegend in der chemischen Industrie. Der Anteil biogener Rohstoffe an allen von der chemischen Industrie genutzten Rohstoffen lag 2011 mit 2,7 Mio. t bei 12,6%. 87,4% der eingesetzten Rohstoffe (18,9 Mio. t) waren somit fossilen Ursprungs (FNR 2014a). Für die europäische

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

chemische Industrie wird der Anteil biobasierter Rohstoffe für das Jahr 2011 mit 9 % angegeben (8,6 Mio. t biobasierte Rohstoffe von insgesamt 90,3 Mio. t eingesetzter Rohstoffe) (CEFIC 2014).

Zwar haben pflanzliche Öle mit 34 % den größten Anteil an den stofflich genutzten Agrarrohstoffen. Für die industrielle Biotechnologie im hier verstandenen Sinn sind sie aber von untergeordneter Bedeutung, da sie entweder direkt in Zwischen- und Endprodukten eingesetzt werden oder chemisch umgesetzt werden. Biotechnische Verfahren kommen entsprechend nicht zum Einsatz. Hauptverwendungszwecke für pflanzliche Öle sind Wasch- und Körperpflegemittel sowie Tenside (26 %), Polymere und Polymerhilfsstoffe (22 %), Anstrichmittel und Farben (10 %), Schmierstoffe (2 %) sowie zahlreiche kleinvolumige sonstige Anwendungen (40 %) (FNR 2014a).

Die zurzeit wichtigsten Agrarrohstoffe für Verfahren der industriellen Biotechnologie sind Kohlenhydrate, meist in Form von Glucose, Saccharose und Stärke bzw. Stärkehydrolysaten. Damit stehen diese biotechnischen Verfahren in direkter Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelverwendung dieser Agrarrohstoffe. Vor diesem Hintergrund ist es ein Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung in der industriellen Biotechnologie, das Spektrum der stofflich nutzbaren Substrate über Zucker und Stärke hinaus zu erweitern, um zusätzliche Biomassepotenziale zu erschließen. Nachfolgend wird der aktuelle Stand für drei ausgewählte, wichtige Substrate dargestellt.

Ausgewählte Ansätze zur Erweiterung des industriell nutzbaren Biomasse- und Substratspektrums **1.4**

Erschließung bislang kaum genutzter Ressourcen: das Beispiel Lignocellulose **1.4.1**

Derzeit nutzen die im industriellen Maßstab betriebenen fermentativen Verfahren nahezu ausschließlich Glucose, Saccharose und Stärke bzw. Stärkehydrolysate als Kohlenstoff- und Energiequelle aus agrarischen Rohstoffen. Wesentliche Anteile der Biomasse, insbesondere die Kohlenhydrate Cellulose, Hemicellulose sowie Lignocellulose, werden hingegen nicht bzw. nur unzureichend stofflich genutzt, da sie aufgrund ihrer Molekülstruktur einer biokatalytischen Umsetzung sehr viel schwerer zugänglich sind als Stärke und Zucker. Für die Realisierung einer Bioökonomie ist es daher von zentraler Bedeutung, inwieweit es gelingt, auch lignocellulosehaltige Biomasse als Substrat für biotechnische Verfahren zu erschließen.



Definition und Charakterisierung der Lignocellulose

Mit dem Begriff Lignocellulose wird eine große Vielfalt von pflanzlichen Biomassen bezeichnet, die einen hohen Anteil an Cellulose, Hemicellulosen und Lignin aufweisen.

Lignocellulose bildet das Strukturgerüst der Zellwände verholzter Pflanzen und verleiht ihnen ihre Stabilität. Sie besteht aus den miteinander vernetzten Kohlenhydratpolymeren Cellulose (durchschnittlicher Anteil etwa 40 bis 50%; Polymer des Zuckers Glucose) und Hemicellulose (25 bis 30%; Polymer aus verschiedenen Zuckern mit fünf Kohlenstoffatomen [sogenannte Pentosen]), in die das aromatische Makromolekül Lignin eingelagert (20 bis 30%) und fest mit den Kohlenhydratpolymeren verbunden ist.

Als Hauptbestandteil pflanzlicher Biomasse ist Lignocellulose der häufigste biobasierte, nachwachsende Rohstoff auf der Erde. Sie kann aus einer Vielzahl unterschiedlicher Quellen gewonnen werden, so z.B. aus Bäumen, Gräsern, Kurzumtriebspflanzen und Reststoffen aus der Land- und Forstwirtschaft und der Holzindustrie (z.B. Stroh, Durchforstungsholz; Sägespäne).

Potenziale

Lignocellulose ist als Rohstoff für die Bioökonomie sehr attraktiv, weil man sich davon folgende komparativen Vorteile gegenüber der Nutzung zucker- und stärkehaltiger Agrarrohstoffe verspricht (Strategiekreis Bioökonomie 2013, S. 78 ff.; Jäger/Büchs 2012; Nusser et al. 2007):

- > Vorkommen in großen, bisher in erst geringem Umfang genutzten Mengen,
- > Bereitstellung von lignocellulosereicher Biomasse aus einer großen Vielfalt unterschiedlicher Quellen möglich,
- > Verringerung von Nutzungskonkurrenzen um Biomasse zwischen Nahrungs- und Futtermittelzwecken einerseits und energetischen und stofflichen Nutzungen andererseits,
- > Hoher Gehalt an Zuckern (Hexosen und Pentosen), die prinzipiell biotechnisch zu einer Vielzahl an Substanzen und Plattformchemikalien umsetzbar sind (Bozell/Petersen 2010; Fernando et al. 2006; Grimm et al. 2011; Patel et al. 2006; Werpy/Petersen 2004),
- > Potenzial zur höherwertigen stofflichen Nutzung der Ligninkomponente statt der üblichen energetischen Nutzung (Bozell et al. 2007),
- > Potenzial zur vollständigen Verwertung ganzer Pflanzen als Substrat für Fermentationen, dadurch Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Verfahren und Verringerung des Anfalls von Biomassereststoffen,
- > Potenzial, auch marginale landwirtschaftliche sowie forstwirtschaftliche Flächen für den gezielten Anbau lignocelluloseliefernder Pflanzen zu nut-

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

zen, damit Verringerung der Flächenkonkurrenz mit anderen land- und forstwirtschaftlichen Nutzungen,

- › Potenzial, durch den Anbau mehrjähriger Pflanzen – im Vergleich zu konventionell bewirtschafteten landwirtschaftlichen Flächen – eine Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit durch Anreicherung von Kohlenstoff und Humus im Boden zu erreichen, den Einsatz von Agrochemikalien zu verringern und die Biodiversität zu erhöhen.

Herausforderungen für die Nutzung von Lignocellulose als Substrat für biotechnische Produktionsverfahren

Lignocellulose hat sich im Laufe der Evolution als dauerhaft beständige Pflanzengerüstsubstanz herausgebildet und kann nur durch wenige hoch spezialisierte Lebewesen abgebaut und als Kohlenstoff- und Energiequelle genutzt werden. Für industrielle biotechnische Prozesse sind die erzielbaren Lignocelluloseabbauraten aber zu gering, und die hierzu befähigten Organismen als industrielle Produktionsorganismen wenig geeignet. Um Lignocellulose als Rohstoff für die Produktion biobasierter Produkte wie z.B. Plattformchemikalien nutzen zu können, muss sie in eine bioverfügbare, für Fermentationen geeignete Form umgewandelt werden. Hierfür kommen prinzipiell zwei Ansätze in Betracht.

Nichtselektive Konversion: Bei der nichtselektiven Konversion wird Lignocellulose durch Vergasung vollständig in C₁-Bausteine wie Kohlenmonoxid und Methan zerlegt. Aus diesen Bausteinen werden anschließend die gewünschten Plattformchemikalien (chemisch durch Fischer-Tropsch-Synthese) synthetisiert. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass verschiedene Biomassen (z.B. öl-, stärke-, lignocellulosehaltige Biomasse) mit demselben Verfahren verarbeitet werden können. Nachteilig ist, dass die Reaktionen bei hohen Temperaturen ablaufen und die Zufuhr externer Energie erforderlich ist und dass die in der Biomasse »gespeicherte« Syntheseleistung der Natur stofflich nicht genutzt wird.

Selektive Konversion: Bei der selektiven Konversion wird das Polymer Lignocellulose in seine monomeren Bestandteile zerlegt, aber nicht noch weiter abgebaut. Dies erfordert selektive Katalysatoren, die an die jeweilige Biomassezusammensetzung spezifisch angepasst sein müssen. Dabei kann es sich um chemische Katalysatoren, Enzyme, Mikroorganismen und Kombinationen davon handeln. Verfahrenstechnisch muss die Struktur der Lignocellulose zunächst in einem Vorbehandlungsschritt aufgebrochen werden, um ihre Bestandteile für den nachfolgenden Zerlegungsschritt (Hydrolyse) zugänglich zu machen. Durch die Hydrolyse wird ein fermentierbares Substrat erhalten.

Im Folgenden wird auf die Verfahrensschritte der Vorbehandlung und der Hydrolyse bei der selektiven Konversion näher eingegangen, da hierbei – im Gegensatz zur nichtselektiven Konversion – biotechnische Verfahren eine Rolle



spielen. An geeignete Vorbehandlungs- und Hydrolyseverfahren für lignocellulosehaltige Biomasse werden folgende Anforderungen gestellt (Jäger/Büchs 2012):

- > möglichst geringer Abbau bzw. möglichst vollständiges Verfügbarmachen der Kohlenhydrate, die in der Biomasse enthalten sind.
- > möglichst geringe Bildung von Nebenprodukten, die die nachfolgende Hydrolyse bzw. Fermentation hemmen. Bei diesen Hemmstoffen handelt es sich um Furanderivate (Furfural, 5-Hydroxymethylfurfural), schwache organische Säuren (Ameisen-, Essig- und Lävulinsäure) sowie phenolische Verbindungen. Der Selektion und Konstruktion von Produktionsstämmen mit hoher Toleranz gegenüber diesen Hemmstoffen kommt große Bedeutung zu (Ling et al. 2014).
- > möglichst geringe Kapital- und Betriebskosten.
- > Anwendbarkeit auf verschiedene Biomassen aus unterschiedlichen Quellen.

Zum Einsatz kommen physikalische (z.B. Mahlen, Zerreiben), physikochemische (z.B. Dampfexplosionsverfahren), chemische (Hydrolyse mit Säuren oder Laugen, organische Lösungsmittel, ionische Flüssigkeiten), biotechnische und elektrische Verfahren sowie Kombinationen. Die bislang entwickelten Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen erfüllen jedoch noch nicht alle der zuvor genannten Anforderungen. Gleichwohl wurden 2014 in den USA die ersten acht kommerziellen Großanlagen in Betrieb genommen, in denen Ethanol aus lignocellulosehaltigen Substraten produziert wird (Kap. III.1.2).

Weit fortgeschritten, aber weiterhin optimierungsbedürftig sind FuE-Arbeiten zur Integration der einzelnen Verfahrensschritte in einen Gesamtprozess und dessen Optimierung. Elemente dieser Integration sind die Zusammenführung von Lignocelluloseaufschluss und -hydrolyse, Produktion hydrolysierender Enzyme sowie fermentative Produktion des Zielprodukts in derselben Prozessstufe, die Optimierung des Produktionsorganismus im Hinblick auf Toleranz gegenüber Hemmstoffen aus der Lignocellulose sowie auf möglichst vollständigen Umsetzung der Lignocellulosebestandteile zum Zielprodukt (Jäger/Büchs 2012).

Nutzung von Kuppel- und Nebenprodukten: das Beispiel Glycerin 1.4.2

Glycerin ist ein natürlicher Bestandteil von Fetten und Ölen. Stammte Glycerin früher vor allem aus der Verarbeitung von Fetten und Ölen zu Seife, fällt es aktuell vor allem als Kuppelprodukt bei der Biodieselherstellung sowie als Nebenprodukt bei der Bioethanolherstellung an. In den letzten Jahren ist durch die Ausweitung der Biodiesel- und Bioethanolherstellung auch die Glycerinproduktion stark angestiegen.

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

Im Jahr 2013 belief sich die Biodieselproduktion in Deutschland auf 2,6 Mio. t, die Bioethanolproduktion auf 672.000 t (FNR 2014b). Da Glycerin etwa im Umfang von 10% der Biodieselproduktion als Kuppelprodukt entsteht und der Destillationsrückstand der Bioethanolproduktion etwa 2% Glycerin enthält (Clomburg/Gonzalez 2013), dürfte die allein aus der Biokraftstoffproduktion stammende Glycerinmenge in der Größenordnung von 300.000 t liegen. Zwar sind mehr als 2.000 Anwendungen für Glycerin bekannt, wobei die wichtigsten Anwendungsbereiche Lebensmittel (25% des Weltglycerinverbrauchs), Kosmetika (20%), Kunststoffe (14%), Pharmazeutika (13%) und Tabak (8%) sind (Bauer/Hulteberg 2013). Dennoch besteht durch den Anstieg der Biokraftstoffproduktion und den damit verbundenen Anstieg des Glycerinanfalls der Bedarf, neue Anwendungen mit möglichst hoher Wertschöpfung für Glycerin zu finden, um das Kuppel- bzw. Nebenprodukt Glycerin einer Verwertung zuzuführen und dadurch die Wirtschaftlichkeit der Biodiesel- und Bioethanolproduktion zu steigern. In Deutschland wurden im Jahr 2011 170.000 t Glycerin stofflich verwertet (FNR 2014a).

Glycerin ist als Kohlenstoff- und Energiequelle in fermentativen Verfahren geeignet. Einige industriell eingesetzte Produktionsorganismen sind auch zur Verstoffwechslung von Glycerin in der Lage. Mehrere industriell relevante Produkte, wie 1,2- und 1,3-Propandiol, Bernsteinsäure, Propionsäure, Ethanol und n-Butanol können mit hohen Ausbeuten und Endkonzentrationen fermentativ aus Glycerin hergestellt werden (Bauer/Hulteberg 2013; Clomburg/Gonzalez 2013). Allerdings ist es bislang noch nicht gelungen, diese Verfahren unter Verwendung von Rohglycerin, das ohne größere Aufreinigung direkt aus der Biodiesel- bzw. Bioethanolproduktion als Fermentationssubstrat verwendet wird, im industriellen Maßstab zu implementieren (Dobson et al. 2012).

Biotechnologische Nutzung von Kohlendioxid

1.4.3

Um die Klimagaskonzentrationen in der Atmosphäre stabil zu halten, müssen Maßnahmen ergriffen werden, die die Klimagasemissionen reduzieren bzw. die Energieeffizienz steigern. Zu diesen Aktivitäten gehören solche, die weniger kohlenstoffintensive Kraftstoffe sowie erneuerbare Energien nutzen, biologische Senken für Kohlendioxid (CO₂) fördern oder der Atmosphäre Klimagase entziehen (»carbon capture and storage«) (de Coninck/Benson 2014). Zu der letztgenannten Option kann auch die stoffliche Nutzung von CO₂ als Synthesebaustein einen Beitrag leisten, der jedoch vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2005) als vergleichsweise gering eingeschätzt wird. Die Nutzung von CO₂ als C₁-Synthesebaustein in der chemischen Industrie birgt das Potenzial,

1. Rohstoffbasis



- › CO₂ als Kohlenstoffquelle zu nutzen und damit zur Schonung anderer kohlenstoffhaltiger Rohstoffquellen (z. B. fossile Rohstoffe) beizutragen,
- › durch die Herstellung werthaltiger Produkte Wertschöpfung zu erzielen (im Gegensatz zu reinen Speicherstrategien als CO₂-Reduktionsmaßnahme),
- › einen Beitrag zur Minderung von CO₂-Emissionen in die Atmosphäre zu leisten (VCI/Dechema 2009).

Für stoffliche Synthesen nutzbares CO₂ kann aus der Abluft diverser technischer Prozesse (z. B. Wasserstoffsynthese, Oxidationsprozesse) mit einem hohen Reinheitsgrad, direkt aus Abgasen von Kraftwerken oder aus der Atmosphäre gewonnen werden.

Zahlreiche autotrophe Organismen (Pflanzen, Algen, bestimmte Mikroorganismen) können CO₂ als Kohlenstoffquelle nutzen und es – meist unter Nutzung des Sonnenlichts als Energiequelle – in organische Verbindungen und dadurch in Biomasse überführen. Dieser Prozess der biologischen CO₂-Fixierung in Biomasse ist so leistungsfähig, dass er die Gaszusammensetzung der Erdatmosphäre beeinflusst: Von der in der Erdatmosphäre vorhandenen CO₂-Menge (830 Mrd. t Kohlenstoff) werden jährlich etwa 15 %, nämlich 123 Mrd. t Kohlenstoff, durch biologische CO₂-Fixierung (reversibel) in Biomasse überführt (Ciais et al. 2013). Zugleich sind Kohlenstoffverbindungen die Grundlage der organischen Chemie und ihrer technischen Anwendungen. Daher stellt sich die Frage, inwieweit der Prozess der biologischen CO₂-Fixierung für die stoffliche CO₂-Nutzung und die Minderung von CO₂-Emissionen in die Atmosphäre technisch genutzt werden können. Verschiedene biotechnische Ansätze könnten zur stofflichen Nutzung von CO₂ beitragen. Hierzu zählen:

Produktion von Algenbiomasse durch Mikroalgen, die sowohl stofflich als auch energetisch genutzt werden kann (Ho et al. 2011; Rosello Sastre/Posten 2010; Rossi et al. 2015; Kap. II.2.2). In den letzten Jahren wurden mehrere FuE-Projekte initiiert und Pilotanlagen errichtet (Tab. II.5), in denen CO₂-reiche Abluft aus verschiedenen Kraftwerkstypen unter Nutzung der Sonnenenergie biotechnisch in Mikroalgenbiomasse umgewandelt wird. Die anfallende Biomasse soll dann einer höherwertigen Nutzung zugeführt werden. Hierfür müssen sowohl die CO₂-fixierenden Mikroorganismen bzw. Mikroalgen als auch die technischen Anlagen zu ihrer Kultivierung deutlich weiterentwickelt, in den industriellen Maßstab hochskaliert und in Bioraffinerie- bzw. Kraftwerksanlagenkonzepte eingebunden werden (Kaltwasser/Gabrielczyk 2011; Schurr 2011; Kap. II.2.2 u. II.4). Dabei besteht Forschungsbedarf vor allem in folgenden Bereichen:

- › Optimierung der Produktionsorganismen, sodass sie unter den speziellen Rauchgasbedingungen dauerhaft wachsen und die Zielprodukte (z. B. Biomasse, Bioenergieträger, Biopolymere) hocheffizient synthetisieren;

^
> II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

- > Optimierung der Photobioreaktoren, insbesondere die Verringerung des Energieverbrauchs und die Verbesserung des Lichteintrags;
- > Optimierung der Prozessführung und -steuerung, darin vor allem Optimierung der Lichtnutzung, Recycling der notwendigen Nährstoffe sowie die Aufarbeitung der produzierten Biomasse und der Zielprodukte.
Erste Analysen zur Wirtschaftlichkeit und zur Klimagasrelevanz der algenbasierten Umsetzung von CO₂ aus Kraftwerksabgasen zu Biokraftstoffen deuten darauf hin, dass der Kohlenstofffußabdruck dieser Verfahren günstiger ausfällt als der des Status quo (keine CO₂-Abscheidung und -Nutzung) und auch der Kohlenstoffabscheidung und -lagerung. Produktionskosten werden als günstig im Vergleich zu Ethanol aus Mais abgeschätzt (Lively et al. 2015). Diese ersten orientierenden Abschätzungen müssen noch durch weitere Untersuchungen abgesichert werden.

Direkte Gewinnung von Methan: In einem Forschungsprojekt wird ausgelotet, inwieweit sich eine Kokultur von photosynthetischen Mikroalgen und methanbildenden Bakterien dazu eignet, Biogas herzustellen. Dabei erzeugen die Algen aus Kohlendioxid und Sonnenlicht ein Zwischenprodukt, das anschließend von Bakterien zu Methan umgesetzt wird, ohne dass große Mengen an Biomasse anfallen (Kaltwasser/Gabrielczyk 2011). Es liegen keine Informationen dazu vor, inwieweit dieser Ansatz auch klimapolitischen Zielsetzungen gerecht werden kann, da die Klimawirksamkeit des Treibhausgases Methan etwa das 25-Fache von CO₂ beträgt.

Enzymatische CO₂-Abscheidung in Abgaswaschprozessen: Konzepte zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung sehen vor, bei industriellen Punktquellen, die große CO₂-Mengen emittieren, CO₂ aus den Abgasen abzuscheiden, um sie anschließend zu speichern oder stofflich zu verwerten. Solche Punktquellen sind beispielsweise Kraftwerke, Zementfabriken, Raffinerien und Eisen- und Stahlwerke. Hierzu kann dem eigentlichen Produktionsprozess eine CO₂-Wäsche des Abgases nachgeschaltet werden, in der das CO₂ reversibel an eine Trägersubstanz gebunden und so aus dem Abgasstrom entfernt wird (IPCC 2005). Wegen des hohen Energieaufwands der Verfahren sowie der noch zu geringen CO₂-Abscheidung wird untersucht, inwieweit die Leistungsfähigkeit der Verfahren durch den Einsatz von Enzymen erhöht werden könnte. Hierfür wird die Carboanhydrase favorisiert, ein ubiquitär vorkommendes Enzym, das die Hydratisierung von CO₂ zu Kohlensäure (Hydrogencarbonat) katalysiert und zu den am schnellsten arbeitenden Enzymen überhaupt gehört. Die prinzipielle Eignung der Carboanhydrase für diesen Zweck konnte nachgewiesen werden. Zudem wurden verschiedene Optimierungen durchgeführt, um die Toleranz der eingesetzten Enzyme gegenüber den harschen Prozessbedingungen der CO₂-Wäsche von Rauchgasen (hohe Temperaturen von 50 bis 125 °C, extreme pH-Werte, hohe Konzentrationen an organischen Aminen, Schwefel- und Stickoxi-



den sowie Schwermetallen) zu erhöhen. Allerdings besteht noch weiterer Optimierungsbedarf, um Enzyme bereitzustellen, die eine ausreichende Stabilität und Aktivität unter diesen Bedingungen aufweisen (Savile/Lalonde 2011). Zusammenfassend ist zu sagen, dass sich die biotechnologische Nutzung von CO₂ derzeit noch in einem sehr frühen Stadium befindet. Die in Tabelle II.5 aufgeführten Anlagen zur Fixierung von CO₂ aus Abgasen durch Mikroalgen sind Pilotanlagen. Sie dienen primär dem Zweck, erstmals verlässliche Daten zu generieren, auf deren Basis sich das Potenzial überhaupt abschätzen lässt.

Tab. II.5 Mikroalgenphotobioreaktoren zur Abtrennung von CO₂ aus Kraftwerksabluft

Standort	Abgasquelle	Betreiber	Inbetriebnahme	Kapazität
Eutingen	biogasbetriebenes Blockheizkraftwerk	EnBW, Subitec GmbH	2008	4.300 l
Niederaußem	Braunkohlekraftwerk	RWE, Phytolutions	2008	55.000 l
Senftenberg	Braunkohleheizkraftwerk	Vattenfall, GMB, Subitec GmbH	2010	2.160 l
Hamburg	erdgasbetriebenes Blockheizkraftwerk	E.on, Subitec GmbH	2008	1.440 l
Reutlingen	erdgasbetriebenes Blockheizkraftwerk	FairEnergie GmbH, Subitec GmbH	2010	4.320 l

Eigene Zusammenstellung nach E.ON Hanse AG o.J.; EnBW Energie Baden-Württemberg AG 2008; FONA/BMBF 2008; RWE 2008; www.subitec.com; Vattenfall Europe AG 2010

Produktionsplattformen 2.

Industrielle biotechnologische Verfahren nutzen für die Stoffumwandlung entweder die Stoffwechselleistungen ganzer Zellen, in der Regel von Mikroorganismen, in sogenannten Fermentationen, oder die Stoffumwandlung erfolgt im zellfreien System durch Enzyme, die zuvor meist in Mikroorganismen produziert und aus ihnen für die nachfolgende Stoffumwandlung isoliert wurden. Durch Forschungsarbeiten im Rahmen der Synthetischen Biologie zeichnet sich perspektivisch ab, dass diese konzeptionell unterschiedlichen Verfahrensansätze zunehmend konvergieren könnten (Kap. II.3). Im Folgenden werden die prinzipiellen Vor- und Nachteile organismenbasierter und zellfreier Produktionsplattformen dargestellt.

Vor- und Nachteile organismenbasierter und zellfreier Produktionsplattformen

2.1

Organismenbasierte Produktionsplattformen

Organismenbasierte Produktionsplattformen werden vor allem für solche Prozesse eingesetzt, in denen eine Vielzahl von aufeinanderfolgenden Reaktionen koordiniert ablaufen muss, um die gewünschte Stoffumsetzung zu erzielen. Hierfür macht man sich die jeweiligen natürlichen Stoffwechselwege der hierzu befähigten Mikroorganismen zunutze. Auch »einfache« Reaktionen werden mit ganzen Organismen durchgeführt, wenn diese Reaktionen von kofaktor- oder energieabhängigen Enzymen katalysiert werden, da hierfür eine Regeneration dieser Kofaktoren oder des Energieäquivalents ATP erforderlich wird. Diese Regeneration erfolgt beim derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik am besten mit ganzen Zellen (Kap. II.3.3). Da die Organismen zu Wachstum und Vermehrung befähigt sind, regenerieren sie sich immer wieder, sodass entsprechende Produktionsprozesse in der Regel über lange Zeiträume aufrechterhalten werden können.

Organismenbasierte Produktionsplattformen weisen jedoch als grundsätzliche Nachteile auf, dass in den Stoffwechsel im Zellinneren nur sehr begrenzt steuernd eingegriffen werden kann und dass parallel zum industriell genutzten Stoffwechselweg stets auch andere Stoffwechselwege des Organismus aktiv sind. Deshalb wird immer ein Teil der zugeführten Substrate in Zellmasse und in andere Substanzen als das jeweilige Zielprodukt des Produktionsprozesses überführt. Hierdurch werden die Ausbeute und Effizienz des Produktionsverfahrens verringert, es werden Aufreinigungsschritte erforderlich, um das gewünschte Produkt aus dem Produktgemisch abzutrennen, und es müssen Zellmasse und Nebenprodukte entsorgt oder einer Wertstoffgewinnung zugeführt werden.

Zur Verringerung dieser inhärenten Nachteile werden die jeweiligen Produktionsorganismen optimiert bzw. verfahrenstechnische Lösungen gewählt (Kap. II.3). Perspektivisch wird angestrebt, für industrielle Produktionsverfahren sogenannte »Minimalorganismen« zu konstruieren, bei denen die Zellfunktionen auf diejenigen Funktionen reduziert sind, die für die Herstellung des gewünschten Produkts unerlässlich sind.

Zellfreie Produktionsplattformen

Zellfreie Produktionsplattformen in der industriellen Biotechnologie beschränken sich zurzeit vor allem auf Prozesse, in denen durch isolierte Enzyme vergleichsweise einfache Stoffumsetzungen (z. B. der hydrolytische Abbau von Polymeren wie z. B. Stärke zum Monomer Glucose) katalysiert werden. Zellfreie



Verfahren zeichnen sich – im Vergleich zu zellbasierten Verfahren der industriellen Biotechnologie – dadurch aus, dass

- > durch die Loslösung von lebenden Zellen auch Limitierungen überwunden werden, die durch den zellulären Kontext gegeben sind. Hierzu zählen beispielsweise die Umsetzung von Substanzen, die Zellen nicht ins Innere aufnehmen können, oder die Herstellung von Produkten, die toxisch auf den Zellstoffwechsel wirken und deswegen in zellbasierten Systemen nicht hergestellt werden können (Casteleijn et al. 2013),
- > durch die Entkopplung vom zellulären Stoffwechsel eine deutlich größere Flexibilität bei der Auslegung des zellfreien Systems auf eine spezifische Anwendung hin besteht und auch nichtnatürliche Substrate eingesetzt bzw. Produkte hergestellt werden können (Hodgman/Jewett 2012; Hoesl/Budisa 2011),
- > durch die Beschränkung auf den produktionstechnisch gewünschten Syntheseweg eine hohe Ressourceneffizienz zu erwarten ist (zumindest für die eigentliche Produktsynthese; in der theoretischen Betrachtung wird der Ressourcenaufwand für Upstreamprozesse, z. B. zur Herstellung von Enzymen, meist nicht berücksichtigt),
- > durch die Herauslösung aus dem zellulären Kontext ein unmittelbarer Zugriff auf diesen Prozess möglich wird, z. B. im Hinblick auf Beobachtbarkeit, Beeinflussbarkeit, Zugabe weiterer Komponenten etc. (Bujara/Panke 2012),
- > durch die weniger komplexe Zusammensetzung des Reaktionsansatzes die Aufreinigung und Gewinnung des Produkts aus dem Reaktionsansatz in der Regel technisch vergleichsweise einfach ist.

Zellfreien Verfahren muss allerdings stets ein organismenbasierter Verfahrensschritt zur Produktion der relevanten Enzyme sowie deren Isolierung vorgeschaltet werden. Da die isolierten Enzyme nicht zur Vermehrung befähigt sind, ist die nutzbare Produktionsdauer zellfreier Verfahren dadurch begrenzt, wie lange die eingesetzten Enzyme aktiv bleiben.

Organismenbasierte Produktionsplattformen

2.2

Mikroorganismen, die in industriellen Produktionsprozessen eingesetzt werden, sind ursprünglich aus der Natur aufgrund ihrer spezifischen Stoffwechseleigenschaften isoliert und sukzessive in ihren Eigenschaften auf die besonderen Anforderungen der industriellen Produktionsprozesse hin optimiert worden. Diese Eigenschaften umfassen (Waegeman/Soetaert 2011):

- > Bekannte, stabile Eigenschaften des Produktionsorganismus, die auch über viele Zellteilungen hinweg unverändert bleiben;

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

- › sehr gute Kultivierbarkeit auf kostengünstigen Kohlenstoff- und Energiequellen in hoher Organismenkonzentration (sogenannte Zelldichte);
- › Robustheit gegenüber harschen oder wechselnden Kulturbedingungen;
- › Produktion möglichst großer Mengen und möglichst hoher Konzentrationen des gewünschten Produkts in möglichst kurzer Zeit;
- › einfache Gewinnbarkeit des gewünschten Produkts, z.B. indem es in das Kulturmedium ausgeschieden oder in hohen Konzentrationen im Produktionsorganismus angereichert wird.

Zwar werden Produktionsorganismen der industriellen Biotechnologie in der Regel in geschlossenen Anlagen kultiviert. Dennoch ist aus Gründen des Gesundheits-, Arbeits- und Umweltschutzes die Anforderung zu stellen, dass der Organismus für Mensch, Tier und Umwelt ungefährlich sein muss und keine Giftstoffe bilden darf. Seine Überlebens- und Vermehrungsfähigkeit außerhalb der Produktionsanlagen sollte möglichst gering sein. Besondere Anforderungen sind zu stellen, wenn der Produktionsorganismus oder die mit ihm hergestellten Produkte verzehrt werden sollen. Hierfür dürfen nur Organismen eingesetzt werden, die als sicher gelten und denen der GRAS-Status (»generally recognized as safe«) zuerkannt worden ist.

Zudem sollte ein breites Spektrum an Mutanten sowie ein umfassendes Instrumentarium für seine gentechnische Veränderung und für die Erhebung und Auswertung von -omics-Daten für systembiologische Untersuchungen zur Verfügung stehen, um den Produktionsorganismus gezielt optimieren zu können (Kap. II.3).

In der industriellen Biotechnologie werden wenige Dutzend Mikroorganismenarten (Bakterien, Hefen, Pilze) als Produktionsorganismen routinemäßig eingesetzt, da sie die zuvor genannten Voraussetzungen weitgehend erfüllen. Beispielsweise werden für die Produktion kleiner Moleküle des Primärstoffwechsels (z. B. Ethanol und andere Alkohole, organische Säuren, Aminosäuren) häufig Bakterien (z. B. *Escherichia coli*, *Corynebacterium glutamicum*, Clostridien, Milchsäurebakterien) und Hefen eingesetzt. Die Produktion von industriellen Enzymen erfolgt überwiegend in Bakterien der Gattung *Bacillus* sowie in Pilzen (z. B. *Aspergillus*, *Penicillium*). Zwar werden nach wie vor Organismen mit neuartigen Stoffwechselleistungen in Screeningprozessen aus der Natur isoliert (Kap. II.3.1). In der Regel werden sie jedoch nicht (mehr) zu Produktionsorganismen weiterentwickelt. Vielmehr wird der Ansatz verfolgt, die relevante Stoffwechselleistung in bereits lange als Produktionsorganismen etablierte Arten zu übertragen (Kap. II.3.2). Dies führt meist schneller und effizienter zu einem industriell einsetzbaren Stamm, als wenn der neu isolierte Organismus »domestiziert« würde. Konzeptionell wird das Ziel angestrebt, ein »Basis-Chassis« eines Organismus zu entwickeln, das je nach konkreten Prozess- bzw. Produkthanforderungen mit den jeweils erforderlichen Stoffwechselleistungen



»ausgerüstet« wird. In Analogie zur Computertechnik wurde hierfür der Begriff des bereits optimierten Plug-and-play-Produktionsorganismus« geprägt (Frasch et al. 2013; Leprince et al. 2012; Nielsen/Keasling 2011).

Mikroalgen als neuartige Produktionsplattform

Bei den in der industriellen Biotechnologie etablierten Produktionsorganismen handelt es sich ganz überwiegend um sogenannte »chemoorganoheterotrophe« Organismen, die als Kohlenstoff- und Energiequelle organische Kohlenstoffverbindungen (z. B. Zucker aus Biomasse) benötigen. Zur Verringerung der Tank-Trog-Teller-Problematik wäre es grundsätzlich wünschenswert, industrielle Biotechnologie mit photoautotrophen Produktionsorganismen betreiben zu können, die das Sonnenlicht als Energiequelle und CO₂ als Kohlenstoffquelle nutzen können. Vor diesen Hintergrund gibt es seit einigen Jahren Bestrebungen, Mikroalgen als neuartige Produktionsplattform zu etablieren (Dillon et al. 2009; Enzing et al. 2014; Mascarelli 2009; Strategiekreis Bioökonomie 2013). Das Potenzial, das Mikroalgen zugemessen wird, spiegelt sich auch in den strategischen Akquisitionen großer Unternehmen mit Aktivitäten in der industriellen Biotechnologie wider, darunter BASF, Unilever, DSM, Dow Chemical und Roquette, die in den letzten Jahren kleine Mikroalgenfirmen und -produktionsanlagen gekauft haben.

Unter Mikroalgen versteht man ein- bis wenigzellige Algen sowie Cyanobakterien (umgangssprachlich Blaualgen). Im Hinblick auf ihre Nutzung als potenzielle Produktionsorganismen für die industrielle Biotechnologie weisen sie – auch gegenüber den ebenfalls photoautotrophen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen – folgende vorteilhafte Charakteristika auf (Gong et al. 2011; Rosello Sastre/Posten 2010; Strategiekreis Bioökonomie 2013):

- > großes, bislang kaum ausgeschöpftes Potenzial für industrielle Zwecke aufgrund der großen – weitgehend noch unerforschten und unerschlossenen – Artenvielfalt;
- > höhere flächenbezogene Produktivität als landwirtschaftliche Nutzpflanzen aufgrund eines günstigen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses, der besseren Verfügbarkeit und des reduzierten Einsatzes von Wasser, CO₂ und Nährstoffen sowie des besseren Stoffaustausches im aquatischen System. Die Produktivität von Mikroalgen in geschlossenen Systemen beträgt 60 bis 100 t Trockenmasse/ha und Jahr, von Landnutzpflanzen 8 bis 30 t Trockenmasse/ha und Jahr (TAB 2012). Schätzungen zufolge könnte sich die CO₂-Fixierungskapazität auf mehr als 150 t CO₂/ha und Jahr belaufen, sofern die Organismen in technischen Systemen kultiviert werden können, die optimale Bedingungen gewährleisten (Schurr 2011).

^
‣ II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

- Je nach eingesetzter Mikroalgenart erfolgen Wachstum und Produktbildung phototroph (unter Nutzung von Lichtenergie) oder heterotroph (durch Nutzung von chemischer Energie, z.B. Zucker im Kulturmedium); einige Arten können beides (mixotroph).
- schnelle Vermehrung, hohe Wachstumsraten möglich;
- Nutzung von Süß-, Salz- oder Brackwasser möglich (je nach eingesetzter Algenart);
- breites Spektrum von Kultivierungssystemen in Gebäuden oder im Freiland möglich, von flachen, offenen, durchströmten Teichen bis zu geschlossenen Photobioreaktoren;
- bei Kultivierung in geschlossenen Systemen mit Wasserrückführung geringerer Wasserbedarf als bei Landpflanzen;
- Potenzial zur Herstellung eines breiten Spektrums möglicher industrieller Produkte (Lebensmittel, Futtermittel, Fein- und Spezialchemikalien, Biokraftstoffe, Bulkchemikalien);
- Potenzial zur Verbindung der industriellen Biotechnologie, der Ernährungs- und Futtermittelindustrie, der Landwirtschaft, der Abfall- und Abwasserwirtschaft, der Energiewirtschaft miteinander.

Verglichen mit industriellen biotechnischen Verfahren mit Bakterien, Hefen und Pilzen steckt die Algenbiotechnologie noch in den Kinderschuhen. Großer und grundlegender FuE-Bedarf besteht noch in Ansätzen zur Produktionsstammverbesserung (Selektion geeigneter Algenstämme, Optimierung der Stämme, Etablierung von Methoden und Werkzeugen zur gentechnischen Veränderung, verbessertes Verständnis von Stoffwechselwegen und -regulation) (Gong et al. 2011; Larkum et al. 2012) sowie in der Verfahrenstechnik, wo insbesondere das Photobioreaktordesign, das »Scale-up« in den industriellen Produktionsmaßstab sowie die Senkung der Produktionskosten vorrangige Ziele sind (Enzing et al. 2014).

Beim derzeitigen Stand der Algenbiotechnik beschränkt sich die industrielle Produktion mit Mikroalgen noch auf die Herstellung von hochpreisigen Nahrungsergänzungsmitteln (vor allem getrocknete Algenbiomasse der Gattungen *Spirulina* und *Chlorella*) und funktionellen Nahrungsinhaltsstoffen (Carotinoide, Astaxanthin, Phycocyaninfarbstoffe, Omega-3-Fettsäuren), auf isotonenmarkierte Biochemikalien für Forschungszwecke sowie Hautkosmetika. Weitere Anwendungen liegen in der Produktion von Algenbiomasse als Fischfutter und Düngemittel (Enzing et al. 2014; Rosello Sastre/Posten 2010). Die weltweite industrielle Produktion von Mikroalgen wird auf 9.000 t (Trockenmasse) im Jahr 2011 geschätzt, davon werden mehr als 75% als Nahrungsergänzungsmittel vermarktet (Enzing et al. 2014). Einschränkend ist außerdem anzumerken, dass ein Großteil dieser Mikroalgenprodukte aus heterotroph kultivierter Algenbiomasse



gewonnen wird und damit der prinzipielle Vorteil des photoautotrophen Wachstums dieser Produktionsplattform bislang noch gar nicht ausgeschöpft wird.

Es ist Gegenstand der aktuellen Forschung, auch andere Produktgruppen mithilfe von Mikroalgen herzustellen und perspektivisch alle erforderlichen Verfahren für eine Algenbioraffinerie (Kap. II.4) zu entwickeln. Es wird an der mikroalgenbasierten Produktion von Biokraftstoffen, Biokunststoffen, rekombinanten Proteinen und Pharmazeutika geforscht (Enzing et al. 2014; Frost & Sullivan 2011b; Guedes et al. 2011; Milledge 2011; Rosello Sastre/Posten 2010; Sanghvi/Lo 2010; Specht et al. 2010; Stengel et al. 2011).

Zellfreie Produktionsplattformen

2.3

Bei zellfreien Produktionsplattformen werden zurzeit zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt, die sich in ihrem Komplexitätsgrad unterscheiden, sich perspektivisch aber zunehmend einander annähern werden.

Synthetische enzymatische Stoffwechselwege: Bei diesem Bottom-up-Ansatz werden aus Organismen die für die gewünschte Stoffumwandlung erforderlichen Komponenten, in der Regel Enzyme, isoliert und in ein zellfreies Reaktionssystem eingebracht, in dem die gewünschte Stoffumsetzung dann abläuft. Solche zellfreien Produktionsplattformen sind im industriellen Maßstab gut etabliert, sofern es sich um Stoffumwandlungen unter Beteiligung eines Enzyms oder weniger Enzyme, meist Hydrolasen, handelt. Industrielle Anwendungen finden sich vor allem bei der Herstellung von (chiralen) Fein- und Spezialchemikalien, da hier häufig nichtnatürliche Substrate enzymatisch umgesetzt werden, die in zellbasierten Systemen möglicherweise gar nicht verstoffwechselt werden könnten.

Weiterentwicklungen des Ansatzes der synthetischen enzymatischen Stoffwechselwege zielen darauf ab, die Zahl der koordiniert zusammenwirkenden Enzyme und damit den Komplexitätsgrad der synthetischen Stoffwechselwege zu erhöhen und auf diese Weise das Produktspektrum zu erweitern. In der Grundlagenforschung wurde die prinzipielle Machbarkeit demonstriert, indem zwischen 8 und 28 verschiedene isolierte Enzyme aus verschiedenen Organismen erfolgreich zur Synthese bestimmter kleiner Moleküle eingesetzt wurden (Review bei Hodgman/Jewett 2012). Für eine Produktion im industriellen Maßstab kommen diese Weiterentwicklungen wegen des hohen Aufwands für die Aufreinigung einzelner stabiler Enzyme derzeit jedoch nicht in Betracht. Eine wichtige Rolle wird ihnen jedoch bei der Optimierung von zellulären Produktionsplattformen hinsichtlich ihrer Stoffwechselwege zugemessen: Im zellfreien System können Hypothesen, wie ein Stoffwechselweg optimiert werden könnte, vergleichsweise schnell experimentell überprüft werden.

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

Zellextraktbasierte zellfreie Systeme: Als Top-down-Ansatz innerhalb der zellfreien Systeme werden zellextraktbasierte Systeme genutzt. Hierbei werden durch geeignete Methoden die die Zellen umgebenden Zellmembranen aufgelöst und der »Zellinhalt«, das sogenannte Lysat, für die gewünschte Stoffumwandlung eingesetzt. Hierbei werden in der Regel Organismen für die Extrakterstellung verwendet, die bereits durch gentechnische Veränderung und Metabolic Engineering optimiert wurden (Kap. II.3.2), und zusätzlich werden weitere, oft nichtnatürliche Komponenten dem zellfreien System zugesetzt, die in zellbasierten Systemen nicht effektiv umgesetzt werden können.

Das am weitesten entwickelte Beispiel für die zellextraktbasierten zellfreien Systeme ist die zellfreie Proteinsynthese, mit der Proteine außerhalb lebender Organismen hergestellt werden können (Spirin/Swartz 2008). Verschiedene Proteinexpressionssysteme werden kommerziell angeboten. Sie kommen derzeit vor allem im FuE-Bereich für solche Proteine zum Einsatz, die nicht mit herkömmlichen zellbasierten Systemen hergestellt werden können. Dies sind beispielsweise Membranproteine, die in hoher Reinheit für die Aufklärung ihrer Struktur oder ihres Funktionsmechanismus in mg-Mengen bereitgestellt werden sollen, oder Proteine, bei denen an definierten Stellen nichtnatürliche Aminosäuren eingebaut sind. Zwar wurde erfolgreich demonstriert, dass eine zellfreie Proteinsynthese auch im industriellen 100-l-Maßstab für die Herstellung von biopharmazeutisch relevanten Proteinen machbar ist. Eine Kostenwettbewerbsfähigkeit mit der zellbasierten Herstellung von biopharmazeutischen Proteinen ist jedoch erst in Einzelfällen erreicht (Casteleijn et al. 2013; Zawada et al. 2011).

Methoden zur Optimierung biotechnischer Prozesse 3.

Screening nach neuen Mikroorganismen und Enzymen 3.1

Alle zurzeit industriell implementierten Produktionsprozesse der weißen Biotechnologie beruhen auf den Stoffwechsellleistungen von Mikroorganismen und Enzymen, die aus der Natur isoliert und im Hinblick auf die industrielle Produktion optimiert wurden. Allerdings ist nur ein Teil der enormen natürlich vorhandenen Biodiversität an Mikroorganismen und Enzymen überhaupt bekannt, und wiederum nur ein Bruchteil davon wird industriell genutzt (Tab. II.6).

Um das Spektrum der industriellen Bioprozesse und -produkte zu erweitern sowie bestehende Verfahren weiter zu optimieren, wird das Ziel verfolgt, aus dem Pool der natürlich vorkommenden Mikroorganismen und Enzyme diejenigen zu identifizieren und auszuwählen, die nützliche Eigenschaften für industrielle Anwendungen aufweisen.

Tab. II.6 Natürlich vorkommende Biodiversität an Mikroorganismen und Enzymen und ihre Nutzung in industriellen Prozessen

Biokatalysator	Vorkommen
natürlich vorkommende Mikroorganismenarten	mehrere Millionen
davon bekannt	einige 10.000 (> 1 %)
davon unter Laborbedingungen kultivierbar	ca. 5.000
davon in industriellen Prozessen genutzt	ca. 100
natürlich vorkommende Enzyme	mehr als 7.000
davon bekannt	ca. 6.550*
davon kommerzielle, industrielle Enzyme	ca. 250**

* Zahl der EC-Klassen in der Enzymdatenbank BRENDA, www.brenda-enzymes.org; Stand 2/2015. Die EC-Klassifikation der International Union for Biochemistry and Molecular Biology (IUBMB) dient der Systematisierung von Enzymen nach dem von ihnen katalysierten Reaktionstyp.

** nach Angaben in der Liste der kommerziellen Enzyme (Stand 4/2014), erstellt von der Association of Manufacturers and Formulators of Enzyme Products (AMFEP); www.amfep.org/

Quelle: Nusser et al. 2007, aktualisiert

In diesen Screeningprozessen werden üblicherweise groß angelegte Sammlungen von Mikroorganismen, Enzymen, Genen oder biokatalysatorhaltigen Umweltproben (z. B. Bodenproben, Darminhalte/Fäkalien, verrottende Biomasse) mit geeigneten Testverfahren durchgemustert und diejenigen Mikroorganismen, Enzyme, Gene oder Umweltproben für eine nähere Charakterisierung ausgewählt, die im jeweiligen Testverfahren ein positives Signal erzeugt haben. Da Screeningverfahren bei erwartungsgemäß geringer Trefferquote ressourcen- und zeitaufwendig sind, werden verschiedene Strategien – auch in Kombination – verfolgt, um Screeningverfahren einfacher, schneller, kostengünstiger und durch eine erhöhte Trefferquote effizienter zu machen. Hierzu zählen:

Automatisierung, Miniaturisierung: Eine Beschleunigung und Kostensenkung von Screeningverfahren wird durch Automatisierung und hochparallele Durchführung der Arbeitsschritte des Screenings und sowie durch Miniaturisierung der jeweiligen Ansätze in den Mikro- bis Nanolitermaßstab erreicht.

Erhöhung der Spezifität und Selektivität der Testverfahren für die jeweils gesuchte Biokatalysatoreigenschaft.

Erhöhung der Trefferwahrscheinlichkeit durch Screenen bislang kaum untersuchter Pools: Um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, im gescreenten Pool einen Biokatalysator mit den gewünschten Eigenschaften zu entdecken, werden bislang wenig untersuchte Mikroorganismengruppen bzw. Ökosysteme und Standorte untersucht. Hierzu gehören beispielsweise extremophile Mikroorga-

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

nismen (Elleuche et al. 2014), die in heißen Quellen, in Polargebieten, in Tiefseegräben, in konzentrierten Salzlösungen, an kontaminierten Standorten leben können, sowie Mikroorganismen aus tropischen Regenwäldern oder solche, die in Symbiose mit anderen Organismen leben. Erste Screeningverfahren waren stets auf die Kultivierung der zu screenenden Mikroorganismen im Labor angewiesen. Allerdings kann nur ein Bruchteil der natürlichen Mikroorganismenflora auf diese Weise vermehrt und damit auch gescreent werden. Durch sogenannte Metagenomansätze werden nunmehr auch nichtkultivierbare Organismen sowie Enzyme erfasst, die unter den Laborbedingungen von den zu screenenden Organismen nicht exprimiert werden (Sharon/Banfield 2013): Hierzu wird die gesamte Erbinformation der zu screenenden Probe in Form einer Genbibliothek kloniert und anschließend diese Genbibliothek durchgemustert (Piel 2011). Verfahren zum Screenen von Genen bzw. Proteinen in zellfreien Systemen ohne vorhergehenden Klonierungsschritt sind ebenfalls etabliert (Catherine et al. 2013; Kwon et al. 2014; Takasuka et al. 2014).

Erhöhung der Trefferwahrscheinlichkeit durch wissensbasierte Konstruktion kleiner Genbibliotheken: Werden Varianten eines bereits bekannten Enzyms gesucht, die im Hinblick auf den technischen Prozess verbesserte Eigenschaften aufweisen, können kleinere Genbibliotheken mit Genvarianten angelegt werden, in denen diejenigen Genregionen systematisch verändert wurden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu der jeweils gesuchten Biokatalysatoreigenschaft beitragen. Als Wissensbasis zur Konstruktion solcher fokussierter Bibliotheken sind Bioinformatikwerkzeuge unerlässlich. Auch zellfreie Systeme kommen aufgrund ihres Potenzials zur Zeit- und Ressourceneinsparung in Screeningprozessen zum Einsatz.

Beim Screening zum Auffinden von neuen bzw. verbesserten *Mikroorganismen* sind die folgenden Eigenschaften von besonderem Interesse (Nusser et al. 2007, S. 48):

- › Fähigkeit zur Nutzung eines breiteren Substratspektrums, z. B. Fähigkeit zur Nutzung kostengünstiger Kohlenstoff- und Energiequellen (z. B. Pentosen als wesentliche Bestandteile von Lignocellulosehydrolysaten, Rohglycerin);
- › Fähigkeit zur Synthese neuartiger Substanzen;
- › Fähigkeit zu hoher Produktivität bei gleichzeitig minimalem Wachstum, keine Hemmung der Stoffwechselleistung durch Endprodukte oder toxische Substanzen im Kulturmedium;
- › hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Stress durch die extremen Kulturbedingungen, die in Hochleistungsproduktionsprozessen herrschen (z. B. Temperatur, hohe Substrat- bzw. Produktkonzentrationen, hohe Hemmstoffkonzentrationen);
- › leichte Handhabbarkeit im Produktionsprozess (z. B. hohe Robustheit gegenüber Schwankungen in den Kulturbedingungen, leichte Abtrennbarkeit

3. Methoden zur Optimierung biotechnischer Prozesse



vom Kulturmedium, Durchsetzungsfähigkeit gegenüber kontaminierenden Organismen).

Beim Screenen nach neuen bzw. verbesserten *Enzymen* werden für industrielle Anwendungen in der Regel folgende Ziele verfolgt (Bornscheuer et al. 2012; Dechema e.V. 2011; McAuliffe 2012):

- > Erschließung von Enzymen, die andere als die – bisher überwiegend industriell genutzten – hydrolytischen Reaktionen katalysieren und die mit konventioneller Synthesechemie schwierig auszuführen sind, z.B. C-C-Verknüpfungen, Oxidations- und Reduktionsreaktionen, kofaktorabhängige Reaktionen;
- > erhöhte katalytische Aktivität bzw. verbesserte katalytische Eigenschaften (z.B. verringerte Endprodukthemmung, erhöhte Selektivität, erhöhte oder geringere Spezifität, verbreitertes Spektrum der enzymatisch umsetzbaren Substrate);
- > erhöhte katalytische Aktivität und Stabilität unter den Bedingungen des enzymkatalysierten Verfahrens (z.B. hohe bzw. niedrige Temperatur, organische Lösungsmittel, pH-Wert);
- > erhöhte Stabilität unter Lagerungs- und Transportbedingungen.

Optimierung von Produktionsorganismen – Metabolic Engineering, Systembiologie und Synthetische Biologie

3.2

In der industriellen Biotechnologie werden nur wenige Dutzend Mikroorganismenarten (Bakterien, Hefen, Pilze) als Produktionsorganismen routinemäßig eingesetzt, die in ihren Eigenschaften auf die besonderen Anforderungen der industriellen Produktionsprozesse hin optimiert wurden und werden (Kap. II.2.2). Um diese Optimierung möglichst zielgerichtet und effizient durchführen zu können, wurden in den letzten Jahrzehnten »Werkzeugkästen« und Vorgehensweisen entwickelt, die zunehmend komplexe und tiefgreifende Anpassungen der Produktionsorganismen an die Erfordernisse des industriellen Produktionsprozesses ermöglichen. Hierzu zählen:

Ungerichtete Mutation und Selektion: Die meisten Produktionsorganismen wurden bis in die 1970er Jahre durch wiederholte ungerichtete Mutation und nachfolgende Selektion für die jeweiligen Produktionsverfahren optimiert. Auf diese Weise wurde eine bemerkenswerte Leistungsfähigkeit erreicht. Limitierungen dieses Ansatzes liegen darin, dass sich im Verlauf dieses Entwicklungsprozesses auch nicht erwünschte Mutationen in den Stämmen anhäufen.

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

Gentechnische Veränderung: Seit den 1980er Jahren werden vergleichsweise einfache gentechnische Veränderungen an industriell relevanten Produktionsorganismen durchgeführt. Hierzu gehört die Übertragung und Expression eines industriell interessanten Gens aus einem industriell nicht genutzten Spenderorganismus in einen etablierten Produktionsorganismus. Auf diese Weise wird beispielsweise ein Großteil der industriell eingesetzten technischen Enzyme produziert (McAuliffe 2012; Hede 2014). Andere Ansätze zielen darauf ab, den Stofffluss durch die natürlicherweise im Produktionsorganismus bereits vorhandenen Stoffwechselwege bevorzugt in Richtung des gewünschten Endprodukts zu »kanalisieren«, beispielsweise durch

- › die Beseitigung von »Flaschenhälsen« in dem Stoffwechselweg, der für die Produktion des gewünschten Produkts durchlaufen werden muss. Dies kann u.a. durch Überexpression derjenigen Enzyme, die im betreffenden Stoffwechselweg einen »Flaschenhals« darstellen, durch Austausch des natürlicherweise im Organismus vorkommenden Enzyms durch ein anderes Enzym mit höherer Aktivität oder durch Beseitigung von Endprodukt-hemmungen erfolgen.
- › das Ausschalten von konkurrierenden Stoffwechselwegen, die einen Teil des Stoffflusses zum gewünschten Endprodukt abzweigen und dadurch die Ausbeute verringern.

Gegenüber der ungerichteten Mutation und Selektion kann die gentechnische Veränderung gezielter erfolgen. Jedoch können durch einfache gentechnische Veränderungen meist keine Stämme erhalten werden, die vergleichbar hohe Leistungsfähigkeit wie Stämme aufweisen, die mit dem Mutations-/Selektionsansatz entwickelt wurden, da der Komplexität der zu beeinflussenden Stoffwechsel- und Regulationsnetzwerke nicht Rechnung getragen werden kann.

Metabolic Engineering: Beim Metabolic Engineering werden, wie bei der gentechnischen Veränderung, gentechnische Veränderungen in den Produktionsstamm eingeführt. Sie betreffen jedoch eine Vielzahl von Genen und Enzymen, auch werden vollständige Stoffwechselwege neu in den Zielorganismus übertragen. Zudem beschränken sich die Veränderungen nicht allein auf den Stoffwechselweg, der für die Synthese des Zielprodukts verantwortlich ist, sondern es wird ein komplexes Netzwerk an Reaktionen und Stoffwechselwegen adressiert sowie die verschiedenen Ebenen der Regulation, die dieses Netzwerk steuern.

Ein instruktives (Lehrbuch-)Beispiel aus der industriellen Biotechnologie ist die Konstruktion eines Produktionsstammes für die Plattformchemikalie 1,3-Propan diol in *E.-coli*-Bakterien (Kap. III.1.2). Für die Synthese von 1,3-Propan diol wurde der gesamte Syntheseweg in einen *E.-coli*-Laborstamm eingeführt. Dies umfasste neben dem Einbau von insgesamt neun Genen, die aus drei verschiede-



nen Organismen stammten, das Entfernen mehrerer E.-coli-Gene sowie die Einführung eines effizienteren Glucoseaufnahmesystems und die Optimierung der Kohlenstoff-, Redox- und Energiebilanz unter Wachstums- und Produktionsbedingungen (Kurian 2005; Nakamura/Whited 2003; Nusser et al. 2007). Die Entwicklung dieses Produktionsstammes und -verfahrens erfolgte – in den frühen Jahren des Metabolic Engineering – über einen Zeitraum von insgesamt 15 Jahren und erforderte eine Personalkapazität von 575 Personenjahren (Hodgman/Jewett 2012).

Seitdem wurde das Instrumentarium für groß angelegtes Metabolic Engineering umfänglich weiter entwickelt und insbesondere mit der Systembiologie kombiniert. Dieses Instrumentarium baut auf -omics-Technologien auf. Hierunter versteht man Methoden zur Sequenzierung aller Gene, zur Ermittlung aller Gentranskripte und aller Metabolite, mit denen der Zustand des Produktionsorganismus eingehend charakterisiert werden kann. Die so erhobenen Daten werden mithilfe der Bioinformatik in ein Computermodell überführt, mit dem der Stoffwechsel des Produktionsorganismus *in silico* simuliert werden kann (BÖR 2012). Auf dieser Basis erfolgt eine modellgestützte Vorhersage, welche Veränderungen im Stoffwechsel bzw. in der Regulation mit hoher Wahrscheinlichkeit zu der gewünschten Veränderung der produktionsrelevanten Eigenschaft führen werden (Cloots/Marchal 2011; Mampel et al. 2013; Österlund et al. 2012). Bei der anschließenden experimentellen Verifizierung dieser Vorhersage können auch zellfreie Verfahren zum Einsatz kommen (Dudley et al. 2015) (Kap. II.2.3).

Beim heutigen Stand der Technik sind systembiologiegestützte Ansätze des Metabolic Engineering sehr leistungsfähig: Für Aminosäuresynthesen wird der Produktionsorganismus *Corynebacterium glutamicum* industriell eingesetzt. Während der unveränderte Wildtypstamm die Aminosäure L-Lysin nicht überproduziert, konnte durch Metabolic Engineering ein Produktionsorganismus konstruiert werden, der in Bezug auf die Lysinüberproduktion den über 50 Jahre klassisch mutierten und selektierten, kommerziell eingesetzten L-Lysinproduktionsstämmen ebenbürtig war. Hierfür mussten im Wildtyp zwölf Gene verändert werden, die durch Computersimulation vorhergesagt worden waren (Becker et al. 2011).

Synthetische Biologie: Eine konzeptionelle und qualitative Weiterentwicklung des systembiologieunterstützten Metabolic Engineering erfolgt durch die Synthetische Biologie (TAB 2015). Aufbauend auf der chemischen Synthese umfänglicher DNA-Sequenzen – bis hin zu vollständigen Genomen – wird in der Grundlagenforschung zur industriellen Biotechnologie angestrebt, in einem Top-down-Ansatz sogenannte Minimalorganismen aus den bislang verwendeten industriellen Produktionsstämmen zu konstruieren. Diese Minimalorganismen wären nur mit denjenigen physiologischen Funktionen ausgestattet, die

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

für die (industrielle) Produktion der Zielsubstanz zwingend erforderlich sind; alle anderen Zelleistungen würden als für den jeweiligen Zweck »überflüssig« entfernt (Leprince et al. 2012).

Komplementär dazu ist der Bottom-up-Ansatz, bei dem durch die Assemblierung nichtlebender chemischer Bausteine synthetische Zellen für bestimmte Produktionszwecke aufgebaut werden sollen (Lanza et al. 2012; Österlund et al. 2012). Ein Meilenstein auf dem Weg zu synthetischen Zellen wurde mit der chemischen Synthese eines vollständigen (wenn auch kleinen) Genoms, dessen Übertragung in einen Empfängerorganismus und der Nachweis der Funktionsfähigkeit erreicht (Gibson et al. 2010).

Darüber hinaus wird im Rahmen der Synthetischen Biologie angestrebt, das Repertoire der Stoffumwandlungen, zu denen Organismen befähigt sind, zu erweitern. Zu den hierzu verfolgten Ansätzen gehören neben anderen die Erweiterung des genetischen Codes, um auch nichtnatürliche Aminosäuren durch den Zellstoffwechsel in Proteine einbauen zu können (Hoesl/Budisa 2011; Hoesl/Budisa 2012). Durch die Konstruktion von Mikroorganismen, die nur überleben können, solange sie mit diesen nichtnatürlichen Aminosäuren gefüttert werden, eröffnen sich auch neue Möglichkeiten des Biocontainments (Mandell et al. 2015; Rovner et al. 2015).

Optimierung von Enzymen – Enzymengineering und Enzymdesign

3.3

Die Optimierung von ursprünglich aus der Natur isolierten Enzymen im Hinblick auf ihren Einsatz in industriellen Produktionsprozessen hat eine ähnliche Entwicklung genommen wie die Optimierung von Produktionsorganismen. In historischer Perspektive lassen sich hierbei drei Wellen unterscheiden (Bornscheuer et al. 2012):

Nutzung von natürlicherweise vorkommenden Enzymen: Der ersten Welle sind Ansätze zuzuordnen, in denen natürlicherweise vorkommende Enzyme in industriellen Produktionsprozessen eingesetzt werden. Neben der Isolierung dieser Enzyme aus natürlichen Quellen war es ein wesentlicher Fortschritt, mit der Entwicklung der Gentechnik die Gene, die für die gewünschten Enzyme kodieren, in Produktionsorganismen überexprimieren zu können. Durch die damit verbundene Massenproduktion und Kostensenkung konnten neue industrielle Anwendungsfelder für Enzyme erschlossen werden, die jedoch weitgehend auf die enzymatische Umsetzung von Naturstoffen beschränkt waren. Eine wesentliche Limitierung stellte die begrenzte Stabilität der Enzyme unter Prozessbedingungen dar. Sie wurde meist durch Immobilisierung der Enzyme, d.h. ihre Kopplung an Trägermaterialien überwunden.



Proteinengineering zur Umsetzung nichtnatürlicher Substrate: Durch Einführung von Mutationen in die für die Enzyme kodierenden Gene wurden Enzymeigenschaften so verändert, dass auch nichtnatürliche Substanzen durch die Enzyme umgesetzt werden können. In der Regel handelte es sich dabei um vergleichsweise kleine Änderungen in der Struktur der Enzyme. Dadurch wurde der Einsatzbereich von Enzymen auf die industrielle Herstellung von Pharmawirkstoffen und Fein- und Spezialchemikalien ausgeweitet.

Fortgeschrittenes Proteinengineering: Die dritte (und derzeitige) Welle des Enzymengineerings macht sich methodische Fortschritte in DNA-Sequenzierung und DNA-Synthese, in der gerichteten Evolution (Tracewell/Arnold 2009) und in Bioinformatikwerkzeugen sowie der Computermodellierung (Damborsky/Brezovsky 2014) zunutze, um Enzyme mit den gewünschten Eigenschaften zu erhalten. Bei der gerichteten Evolution handelt es sich um einen iterativen, konzeptionell an der Darwin'schen Evolutionstheorie orientierten Ansatz, bei dem zunächst eine Vielzahl leicht unterschiedlicher Varianten des zu optimierenden Enzyms generiert wird und aus diesem diversen Pool durch geeignete Selektionsverfahren diejenigen Varianten ausgewählt werden, die die günstigsten Eigenschaften aufweisen. Durch geeignete Kombinationen der zuvor genannten Methoden können in wenigen Monaten sehr große Veränderungen in die Enzyme eingeführt werden. Anfang der 2000er Jahre konnten typischerweise ein bis fünf Aminosäurebausteine in einem Enzym verändert werden; im Jahr 2010 waren 30 bis 40 Aminosäureaustausche nicht ungewöhnlich. Auf diese Weise können Substrat- und Reaktionsspezifität, Selektivität und Stabilität des Enzyms auch unter harschen Bedingungen, deutlich verändert werden. Dies hat zur Folge, dass heutzutage nicht mehr der Produktionsprozess an das Enzym angepasst werden muss, sondern umgekehrt das Enzym auf die Anforderungen des Produktionsprozesses hin optimiert wird (Bornscheuer et al. 2012). Dadurch können Enzyme insgesamt breiter eingesetzt werden und auch in Anwendungen vordringen, die bislang nur chemischen Verfahren vorbehalten waren.

Weiterentwicklungen im fortgeschrittenen Proteinengineering: Während Enzyme von Relevanz für industrielle Produktionsprozesse zurzeit stets Optimierungen von natürlicherweise vorkommenden Enzymen sind, wird perspektivisch auch das De-novo-Design von maßgeschneiderten Enzymen, insbesondere für nichtnatürliche Reaktionen, angestrebt. Dies ist trotz einiger Erfolge weiterhin noch im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelt (Zanghellini 2014).

Darüber hinaus wird intensiv daran gearbeitet, die derzeit in industriellen Produktionsprozessen vorherrschenden wenigschrittigen enzymkatalysierten Reaktionen durch komplexere Umsetzungen zu ergänzen. Für derartige Multi-enzymkaskaden müssen die Enzyme in definierter räumlicher Nähe zueinander

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

angeordnet werden, wobei neue Ansätze der Immobilisierung, u. a. aus der Nanobiotechnologie, vielversprechend erscheinen (Schoffelen/Van Hest 2012).

Um das Spektrum der enzymkatalysierten, industriell relevanten Reaktionstypen auf kofaktor- und energieabhängige Reaktionen, z. B. Redoxreaktionen, zu erweitern, müssen in den letzten Jahren entwickelte Verfahren zur Regeneration von Reduktions- und Energieäquivalenten vom Labor- in den industriellen Maßstab übertragen werden (Andexer/Richter 2015; Kara et al. 2014).

Zudem wird daran geforscht, die jeweiligen Vorteile von chemischer und enzymatischer Synthese – in der Regel in zellfreien Ansätzen – miteinander zu kombinieren. Strategien umfassen die Kombination von nichtenzymatischen Katalysatoren und Enzymen *in vitro*, das Engineering von Enzymen um nicht-natürliche Substrate umzusetzen bzw. nichtnatürliche Reaktionen zu katalysieren (Harris/Jewett 2012; Wallace/Balskus 2014).

Prozessdesign und Bioverfahrenstechnik

3.4

Das Design eines Bioprozesses umfasst drei grundlegende Aufgaben:

- › Identifizierung und Optimierung eines Biokatalysators (Mikroorganismus, Enzym) mit überdurchschnittlicher Produktivität (Kap. II.2, Kap. II.3);
- › Optimierung der Reaktionsbedingungen (z. B. Temperatur, pH-Wert, Belüftung und Durchmischung, Medienzusammensetzung, Konzentration des Substrats, Betriebsart, Regelungsprofil etc.);
- › Hochskalieren des Prozesses auf den Produktionsmaßstab (Scale-up).

Ein biotechnischer Produktionsprozess ist typischerweise in die drei Stufen Upstream Processing, den eigentlichen Produktionsprozess sowie das Downstream Processing gegliedert. Diese Stufen müssen beim Bioprozessdesign optimiert und aufeinander abgestimmt werden.

Upstream Processing: Als Upstream Processing bezeichnet man die vorbereitenden Maßnahmen für den eigentlichen Produktionsprozess. Hierzu gehören die fachgerechte Lagerung von Mikroorganismen, die Vorbereitung und Sterilisation der Substrate, die Reinigung und Sterilisation des Bioreaktors sowie die Anzucht des Produktionsstammes in genügenden Mengen, um damit den Produktionsprozess starten zu können.

Produktionsprozess: Der Produktionsprozess findet in einem Bioreaktor statt, der eine geeignete Umgebung für die biologische Stoffumwandlung bereitstellt. Für verschiedene Einsatzzwecke steht eine große Bandbreite an technisch ausgereiften Bioreaktoren zur Verfügung – sie reicht vom traditionellen Eichenholzweinfass über Tropfkörper in Kläranlagen bis hin zu Edelstahlrührkesselreaktoren mit bis zu 100 m³ Volumen. In der industriellen Biotechnologie sind



Bioprozesse am häufigsten, bei denen sich die Mikroorganismen bzw. Enzyme in wässriger Lösung befinden, die gerührt und begast wird. Durch entsprechende Prozessanalytik und -steuerung werden die Bedingungen im Bioreaktor im optimalen Bereich gehalten. Für die neu zu etablierende Produktionsplattform der Mikroalgen (Kap. II.2.2) stehen zwar ebenfalls verschiedene Photobioreaktortypen zur Verfügung, doch bedürfen sie noch der Optimierung, insbesondere im Hinblick auf die Erhöhung der Lichteinstrahlung, die Kühlung, und die Investitions- und Betriebskosten. Bei der Betriebsweise von Bioreaktoren unterscheidet man drei Typen:

Batchverfahren: Ein mit Wachstumsmedium gefüllter Bioreaktor wird mit dem Biokatalysator beimpft, die biokatalytische Reaktion läuft ab, und das dabei gebildete Produkt wird geerntet. Batchverfahren sind wegen ihrer technisch und organisatorisch einfachen Durchführbarkeit vor allem bei Laborarbeiten Standard. Nachteilig ist, dass wegen des Wachstums des Produktionsorganismus, der Umsetzung des Substrats und des sich akkumulierenden Produkts sich die Bedingungen im Bioreaktor sowie der physiologische Zustand der Produktionsorganismen im Zeitverlauf ständig ändern und auch nur in bestimmten Grenzen beeinflusst werden können.

Fed-Batch-Verfahren: Fed-Batch-Verfahren sind Batchverfahren, bei denen während der Prozessdauer Substrat nachdosiert wird. Hierdurch kann zum einen die Produktionsphase zeitlich verlängert werden. Zum anderen werden biokatalytische Umsetzungen durch eine hohe Substrat- oder Produktkonzentration häufig gehemmt bzw. es werden nicht erwünschte Nebenprodukte gebildet. In Fed-Batch-Verfahren können Substrat- und Produkthemmung sowie Nebenproduktbildung verringert werden, indem das Substrat in der Geschwindigkeit und Menge zugegeben wird, in der es biokatalytisch zum Produkt umgesetzt wird. Viele industrielle Bioprozesse werden als Fed-Batch-Verfahren betrieben, da sie einen praktikablen Kompromiss zwischen Batch- und kontinuierlichen Verfahren darstellen.

Kontinuierliche Verfahren: Bei kontinuierlichen Verfahren wird im Bioreaktor ein Fließgleichgewicht eingestellt, indem mit gleichbleibender Geschwindigkeit Substrat zugeführt und im gleichen Maße Bioreaktorinhalt abgezogen wird. In kontinuierlichen Verfahren bleibt der physiologische Zustand der Produktionsorganismen konstant. Wegen der – prinzipiell – hohen Standzeiten, der Möglichkeit zur Prozessautomatisierung und des geringen Personalaufwands sind kontinuierliche Verfahren für industrielle Produktionsprozesse aus wirtschaftlichen Gründen erstrebenswert. Allerdings ist es in der Praxis schwierig, kontinuierliche Verfahren tatsächlich über lange Zeiträume stabil zu betreiben: Die Verfahren sind anfällig für die Kontamination mit Nichtproduktionsorganismen; Produktionsorganismen verlieren bei längerer Kultivierung durch Mutationen produktionsrelevante Eigenschaften; und zudem ist die kontinuierliche

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

Aufreinigung der Produkte technisch schwieriger als in Batch- und Fed-Batch-Verfahren.

Ansatzpunkte für die Optimierung von Bioprozessen sind u. a. die Erhöhung der Produktivität je Volumen- oder Zeiteinheit, die Erhöhung der Ausbeute, die Reduktion der Prozessschritte, eine vereinfachte Aufreinigung, die Erschließung kostengünstiger Ausgangssubstrate, ein hoher Automatisierungsgrad oder die Wiederverwertung der Biokatalysatoren durch Immobilisierung oder Zellrückführung (Nusser et al. 2007).

Downstream Processing: Das Downstream Processing umfasst alle Prozessschritte, nachdem der biokatalytische, eigentliche Produktionsprozess abgeschlossen ist. Hierzu gehören die Abtrennung des Produktionsorganismus bzw. des Enzyms aus der Reaktionslösung, meist durch Sedimentation, Zentrifugation oder Filtration. Sofern es sich um ein intrazellulär angehäuften Produkt handelt, müssen die Zellen aufgeschlossen werden, um das Produkt aus den Zellen freizusetzen. Das gewünschte Produkt ist anschließend aus der Reaktionslösung abzutrennen, aufzureinigen, zu trocknen und dem jeweiligen Verwendungszweck entsprechend zu konfektionieren (Chmiel 2011). Im Gegensatz zu chemischen Synthesen liefern biotechnische Prozesse ganz überwiegend verdünnte, aber komplex zusammengesetzte Produktlösungen. Dies hat zur Folge, dass vergleichsweise intensive Aufkonzentrierungs- und Aufreinigungsschritte durchgeführt werden müssen, die sich wesentlich auf die Kosten bzw. Wirtschaftlichkeit des Produktionsverfahrens auswirken. Für das Downstream Processing steht ein breites Spektrum an etablierten Technologien zur Verfügung, ihre Auswahl und Anpassung an einen bestimmten Prozess beruht jedoch überwiegend auf Erfahrungswissen (Weuster-Botz et al. 2007). Optimierung im Downstream Processing zielt darauf an, die Anzahl der Arbeitsschritte zu reduzieren, die Produktkonzentration zu erhöhen und somit das Arbeitsvolumen zu verkleinern und anfallende Nebenprodukte frühestmöglich im Prozess abzutrennen (Strube et al. 2011).

Scale-up: Die beschriebenen Schritte des Prozessdesigns werden zunächst im Labor- und ggf. Technikumsmaßstab durchgeführt, d. h. im Milliliter- bis 100-l-Maßstab. Für eine industrielle Produktion schließt sich eine Maßstabsvergrößerung (Scale-up) an, in der die Produktionsanlage geplant und ausgelegt wird.

Es hat sich gezeigt, dass für eine effiziente Bioprozessentwicklung eine integrierte Biokatalysator- und Prozessentwicklung erforderlich ist: Durch die spezifischen Eigenschaften des Biokatalysators werden bereits zahlreiche Prozessparameter vorgegeben (z. B. Belüftung, Anforderungen an den Massentransfer, pH- und Temperaturbereiche, in denen der Biokatalysator aktiv ist). Durch Optimierung des Biokatalysators (z. B. im Hinblick auf die erzielbare Endkonzentration des gewünschten Produkts) können aber möglicherweise Prozessschritte eingespart oder weniger aufwendig ausgelegt werden (z. B. Downstream Processing). Umgekehrt können unerwünschte Eigenschaften des Biokatalysators (z. B.



Nebenproduktbildung, Produkthemmung) durch eine geeignete Auslegung des Prozesses (z. B. Betrieb im Fed-Batch-Modus) kompensiert werden.

Bei der Bioprozessentwicklung erweist sich oft der zweite Schritt, die Optimierung der Reaktionsbedingungen, als limitierend: Zum einen kann aus Ressourcengründen oft nur eine geringe Anzahl der prinzipiell möglichen Verfahrensvarianten experimentell untersucht werden. Zum anderen lassen sich Ergebnisse, die in im Labor üblichen Kultivierungsverfahren (Schüttelkulturen, Batchverfahren) erzielt werden, nur bedingt auf größere Bioreaktoren mit Fed-Batch-Prozessführung übertragen; dies liegt ganz wesentlich in den fehlenden Mess- und Steuereinrichtungen der Laborkultivierungsverfahren (Weuster-Botz et al. 2007). In den letzten Jahren wurden deshalb Minibioreaktoren im Millilitermaßstab entwickelt, die mit Mess- und Steuerungstechnik ausgerüstet sind, in großer Zahl parallel betrieben werden können und eine Kultivierung unter kontrollierten Bedingungen ermöglichen, die mit Bioreaktoren im großvolumigen Maßstab vergleichbar ist (Hortsch/Weuster-Botz 2010). Der Einsatz dieser Mikroreaktoren in der Verfahrensentwicklung ermöglicht (Chmiel 2011):

- > Optimierung von Prozessbedingungen durch paralleles Testen vieler Prozessparameter sowie Kombinationen verschiedener Prozessparameter;
- > Erhebung verlässlicher Daten in Kombination mit Simulation und Modellierung, die die Auslegung einer Pilot- oder Produktionsanlage ermöglichen;
- > schnelle Bereitstellung von kleinen Produktmengen, z. B. für Prüfpräparate;
- > technische Unterstützung der integrierten Biokatalysator- und Prozessentwicklung, dadurch verkürzte Entwicklungszeiten.

Bioraffinerien

4.

In Analogie zur Erdölraffinerie, die den Rohstoff Erdöl zu Basischemikalien verarbeitet, die in viele weitere Produktionsprozesse eingespeist werden, wird an der Konzeption und Implementierung von Bioraffinerien für die Verarbeitung von Biomasse gearbeitet. Dabei besteht die Herausforderung darin, verschiedene biomassennutzende Umwandlungs- und Produktionsprozesse so zu kombinieren, dass die eingesetzte Biomasse möglichst vollständig genutzt und zudem eine hohe Wertschöpfung erzielt wird.

Bioraffinerien werden folgendermaßen definiert: Eine Bioraffinerie zeichnet sich durch ein explizit integratives, multifunktionelles Gesamtkonzept aus, das Biomasse als vielfältige Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung eines Spektrums unterschiedlicher Zwischenprodukte und Produkte (Chemikalien, Werkstoffe, Bioenergie einschließlich Biokraftstoffe) unter möglichst vollständiger Nutzung aller Rohstoffkomponenten nutzt. Als Kuppelprodukte können

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

ggf. zusätzlich auch Nahrungs- und/oder Futtermittel anfallen. Hierfür erfolgt die Integration unterschiedlicher Verfahren und Technologien (VDI 2014).

Das Konzept von Bioraffinerien ist in Abbildung II.1 schematisch dargestellt: Der Rohstoff Biomasse wird in einer Primärraffination zu sogenannten »Plattformen¹« umgesetzt. Als »Plattformen« werden Zwischenprodukte bezeichnet, die das »Bindeglied« zwischen den Biomasserohstoffen und den letztlich daraus hergestellten Zwischen- und Endprodukten darstellen. Dabei kann dieselbe Plattform über verschiedene Umwandlungsprozesse aus verschiedenen Biomasserohstoffen bereitgestellt werden bzw. ein Biomasserohstoff zu verschiedenen Plattformen verarbeitet werden. In der sogenannten Sekundärraffination werden die Plattformen zu Zwischen- und Endprodukten verarbeitet, die dann vermarktet werden.

Um die Vielfalt der möglichen Bioraffineriekonzepte zu systematisieren, werden sie anhand der vier Charakteristika Biomasserohstoff, Plattform, Produkte und Prozesse klassifiziert (Cherubini et al. 2009):

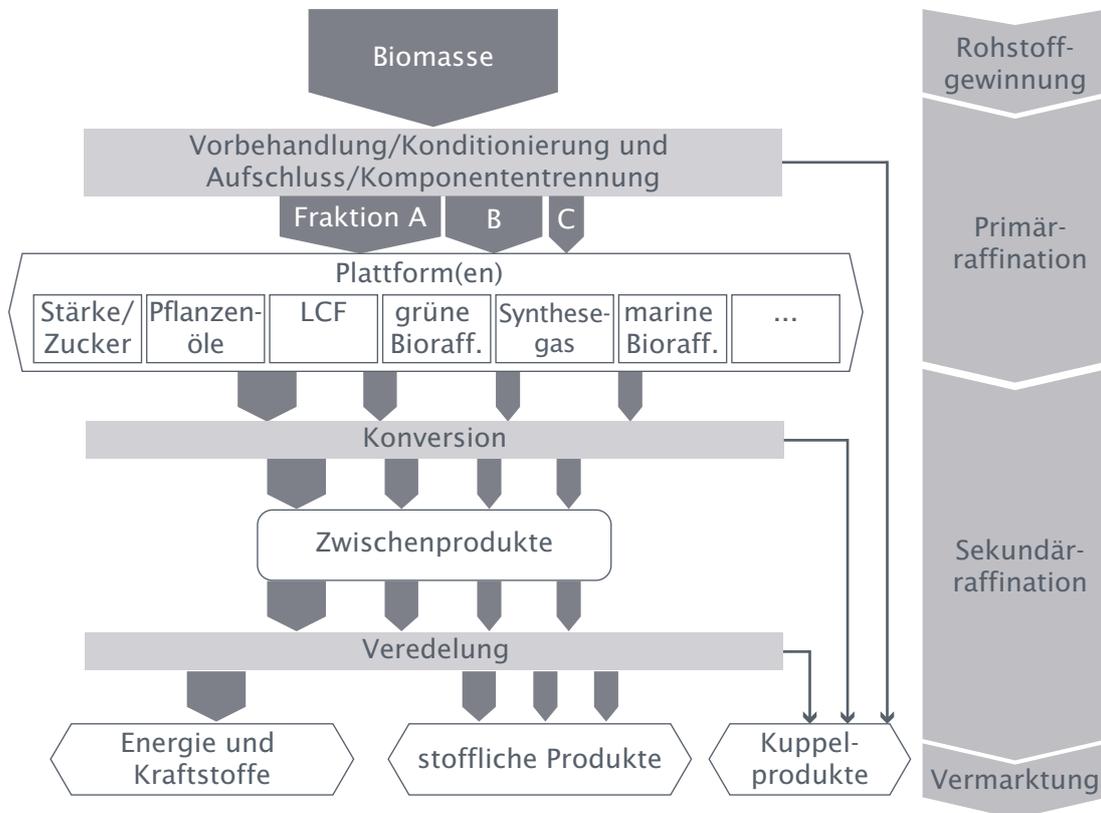
Art des eingesetzten Biomasserohstoffs: Zu den wichtigsten Biomasserohstoffen, die in Bioraffinerien verarbeitet werden, gehören mehrjährige Gräser, Stärkepflanzen (z. B. Weizen, Mais), Zuckerpflanzen (z. B. Zuckerrübe, Zuckerrohr), holzige Pflanzen (z. B. aus Forst- oder Kurzumtriebswirtschaft), Ölpflanzen (z. B. Ölpalmen, Raps), aquatische Biomasse (Mikro- u. Makroalgen) und biogene Reststoffe aus Land- und Forstwirtschaft (z. B. Stroh, Gülle, Waldrestholz) bzw. organische Reststoffe die in Industrie, Handel und bei Endverbrauchern anfallen (z. B. Molke aus der Milchverarbeitung, Lebensmittel- und Speisereste aus Gastronomie und Lebensmittelhandel, Grünabfälle, Altholz).

Art der Bioraffinerieplattform: Zu den wichtigsten Plattformen zählen niedermolekulare Kohlenhydrate (z. B. Lactose, Saccharose), polymere Kohlenhydrate (z. B. Stärke, Inulin, Pektin), Lignocellulosekomponenten (Lignin, Cellulose, Hemicellulose), Proteine, Pflanzenfasern, Öle aus Ölpflanzen, Algen und ölhaltigen Reststoffen, Pyrolyseöl, Presssäfte aus grüner »naturfeuchter« Biomasse wie Gras, Luzerne, Klee und unreifem Getreide, Biogas (ein Gemisch aus Methan und CO₂) aus der anaeroben Vergärung von Biomasse, Syngas (ein Gemisch aus CO und Wasserstoff) aus der Biomassevergasung.

1 »Plattformen« in Bioraffinerien weisen gewisse Überschneidungen mit »Plattformchemikalien« (Kap. III.1.2) auf, sind aber nicht vollständig deckungsgleich. In vielen Fällen sind unter dem Begriff der »Plattformen« in Bioraffinerien Gruppen von Substanzen zusammengefasst, während mit dem Begriff »Plattformchemikalie« eine bestimmte chemische Verbindung bezeichnet wird. Gemeinsam ist beiden Begriffen, dass sie Zwischenprodukte bei der Umsetzung von Biomasse bezeichnen, die zu einer großen Zahl von weiteren Zwischen- und Endprodukten umgesetzt werden können.

Abb. II.1

Konzept einer Bioraffinerie



Eigene Darstellung nach Bundesregierung 2012

Produkte: In Bioraffinerien wird Biomasse sowohl energetisch als auch stofflich verwertet. Je nach Anteil der jeweiligen Produktgruppe an den Produkten der Bioraffinerie werden zwei Klassen von Bioraffinerien unterschieden.

In Bioraffinerien mit Schwerpunkt auf der energetischen Biomassennutzung wird die Biomasse hauptsächlich zu Biokraftstoffen verarbeitet und zur Strom- und Wärmeproduktion genutzt. Chemikalien und Werkstoffe werden im Verhältnis dazu nur in geringer Menge produziert. Biomassereststoffe können stofflich genutzt werden, indem daraus beispielsweise Tierfutter hergestellt wird.

In Bioraffinerien mit Schwerpunkt auf der stofflichen Biomassennutzung werden biobasierte Chemikalien, Lebens- und Futtermittel hergestellt. Reststoffe aus der Produktion werden energetisch verwertet. Zu den in diesen Bioraffinerien hergestellten Produktgruppen gehören Düngemittel, Plattformchemikalien, Biokunststoffe und -fasern, biobasierte Werkstoffe (z. B. faserverstärkte Kunststoffe), Zellstoff und Papier, Lebens- und Futtermittel.

Prozesse: In Bioraffinerien kommen vier Gruppen von Prozessen zum Einsatz: mechanische/physikalische Prozesse, die die Biomasse lediglich zerkleinern oder in ihre Bestandteile auftrennen, aber chemisch nicht verändern (z. B. Pres-

^
 > II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
 v

sen, Mahlen, Sieben, Destillation); biochemische/biotechnische Prozesse, bei denen eine chemische Veränderung der Biomassebestandteile durch Biokatalysatoren (Mikroorganismen oder Enzyme) erfolgt; chemische Prozesse, bei denen die chemische Veränderung der Biomassebestandteile erfolgt (z. B. Hydrolyse, Umesterung, Oxidation); thermochemische Prozesse, in denen die Biomasse bei hohen Temperaturen und hohem Druck chemisch verändert und in kleine Moleküle abgebaut wird (z. B. Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung).

Tab. II.7 Allgemeiner Entwicklungsstand von verschiedenen Bioraffineriekonzepten

Bioraffineriekonzept	Entwicklungsstand	
	Phase	Technologiereifegrad 1-9*
Zuckerbioraffinerie	kommerzielle Phase	9
Stärkebioraffinerie	kommerzielle Phase	9
Pflanzenölbioraffinerie	kommerzielle Phase	9
Algenlipidbioraffinerie	Labor-/Technikumsphase	3
Lignocellulosebioraffinerie (fermentierbare Kohlenhydrate)	Pilot-/Demonstrations-/ Referenzphase	6
Lignocellulosebioraffinerie (Zellstoff)	kommerzielle Phase	9
grüne Bioraffinerie	Pilot-/Demonstrations-/ Referenzphase	5
Synthesegasbioraffinerie	Pilot-/Demonstrations-/ Referenzphase	5
Biogasbioraffinerie	Labor-/Technikumsphase	2

* Technologiereifegrad 1: Beschreibung des Funktionsprinzips; 2: Beschreibung eines Technologiekonzepts; 3: Nachweis der Funktionsfähigkeit (Proof of Concept); 4: Validierung im Labor; 5: technische Validierung in einer relevanten Einsatzumgebung; 6: Demonstration in einer relevanten Einsatzumgebung; 7: Demonstration im Einsatz; 8: qualifiziertes und vollständiges System; 9: System im erfolgreichen Einsatz

Eigene Zusammenstellung von Daten aus Bundesregierung 2012

Zur Umsetzung eines Bioraffineriekonzepts können grundsätzlich zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt werden (Bundesregierung 2012):

Bottom-up-Ansatz: Eine bestehende Biomasseverarbeitungsanlage (z. B. Zuckerfabrik, Ölmühle, Ethanolanlage) wird erweitert, indem weitere Produktionsprozesse integriert werden. Somit wird an bestehende industrielle Prozesse der Konversion von Biomasse angeknüpft. Bei diesem Ansatz sind sowohl technische als auch ökonomische Risiken geringer als beim Top-down-Ansatz; Bio-



raffinerien mit einem hohen Entwicklungsstand beruhen überwiegend auf dem Bottom-up-Ansatz (Tab. II.7).

Top-down-Ansatz: Die Bioraffinerie wird als neue, hoch integrierte Produktionsanlage konzipiert. Spezifisch hierfür entwickelte und ausgelegte Anlagen für die Herstellung von Plattformen und deren Umsetzung zu Zwischen- und Endprodukten werden errichtet.

Al-Kaidy et al. (2014) unterscheiden schließlich noch Bioraffinerien der 1., 2. und 3. Generation: In Bioraffinerien der ersten Generation wird ein Substrat zu einem einzigen Produkt umgesetzt, z.B. Stroh zu Ethanol. In Bioraffinerien der zweiten Generation werden aus einem Substrat mehreren Produkten hergestellt, z.B. die Gewinnung von Lignin, Ethanol und organischen Säuren aus Holz. Bioraffinerien der dritten Generation setzen schließlich unterschiedliche Substrate zu einer Vielzahl von Produkten um. Bioraffinerien der ersten und zweiten Generation sind im Pilot-, Demonstrations- und Produktionsmaßstab realisiert; Bioraffinerien der dritten Generation befinden sich noch in der Entwicklung (Al-Kaidy et al. 2014).

Tabelle II.7 gibt eine Übersicht über den allgemeinen Entwicklungsstand von verschiedenen Bioraffineriekonzepten, der durch den Technologiereifegrad charakterisiert wird. Der Technologiereifegrad gibt auf einer Skala von 1 bis 9 an, wie weit entwickelt eine Technologie ist – je höher der Wert, umso weiter entwickelt die Technologie. Der Technologiereifegrad wird durch eine systematische Analyse ermittelt. Tabelle II.8 schlüsselt für jedes Bioraffineriekonzept den Technologiereifegrad für die verschiedenen Prozessstufen auf. Der in den beiden Tabellen dokumentierte Entwicklungsstand lässt sich folgendermaßen charakterisieren (Bundesregierung 2012):²

Zucker-, Stärke-, Pflanzenöl- und Lignocellulose (Zellstoff): Den höchsten Entwicklungsstand erreicht haben Zucker-, Stärke-, Pflanzenöl- und Lignocellulose-bioraffinerien, die Zellstoff als Plattform bereitstellen: Diese Bioraffinerien werden erfolgreich kommerziell betrieben. Dabei kann ganz wesentlich auf Prozess-Know-how zurückgegriffen werden, das bei der konventionellen Verarbeitung dieser Plattformen zu Nahrungs- und Futtermitteln, Biodiesel bzw. Papier in Bezug auf die Rohstoffbereitstellung und Primärraffination aufgebaut wurde; meist wird beim Ausbau zu einer Bioraffinerie der Bottom-up-Ansatz verfolgt. Bei diesen Bioraffinerietypen bestehen die technischen Herausforderungen vor allem in der Sekundärraffination, d.h. der Umsetzung der Plattformen in neue Produkte, sowie der Integration der Prozesse in ein Gesamtkonzept.

2 Die Tabellen A.1 und A.2 im Anhang fassen weitere Informationen zu Bioraffinerien zusammen (u.a. eine Übersicht über ausgewählte Bioraffinerien in Deutschland und Europa sowie eine Charakterisierung der verschiedenen Bioraffineriekonzepte mit ihren Vor- und Nachteilen).

^
 > II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
 v

Tab. II.8 Entwicklungsstand von verschiedenen Bioraffineriekonzepten, aufgeschlüsselt nach Prozessstufen

Bioraffinerie-konzept	Entwicklungsstand (Technologiereifegrad 1-9)*						
	gesamt	in Prozessstufen					Integra-tion
		Rohstoff-bereit-stellung	Primär-raffination	Sekundär-raffination	Zwischen-produkte	Vered-lung	
		Auf-schluss	Aufrei-nigung				
Zucker-bioraffinerie	9	9	9	8	6	6	6
Stärke-bioraffinerie	9	9	9	8	6	6	6
Pflanzenöl-bioraffinerie	9	9	9	8	7	6	6
Algenlipid-bioraffinerie	3	5	4	4	4	4	3
Lignocellulose-bioraffinerie (fermentierbare Kohlenhydrate)	6	6	6	5	5	4	5
Lignocellulose-bioraffinerie (Zellstoff)	9	9	9	9	7	6	6
grüne Bioraffinerie	5	6	4	3	2	2	2
Synthesegas-bioraffinerie	5	6	6	6	5	4	2
Biogas-bioraffinerie	2	9	9	9	2	2	1

* Technologiereifegrad 1: Beschreibung des Funktionsprinzips; 2: Beschreibung eines Technologiekonzepts; 3: Nachweis der Funktionsfähigkeit (Proof of Concept); 4: Validierung im Labor; 5: technische Validierung in einer relevanten Einsatzumgebung; 6: Demonstration in einer relevanten Einsatzumgebung; 7: Demonstration im Einsatz; 8: qualifiziertes und vollständiges System; 9: System im erfolgreichen Einsatz

Eigene Zusammenstellung von Daten aus Bundesregierung 2012

Lignocellulosebioraffinerien (fermentierbare Kohlenhydrate): In der Pilot- und Demonstrationsphase befinden sich Lignocellulosebioraffinerien, die fermentierbare Kohlenhydrate bereitstellen sollen. Sie sind vor allem deswegen von Interesse, weil dadurch Biomassepotenziale erschlossen werden können, die in keiner direkten Nutzungskonkurrenz zu Nahrungs- und Futtermittelzwecken stehen (Kap. II.1.4). Im Jahr 2014 wurden in den USA die ersten acht kommer-



zielle Anlagen in Betrieb genommen, die aus lignocellulosehaltiger Biomasse Ethanol produzieren, wobei sich die Rohstoffbereitstellung, d.h. die Umwandlung der Lignocellulose in fermentierbare Zucker als technisch und wirtschaftlich sehr herausfordernd erwies (Kap. II.1.4). Herausforderungen für die nähere Zukunft liegen in der Diversifizierung der in der Sekundärraffination hergestellten Produkte: Insbesondere für die Verwertung von Lignin zu Produkten mit hoher Wertschöpfung sowie die Verwertung von Pentosen aus Hemicellulose besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf; auch die Integration in ein Gesamtkonzept ist noch ausbaubedürftig.

Grüne Bioraffinerie, Synthesegasbioraffinerie: In der Pilot- und Demonstrationsphase befinden sich Synthesegas- und grüne Bioraffinerie. Eine grüne Bioraffinerie verarbeitet grüne, feuchte Biomasse, z.B. frische oder silierte ein- oder mehrjährige Gräser zu Grassaft und Grasfaser, die als Teilstrom in eine Biogasanlage eingespeist werden. Bislang wurden nur Komponenten einer grünen Bioraffinerie untersucht, während die Umsetzung als integriertes Gesamtkonzept noch aussteht. Bislang fehlen, auch wirtschaftlich, überzeugende Konzepte und Verfahren, welche Produkte mit hoher Wertschöpfung – neben Biogas – aus Grassaft und Grasfaser hergestellt werden können, um insgesamt einen wirtschaftlichen Betrieb der grünen Bioraffinerie erreichen zu können. Bei der Synthesegasbioraffinerie handelt es sich um ein energetisch getriebenes Bioraffineriekonzept, denn der Schwerpunkt der bisherigen Entwicklungsarbeiten liegt auf der Nutzung des aus der Vergasung von Biomasse entstehenden Synthesegases zu flüssigen Biokraftstoffen, Strom und Wärme. Einzelne Komponenten der Synthesegasbioraffinerie sind entwickelt, aber ihr integriertes Zusammenwirken ist noch nicht validiert. Zudem besteht noch Bedarf, andere Produkte als Energie aus Synthesegas zu produzieren. Dabei weisen auch biotechnische Verfahren Potenzial auf, das jedoch noch nicht hinreichend erschlossen ist.

Algenlipid- bzw. marine Bioraffinerie: In einem frühen Entwicklungsstadium befindet sich die Algenlipid- bzw. marine Bioraffinerie. Hier besteht erheblicher und grundlegender FuE-Bedarf bereits auf der ersten Verfahrensstufe, der Rohstoff-, d.h. Algenbiomassebereitstellung. Dies korrespondiert mit dem FuE-Bedarf, der zur Etablierung von Mikroalgen als neue organismenbasierte Produktionsplattformen und zur Entwicklung von Photobioreaktoren und mikroalgenbasierten Bioprozessen konstatiert wurde (Kap. II.2.2 u. II.3.4). Während Deutschland in der Mikroalgen-FuE sowie dem Anlagenbau international wettbewerbsfähig ist, sind die klimatisch-geografischen Voraussetzungen für eine wettbewerbsfähige Mikroalgenbioraffinerie in Deutschland eher nicht gegeben.

Biogasm bioraffinerie: Ebenfalls in einem frühen Entwicklungsstadium befinden sich Biogasm bioraffinerien. Während die Biogasproduktion und damit die Rohstoffbereitstellung und Primärraffination technisch ausgereift und in Biogasanlagen seit Jahrzehnten kommerziell erfolgreich betrieben wird, ist beim

^
› II. Wissensbasis und wissenschaftlich-technische Entwicklungslinien der IBT
v

derzeitigen Wissensstand schwer zu beurteilen, inwieweit künftig ein Ausbau in Richtung einer Bioraffinerie möglich und sinnvoll ist. Hierfür müssten zum einen über die derzeitige energetische Nutzung des Biogases hinaus stoffliche Nutzungspfade etabliert werden. Zum anderen müsste untersucht werden, wie eine sowohl energetische als auch stoffliche Nutzung von Biogas, angepasst an standörtliche Kapazitäten der stofflichen Biogasumsetzung, technisch-wirtschaftlich konzipiert werden könnte.

Resümierend lässt sich konstatieren (Bundesregierung 2012; Star-COLIBRI 2011a u. 2011b), dass die Etablierung integrierter Bioraffinerien ein langfristiger Prozess ist, für den mehr als 10 Jahre vom Funktionsprinzip und Technologiekonzept bis zum erfolgreichen kommerziellen Einsatz zu veranschlagen sind. Den höchsten Technologiereifegrad haben Zucker-, Stärke-, Öl- und Zellstoffbioraffinerien erreicht, die nach dem Bottom-up-Ansatz auf Know-how und Produktionsanlagen für die konventionelle Verarbeitung dieser Agrarrohstoffe zu Nahrungs- und Futtermitteln, Biodiesel bzw. Papier aufbauen und zunehmend weitere Prozesse für die stoffliche und energetische Nutzung der Biomasse integrieren. Die Pilot- und Demonstrationsphase haben Lignocellulosebioraffinerien, die fermentierbare Kohlenhydrate bereitstellen und verarbeiten, Synthesegasbioraffinerien sowie die grüne Bioraffinerie erreicht. Hingegen besteht bei der marinen Bioraffinerie auf der Basis von Mikroalgen noch erheblicher grundlegender FuE-Bedarf.

Zurzeit liegt der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten bei Bioraffinerien auf der technologischen Entwicklung, deren aktueller Stand bereits dargelegt wurde. Wenn sich der konkrete Entwicklungsbedarf auch zwischen den verschiedenen Bioraffineriekonzepten unterscheidet, so sind konzeptübergreifend noch erhebliche Anstrengungen insbesondere bei der Sekundärraffination sowie bei der Optimierung und Integration der Einzelprozesse und -produkte in eine Gesamtanlage erforderlich. Zudem besteht in den nächsten Jahren Bedarf, die technologische Analyse durch ökonomische und ökologische Untersuchungen zu ergänzen. Damit soll eine Daten- und Wissensbasis geschaffen werden, die eine vergleichende ökonomische und ökologische Bewertung der Bioraffineriekonzepte untereinander sowie mit anderen Biomassenutzungspfaden erlaubt.

Unabhängig davon, welche der Bioraffineriekonzepte sich – unter den jeweils gegebenen Rahmenbedingungen – in den nächsten Jahren als vorteilhaft erweisen werden, ist die langfristige Verfügbarkeit von nachhaltig produzierter Biomasse essenzielle Voraussetzung für alle Bioraffineriekonzepte. Um die Biomasseversorgung zu sichern, ist es erforderlich, die nachhaltige und effiziente Produktion biobasierter Rohstoffe zu steigern, die Verwertung der biobasierten Rohstoffe effizienter zu gestalten sowie Rahmenbedingungen zu etablieren, die eine nachhaltige Entwicklung der Bioökonomie national und international absichern (BÖR 2014).



Anwendungen und Produkte der industriellen Biotechnologie

III.

In diesem Kapitel werden der aktuelle Stand der biotechnischen Verfahren und der Produkte der industriellen Biotechnologie in den relevanten Wirtschaftszweigen dargestellt.

Chemische Industrie

1.

Die chemische Industrie verarbeitet organische und anorganische Rohstoffe in chemischen Verfahren zunächst zu chemischen Grundstoffen (z.B. Gase, Säuren und Laugen, Petrochemikalien und Polymere [Kunststoffe], Düngemittel), die zu Zwischen- und Endprodukten (z.B. Farben und Lacke, Wasch- und Reinigungsmittel, Klebstoffe, Chemiefasern) weiterverarbeitet werden. Somit werden die in der chemischen Industrie hergestellten chemischen Erzeugnisse zum Teil in der chemischen Industrie selbst weiterverarbeitet, zum Teil an nachgelagerte Sektoren des verarbeitenden Gewerbes (z.B. Lebensmittelindustrie, Textilindustrie, Kunststoffverarbeitung), den Dienstleistungsbereich oder Endverbraucher abgegeben (Statistisches Bundesamt 2008b). Damit steht die chemische Industrie mit einem Großteil ihrer Produkte am Anfang vieler Wertschöpfungsketten und ist durch Lieferbeziehungen eng mit nachgelagerten Branchen verflochten.

Im Jahr 2013 waren in Deutschland rd. 307.000 Beschäftigte in der chemischen Industrie in 1.016 Betrieben tätig; der Umsatz belief sich auf knapp 137 Mrd. Euro, der Produktionswert auf knapp 115 Mrd. Euro (Statistisches Bundesamt 2015, VCI 2015). Gemessen an ihrem Anteil am Produktionswert der deutschen Chemieindustrie 2013 waren die bedeutendsten Bereiche Fein- und Spezialchemikalien (30%), gefolgt von Polymeren (25%), Petrochemikalien (24%), anorganische Grundchemikalien (11%) und Wasch- und Körperpflegemittel (10%). Die chemische Industrie nimmt bei der industriellen Biotechnologie und in der Bioökonomie eine Schlüsselrolle ein. Dies ist auf folgende Faktoren zurückzuführen:

Innovationsorientierung: Die Chemieindustrie ist traditionell innovativ, investiert hohe Anteile ihres Umsatzes in Forschung und Entwicklung und verfolgt auch langfristige FuE-Strategien. Die hieraus resultierenden Innovationen kommen aber nicht nur in der Chemieindustrie zum Tragen. Vielmehr fungiert die chemische Industrie auch für nachgelagerte Branchen als Innovator: sie ist Vorleister für die Branchen Lebensmittel- und Getränkeherstellung, Textil und Leder, Zellstoff- und Papierherstellung, Automobilbau, Bauwirtschaft und er-



bringt – zusammen mit dem Maschinen- und Anlagenbau – einen wesentlichen Anteil der Innovationsleistungen dieser Branchen.

Strategische Ausrichtung auf Bioökonomie, Biotechnologiekompetenz: In den letzten Jahren haben Unternehmen strategische Schwerpunkte in der industriellen Biotechnologie und Bioökonomie gesetzt, um ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit in den nachfolgend näher beschriebenen Teilbereichen der Chemieproduktion langfristig zu sichern. Damit verbunden ist der Aufbau von Biotechnologiekompetenz in den Unternehmen, die durch externe Kooperationen und internationale Netzwerke ergänzt wird. Dadurch ist die Biotechnologie in den Unternehmen inzwischen als integraler Bestandteil der Chemie etabliert und kommt in zunehmendem Maße gleichberechtigt neben chemischer Synthese sowie homogener und heterogener Katalyse zum Einsatz.

Erschließung von Biomasse als Rohstoffbasis für die chemische Industrie: Seit einigen Jahren zielen FuE-Arbeiten in der chemischen Industrie darauf ab, biobasierte, mengenmäßig bedeutsame Bulk- und Plattformchemikalien zur Produktionsreife im industriellen Maßstab zu bringen (Kap. III.1.2). Damit wird die Langfriststrategie verfolgt, die bisher überwiegend fossile Rohstoffbasis durch Biomasse zu ergänzen bzw. zu ersetzen. In Deutschland liegen die Mengen biobasierter Agrarrohstoffe, die stofflich genutzt werden, seit dem Jahr 2007 gleichbleibend in der Größenordnung von etwa 3,5 Mio. t (FNR 2014a). Davon wurden im Jahr 2011 78%, nämlich 2,7 Mio. t biogener Rohstoffe, in der chemischen Industrie verarbeitet. Damit ist die chemische Industrie der bedeutendste Industriezweig für die stoffliche Nichtnahrungsmittelnutzung von Agrarrohstoffen. Die chemische Industrie in Deutschland hat sich als Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 50% mehr nachwachsende Rohstoffe als heute für ihre Verfahren zu verwenden (VCI 2015). Trotz der wachsenden strategischen und auch kommerziellen Bedeutung der industriellen Biotechnologie in der chemischen Industrie werden fossile Rohstoffe in der Produktion chemischer Erzeugnisse weiterhin dominieren, denn im Jahr 2011 waren 88% der in der chemischen Industrie eingesetzten Rohstoffe (18,9 Mio. t) fossilen Ursprungs (FNR 2014a).

In der chemischen Industrie kommen vor allem fermentative Verfahren mit Mikroorganismen sowie enzymatische Verfahren zum Einsatz, um Fein- und Spezialchemikalien, Plattformchemikalien und Bulkchemikalien herzustellen. Diese Sparten unterscheiden sich in Bezug auf die aktuelle und potenzielle Nutzung der Biotechnologie, die technisch-wirtschaftlichen Anforderungen an industrielle Produktionsprozesse sowie die Wettbewerbs- und Marktsituation deutlich voneinander. In folgenden werden diese Chemiesparten mit Bezug zur industriellen Biotechnologie näher charakterisiert.

Fein- und Spezialchemikalien**1.1**

Fein- und Spezialchemikalien umfassen eine sehr breite Palette unterschiedlicher chemischer Erzeugnisse, darunter Farbstoffe, Pigmente, Anstrichmittel, Schädlingsbekämpfungsmittel und Desinfektionsmittel, Klebstoffe u. v. a. m. Ihnen ist gemeinsam, dass sie in vergleichsweise kleinen Chargen und Produktionsmengen (1 bis 10.000 t/Jahr) hergestellt und an spezifische Bedürfnisse (meist) industrieller Kunden angepasst sind. Mit einem Anteil von 30 % (rd. 34 Mrd. Euro) am Produktionswert waren Fein- und Spezialchemikalien im Jahr 2013 die wirtschaftlich bedeutendste Sparte der deutschen Chemieindustrie (VCI 2015). Bei Fein- und Spezialchemikalien handelt es sich meist um komplexe, oft auch »empfindliche« chemische Moleküle, die in vielschrittigen Synthesen batchweise hergestellt werden. An das Endprodukt werden hohe kunden- bzw. anwendungsspezifische Anforderungen an den Reinheitsgrad und wertgebende Eigenschaften gestellt. Bei der Einführung biotechnischer Verfahren in die chemische Industrie kamen sie zuerst im Bereich der Fein- und Spezialchemikalien zum Einsatz, haben sich dort mittlerweile fest etabliert, und eine weiter wachsende Bedeutung wird erwartet: Bis zu 50 % der Fein- und Spezialchemikalien könnten im Jahr 2025 biobasiert sein (Grimm et al. 2011).

Dass der derzeitige Schwerpunkt des Einsatzes biotechnischer Verfahren in der Chemie bei der Produktion von Fein- und Spezialchemikalien liegt, ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Sektor die spezifischen Eigenschaften biokatalytischer Verfahren, nämlich hohe Spezifität, Selektivität (insbesondere Enantioselektivität) und Aktivität bei moderaten Reaktionsbedingungen, komparative Vorteile gegenüber »herkömmlicher Synthesechemie« bieten. Dies liegt an den meist komplexen Molekülstrukturen, die konventionell durch vielschrittige Synthesen aufgebaut werden müssen, der begrenzten thermischen Stabilität, was die Ausbeute verringert, und an den oft hohen Anforderungen an die Reinheit des Produkts, was mit vielen Aufarbeitungsschritten mit hohem Einsatz an Lösungsmitteln, Salz- und Nebenprodukten einhergeht. Da die Produktprofitabilität stark von der benötigten Zeitdauer bis zur Kommerzialisierung einer neuen Fein- oder Spezialchemikalie (»time to market«) abhängt, muss das Verfahren der Herstellung innerhalb weniger Monate bis weniger Jahre ausgearbeitet werden. Deshalb kommen bei der Etablierung des Produktionsprozesses ganz überwiegend Technologien zum Einsatz, die bereits vorrätig sind bzw. in kurzer Zeit mit absehbarem Erfolg an die Problemstellung adaptiert werden können. Außerdem werden wegen der relativ kurzen Produktlebenszyklen einmal etablierte Produktionsprozesse meist beibehalten und nicht optimiert. Gleichzeitig ist die Toleranz gegenüber hohen Produktionskosten wegen der meist hohen Wertschöpfung ebenfalls hoch (Nusser et al. 2007).

**Enzyme als Produkt und als Prozesshilfsmittel****1.1.1**

Enzyme stellen eine besondere Kategorie innerhalb der Fein- und Spezialchemikalien dar, da sie zum einen »Werkzeug« für die Herstellung vieler Fein- und Spezialchemikalien sind. Zum anderen stellen sie Produkte dar, die an andere Branchen verkauft werden, denn enzymatische Verfahren spielen in der Lebensmittel- und Getränkeherstellung, bei Wasch- und Reinigungsmitteln, in der Textilveredlung, der Lederherstellung sowie der Zellstoff- und Papierherstellung eine immer größere Rolle. Damit steigt aber auch die Nachfrage nach industriellen Enzymen, die die »Werkzeuge« in diesen Prozessen darstellen.

Der weltweite Umsatz mit industriellen Enzymen ist in den letzten Jahren stetig gestiegen und wird vom Marktführer Novozymes (2015), auf knapp 4 Mrd. US-Dollar (ca. 3,5 Mrd. Euro) geschätzt. Bcc Research (2012) ermittelte 3,6 Mrd. US-Dollar (ca. 2,9 Mrd. Euro) für das Jahr 2010 und prognostizierte einen Anstieg auf ca. 6 Mrd. US-Dollar (ca. 4,8 Mrd. Euro) für das Jahr 2016. Tabelle III.1 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Segmente des Weltmarkts für industrielle Enzyme. Die industriellen Anwendungen werden in den nachfolgenden Kapiteln detaillierter beschrieben.

Tab. III.1 Weltmarktanteile der Anwendungsbereiche industrieller Enzyme 2014

Anwendungsbereich	Umsatz 2014 (Mrd. US-Dollar)	Weltmarktanteil (in %)
Wasch-, Geschirrspül- und Reinigungsmittel	1	25
Lebensmittel und Getränke	1,2	28
Biotreibstoffe (Ethanol aus Zucker/Stärke, Ethanol aus Cellulose, Biodiesel)	0,5	12
Landwirtschaft und Futtermittel	1,2	30
Textil, Leder, Zellstoff und Papier, Pharma	0,2	5
gesamt	4,1	100

Eigene Berechnungen basierend auf Angaben aus Novozymes 2015

Die größten Enzymhersteller sind das dänische Unternehmen Novozymes (ca. 47 % Marktanteil), der US-amerikanische Chemiekonzern DuPont (mit Danisco und Genencor; ca. 21 %) sowie der niederländische DSM-Konzern (ca. 6 %). 26 % des Weltmarkts entfallen auf andere Hersteller bzw. auf Enzymproduktionen für den Eigenbedarf, die nicht in den Handel gelangen (Novozymes 2015). Die Marktführer verfolgen eine Strategie, die wesentlich auf dem Ausbau der Marktposition durch innovative Enzymanwendungen sowie Produktivitätsstei-



gerungen in der Enzymproduktion fußt. Sie investieren mehr als 10% ihres Umsatzes in Forschung und Entwicklung (Frost & Sullivan 2010) mit dem Ziel, neue bzw. verbesserte enzymbasierte Lösungen für Produktions- und Veredelungsprozesse in verschiedenen Branchen anzubieten. Die größten Enzymhersteller verfügen über umfassendes Know-how auf den Wissens- und Technologiegebieten Molekularbiologie, Bioinformatik und Systembiologie, Screeningssysteme sowie Fermentation im industriellen Maßstab.

Für die Herstellung technischer Enzyme werden Pilze und Bakterien verwendet. Schätzungen zufolge wird der ganz überwiegende Teil der technischen Enzyme in gentechnisch veränderten Organismen produziert (Waegeman/Soetaert 2011), insbesondere deshalb, weil Enzymhersteller auf diese Weise die Entwicklungszeit für neue Enzymprodukte bis zur Marktreife verkürzen und die Produktivität der Enzymherstellungsprozesse steigern können.

Folgende Trends treiben die Entwicklung des Markts für industrielle Enzyme (bcc Research 2012; Frost & Sullivan 2010; Novozymes 2015):

- > steigende Nachfrage nach Konsumgütern in Schwellenländern, bei deren Herstellung Enzyme zum Einsatz kommen. Dies sind insbesondere die steigende Nachfrage nach tierischen Lebensmitteln mit entsprechendem Anstieg der Nachfrage nach Enzymen als Tierfutterzusatz, nach industriell verarbeiteten Lebensmitteln und Convenienceprodukten (Kap. III.3), nach enzymhaltigen Wasch-, Haushaltsreinigungs- und Körperpflegemitteln (Kap. III.2, Tab. III.9) sowie nach Textilien (Kap. III.4). Schwellenländer stellen die größten Wachstumsmärkte für industrielle Enzyme dar. Tabelle III.9 illustriert am Beispiel enzymhaltiger Haushaltswasch- und -reinigungsmittel sowohl das noch nicht ausgeschöpfte Marktpotenzial für industrielle Enzyme als auch die Dynamik des Marktwachstums.
- > Trend zu Biokraftstoffen, Eröffnung von acht großen Produktionsanlagen für lignocellulosebasierten Bioethanol in den USA im Jahr 2014.
- > Kosteneinsparungen und Produktivitätssteigerungen in landwirtschaftlichen und industriellen Produktionsprozessen.
- > Optimierung von industriellen Produktionsprozessen und Produkten im Hinblick auf Ressourcen- und Energieeffizienz und das Erreichen von Klimaschutz- und Kostenzielen.
- > Substitution physikalisch-chemischer Prozessschritte durch innovative enzymatische Verfahren, enzymatische Verfahren für neuartige Produkte, Steigerung der Leistungsfähigkeit von Enzymen und Senkung der Herstellkosten für Enzyme mit dem Ziel der Kostenwettbewerbsfähigkeit zu physikalisch-chemischen Prozessschritten.

Bulkchemikalien

1.2

Der Begriff »Bulkchemikalien« bezeichnet chemische Erzeugnisse, die in großen Mengen produziert und abgesetzt werden. Die Jahresproduktion liegt oberhalb von 20.000 t/Jahr, teilweise sogar im Mio.-t-Bereich. Zu den Bulkchemikalien zählen organische Grundstoffe, d.h. Petrochemikalien, die durch Kracken von fossilen Rohstoffen gewonnen werden, sowie Polymere (Kunststoffe, synthetischer Kautschuk und Chemiefasern). Petrochemikalien und Polymere machten im Jahr 2013 zusammen knapp die Hälfte des Produktionswerts der deutschen Chemieindustrie aus (VCI 2015).

Um mengenmäßig bedeutsame Effekte im Hinblick auf die Nutzung regenerativer Rohstoffe erzielen zu können, wäre die (biotechnische) Produktion biomassebasierter Bulkchemikalien wünschenswert und erforderlich. Jedoch unterscheidet sich die biotechnische Produktion von Bulkchemikalien in mehreren Punkten von der Produktion von Fein- und Spezialchemikalien und stellt deshalb eine große Herausforderung dar: Dies sind die Produktion in sehr großem Maßstab in sehr großen Mengen in eigens dafür gebauten und prozessspezifisch optimierten Anlagen, die niedrigen Produktpreise je Mengeneinheit, die viel höhere Bedeutung der Prozess- gegenüber der Produktinnovation, der Wettbewerb mit chemischen, seit Jahrzehnten optimierten Herstellprozessen. Hinzu kommt, dass die Implementierung entsprechender großtechnischer Prozesse unter Unsicherheit erfolgen muss, da sich der Implementierungsprozess über Jahrzehnte hinziehen kann.

Zwar werden seit Jahrzehnten industrielle biotechnische Prozesse wirtschaftlich erfolgreich betrieben, in denen chemische Erzeugnisse in Bulkmen- gen, teilweise im Mio.-t-Maßstab, hergestellt werden. Dabei handelt es sich bei- spielsweise um Ethanol, um die Zucker und Zuckeralkohole Glucose, Fructose, Sorbose, Sorbit, um Aminosäuren (Glutaminsäure/Glutamat, Lysin, Threonin), Vitamine (B2 u. C) und organische Säuren (z.B. Citronen-, Milch-, Essig- u. Propionsäure) (Patel et al. 2006). Diese etablierten Prozesse belegen, dass bio- technische Verfahren prinzipiell geeignet sind, kostengünstige Massenchemika- lien herzustellen. Bislang werden diese biotechnisch hergestellten Massenche- mikalien allerdings nicht in der chemischen Industrie weiterverarbeitet, denn es handelt es sich um Substanzen, die ganz überwiegend in der Futter- und Le- bensmittelindustrie und als Biokraftstoff genutzt werden. Eine Ausweitung biotechnischer Produktionsverfahren auf Bulkchemikalien in der und für die chemische Industrie macht auch andere chemische Reaktionen und neue Syn- thesewege erforderlich (Nusser et al. 2007; Ulber et al. 2011): Während es sich bei fossilen Rohstoffen um Kohlenwasserstoffverbindungen handelt, die Aus- gangsstoffe für oxidative Synthesen sind, enthält der Rohstoff Biomasse als Hauptbestandteil Kohlenhydrate, die in chemischen Reduktionsreaktionen wei-

terverarbeitet werden müssen. Dadurch können und müssen Chemikalien erschlossen werden, die in der herkömmlichen Petrochemie keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen, aber aus Biomasse einfach und in großer Menge gewonnen werden können.

Im vergangenen Jahrzehnt wurden in verschiedenen Strategieprozessen Substanzen identifiziert und bewertet, ob sie das Potenzial aufweisen, als Bulkchemikalie aus Biomasse und/oder biotechnisch hergestellt zu werden (Bozell/Petersen 2010; Fernando et al. 2006; Grimm et al. 2011; Patel et al. 2006; Wery/Petersen 2004). Die Ergebnisse sind in Tabelle III.2 zusammengefasst. Bei der Auswahl und Bewertung wurden folgende mögliche künftige Innovations- und Markteintrittsstrategien berücksichtigt:

Direkte Substitution einer Bulkpetrochemikalie (Drop-in): Eine Bulkchemikalie, die bislang aus fossilen Rohstoffen hergestellt wird, würde durch eine identische Chemikalie ersetzt, die biotechnisch bzw. aus Biomasse hergestellt wird. Beispiel: Ethylen wird aus Bioethanol statt durch Dampfreformierung von Naphtha hergestellt. Vorteile dieser als Drop-in bezeichneten Strategie bestehen darin, dass die Märkte und Kundenbeziehungen für diese Produkte bereits existieren und die Einflussfaktoren des Marktgeschehens bekannt sind, sodass die künftige Entwicklung mit geringeren Unsicherheiten abgeschätzt werden kann. Nachteilig ist, dass meist Kostenwettbewerbsfähigkeit mit den korrespondierenden Petrochemikalien erreicht werden muss. Dies ist besonders herausfordernd, da die petrochemischen Prozesse über lange Zeiträume sukzessive optimiert werden konnten und teilweise in bereits abgeschriebenen Anlagen »am goldenen Ende« produziert werden, wohingegen diese günstigen Bedingungen für biobasierte Produkte noch nicht gegeben sein können.

Funktionelle Substitution einer Bulkpetrochemikalie: Da sich Biomasse, wie bereits ausgeführt, chemisch deutlich von fossilen Rohstoffen unterscheidet, wird es bei einem Wechsel der Rohstoffbasis weder möglich noch erforderlich sein, jede bisher genutzte Petrochemikalie durch die entsprechende biobasierte Substanz zu ersetzen. Vielmehr könnten biobasierte Chemikalien an Bedeutung gewinnen, die zwar dieselbe Funktionalität liefern wie die korrespondierende Petrochemikalie, jedoch eine andere chemische Struktur aufweisen. Beispielsweise kann das biobasierte Polymer Polymilchsäure (PLA) aufgrund seiner Eigenschaften die petrochemischen Kunststoffe Polyethylenterephthalat (PET) oder Polypropylen (PP) in bestimmten Anwendungen ersetzen. Innerhalb dieser Strategie gibt es zwei Varianten: Zum einen handelt es sich bei dem Substitut um ein *etabliertes Produkt*, sodass sich eine Überdeckung mit der zuvor genannten Strategie »Direkte Substitution« ergibt. Allerdings kann das biobasierte Produkt eventuell weitere Anwendungen über die der substituierten Petrochemikalie hinaus erschließen. Die Marktrisiken sind verringert, da bereits Erfahrungswissen mit dem etablierten Produkt vorliegt. Zum anderen wird die Petro-



chemikalie funktionell durch ein *neues biobasiertes Produkt* ersetzt. Beispiele sind neue Polymere, bei denen der petrochemische Baustein der Dicarboxylsäure durch eine biobasierte Dicarboxylsäure, z.B. Bernsteinsäure, ersetzt wird. Nachteilig ist der erhebliche Zeit- und Ressourcenbedarf für die Produktions- und Marktentwicklung.

Biobasierte Plattformchemikalien: Als Plattformchemikalien werden biobasierte Chemikalien bezeichnet, die mit wenigen Prozessschritten aus Biomasse gewonnen werden können, von denen sich ganze »Produktstammbäume« von Industriechemikalien ableiten lassen (Grimm et al. 2011; Nusser et al. 2007), und die deshalb in großen Mengen für eine weitergehende Umsetzung nachgefragt werden könnten. Plattformchemikalien werden üblicherweise nach der Anzahl der Kohlenstoffatome ihres Grundgerüsts klassifiziert. Ausgehend von Stärke oder Cellulose erschließt sich direkt Glucose, ein C₆-Zucker, der beispielsweise durch Fermentation in C₂- (z.B. Ethanol), C₃- (z.B. Milchsäure, 2-Hydroxypropionsäure) oder C₄-Verbindungen (z.B. Bernsteinsäure) umgewandelt werden kann. Aus Hemicellulosen werden Pentosen wie D-Xylose und L-Arabinose gewonnen, aus denen z.B. die Plattformchemikalie Furfural hergestellt werden kann. Im Vergleich zu den vorgenannten Strategien »direkte Substitution« und »funktionelle Substitution« sind die Marktrisiken möglicherweise geringer wegen der Breite der potenziellen Produktpalette, die aus der Plattformchemikalie hergestellt werden kann. Während biotechnische Verfahren bei der Herstellung der Plattformchemikalie wegen der Umsetzung des Rohstoffs Biomasse eine wichtige Rolle spielen, dominieren bei der weitergehenden Umsetzung der Plattformchemikalie zu weiteren chemischen Erzeugnissen in der Regel chemische Verfahren. Sie eröffnen eine größere Vielfalt chemischer Veränderungen der Plattformchemikalie, als dies durch biotechnische Verfahren derzeit möglich ist.

Verwertung aller Biomassebestandteile: Die Herstellung von biobasierten Bulkchemikalien kann nur dann wirtschaftlich sein, wenn alle Bestandteile der Biomasse zu möglichst hochwertigen Produkten umgesetzt werden können. Bisherige Verfahren nutzen vor allem bestimmten Zuckerkomponenten (Hexosen) der Biomasse, während für Substanzen wie Glycerin, Pentosen wie Xylose und Arabinose, Furfural und Lignin, die in der Biomasse in großen Mengen vorkommen, Verwertungsmöglichkeiten, möglichst im Sinne von Plattformchemikalien, zusätzlich erschlossen werden müssen.

Als weitere Bewertungskriterien wurden herangezogen: Art und Anzahl der im Molekül vorhandenen funktionellen Gruppen und damit Eignung für vielfältige, nachgeschaltete Umsetzungsreaktionen; Vorkommen in verschiedenen Biomasserohstoffen; Stand von Wissenschaft und Technik. Tabelle III.2 gibt eine Übersicht über diejenigen Substanzen, denen in verschiedenen Strategieprozessen ein hohes Potenzial als biobasierte Bulkchemikalie zugemessen wurde.

Tab. III.2 Potenzial zukünftiger biobasierter Bulk- und Plattformchemikalien

Chemikalie	Anzahl der C-Atome	Bozell/Petersen (2010)	Grimm (2011)	Patel et al. (2006)	Werpy/Petersen (2004)
Ethanol	2	■		■	
Essigsäure	2				
3-Hydroxypropionsäure	3	■	■	■	■
Glycerin	3	■	■	■	■
Milchsäure	3	■	■	■	
Acrylsäure	3		■	■	
Milchsäureethylester	3 + 2		■		
Polyhydroxyalkanoat (PHA)	(3)n		■		
Polymilchsäure (PLA)	(3)n		■		
Brenztraubensäure	3		■		
1,2-Propandiol (Propylenglycol)	3		■		
1,3-Propandiol	3		■	■	
Bernsteinsäure	4	■	■	■	■
Fumarsäure/Äpfelsäure	4		■	■	
Asparaginsäure	4		■	■	
γ-Butyrolacton (GBL)/ 3-Hydroxybutyrolacton	4			■	■
Itaconsäure	4		■		■
Tetrahydrofuran	4		■		
1-Butanol	4		■	■	
1,4-Butandiol	4		■	■	
Lävulinsäure	5	■	■	■	■
Xylitol	5		■	■	■
Furfural	5	■	■	■	
Glutaminsäure	5		■	■	■
Arabinitol	5			■	■
Arabinose	5			■	
Xylose	5			■	
Sorbit	6	■	■	■	■
2,5-Furandicarboxylsäure	6	■	■	■	■
5-Hydroxymethylfurfural	6	■		■	
Adipinsäure	6		■	■	
Glucarsäure	6				■



III. Anwendungen und Produkte der IBT

Chemikalie	Anzahl der C-Atome	Bozell/Petersen (2010)	Grimm (2011)	Patel et al. (2006)	Werpy/Petersen (2004)
Saccharose	2 x 6				
Glucose	6				
Gluconsäure	6				
Isosorbid	6				
Biokohlenwasserstoffe/ Isopren	-				
Polytrimethylenterephthalat	-				

Grimm et al. (2011) bewerteten die Plattformchemikalien nach ihrem Potenzial anhand einer Farbcodierung: schwarz: hohes Potenzial; dunkelgrau: mittleres Potenzial; hellgrau: geringes Potenzial. Für die anderen drei Studien zeigt ein schwarzes Feld an, dass die jeweilige Chemikalie in der Liste der aussichtsreichen Plattformchemikalien enthalten war. Weiße Felder zeigen an, dass die jeweilige Chemikalie in der jeweiligen Studie nicht als aussichtsreiche Substanz aufgeführt wurde.

Eigene Zusammenstellung aus Bozell/Petersen 2010; Grimm et al. 2011; Patel et al. 2006; Werpy/Petersen 2004

Die Strategieprozesse weisen jedoch teilweise unterschiedliche Ergebnisse auf. Hierfür lässt sich eine Reihe von Gründen anführen. Die Bewertung einer Plattformchemikalie erfolgt jeweils auf Basis der zum Zeitpunkt der Erhebung geltenden Bedingungen, wozu Stand der Technik, Rohstoffpreise, Produktionskosten, aber auch politische Rahmenbedingungen zählen. Dies sind Faktoren, die einem schnellen Wandel unterliegen können (Bozell/Petersen 2010). Bozell/Petersen 2010 sowie Werpy/Petersen 2004) beziehen sich auf die Situation in Nordamerika, während bei Grimm et al. 2011 und Patel et al. 2006 der europäische Raum im Fokus steht. Ein Teil der Bewertungsunterschiede ist auf die unterschiedliche Rohstoffbasis zurückzuführen: In Europa kommt Rohglycerin eine große Bedeutung zu, da es als Kuppelprodukt der Biodieselproduktion anfällt und einer weiter gehenden Verwertung zugeführt werden muss. In den USA spielt hingegen die Bioethanolproduktion aus Mais und damit die Verwertung von lignocellulosehaltiger Biomasse eine größere Rolle.

Es ist Gegenstand der aktuellen FuE-Aktivitäten, für die in Tabelle III.2 aufgeführten Substanzen biotechnische Verfahren zu entwickeln und zur industriellen Produktionsreife zu bringen. Eine Charakterisierung der hierbei besonders aktiven Unternehmen und strategischen Allianzen erfolgt in Kapitel IV.2.

Tab. III.3 Produktionsanlagen für biotechnisch aus Biomasse hergestellte Bulkchemikalien (Stand 2/2015)

Anzahl C-Atome	Produkt	Betreiber	Status	Kapazität (kt/Jahr)	Standort
2	Ethen (= Ethylen) für die Herstellung von Polyethylen mit hoher Dichte wegen schwach verzweigter Molekülketten	Braskem	in Betrieb	200	Brasilien
	Bio-1,2-Ethandiol (Bio-monoethylenglycol)	Greencol Taiwan Corporation	in Betrieb	100	Taiwan
3	Bio-1,2-Ethandiol	India Glycos	in Betrieb	200	Indien
	Propen (= Propylen)	Braskem	in Betrieb	30-50	Brasilien
	Bio-1,3-Propandiol (Bio-PDO)	DuPont/Tate & Lyle/Genencor	in Betrieb	60	USA
	Bio-1,2-Propandiol (Biopropylenglycol)	Global Bio-chem Technology Group Co. Ltd.	in Betrieb	200	China
	Polymilchsäure	NatureWorks	in Betrieb	140	USA
	Polymilchsäure	Corbion Purac	in Betrieb	75	Thailand
4	Propensäure (= Acrylsäure)	Arkema	in Betrieb	45	USA
	Bernsteinsäure	Reverdia (JV DSM/Roquette)	in Betrieb	10	Italien
	Bernsteinsäure	Succinity (JV BASF/Corbion Purac)	in Betrieb	10	Spanien
	Bernsteinsäure	Myriant	Start 2015	14	USA
	Bernsteinsäure	BioAmber	Start 2015	30	Kanada
	Butanol	Shi Jinyan	in Betrieb	50	China
	1,4-Butandiol	Novamont u. Genomatica	in Betrieb	32	Italien
	Polyhydroxybutyrate	Tianjin GreenBio Materials	in Betrieb	10	China
2, 3, 4	Aceton, Butanol, Ethanol	Cathay Industrial Biotech	in Betrieb	100	China
nicht spezifiziert	Dicarbonsäure	Hanlin	in Betrieb	60	China
	Polyhydroxyalkanoate	Meredian	in Betrieb	15	USA

Eigene Recherchen in Pressemitteilungen einschlägiger Unternehmen



Um einen Eindruck zu vermitteln, welcher Stand zurzeit erreicht ist, wurde eine Übersicht über die derzeit operierenden bzw. existierende, in Kürze in Betrieb gehenden Produktionsanlagen für biotechnisch aus Biomasse hergestellte Bulkchemikalien erstellt (Tab. III.3)³. Dabei war im Zeitverlauf eine deutliche Zunahme an Vorhaben für neue Produktionsstätten zu verzeichnen. Daraus lässt sich eine erhebliche Steigerung der Produktionskapazitäten ableiten, wenn auch von niedrigem Niveau aus. Insgesamt konnten 19 Anlagen mit einer Jahreskapazität von knapp 1,4 Mio. t ermittelt werden. Aus den Angaben in Tabelle III.3 lassen sich folgende Aussagen ableiten: Mit Ethen (= Ethylen), Bio-1,2-Ethandiol (= Biomonoethylenglycol), Propen (= Propylen) sowie Bio-1,3-Propandiol (Bio-PDO) und Bio-1,2-Propandiol (= Biopropylenglycol) sind die größten Anlagenkapazitäten zurzeit bei Drop-in-Chemikalien zu verzeichnen. Unter den Chemikalien, die Petrochemikalien funktionell substituieren können, kommen derzeit der Plattformchemikalie Bernsteinsäure sowie dem biobasierten Polymer Polymilchsäure (PLA) die größte Bedeutung zu. Mit den in Betrieb befindlichen Anlagen werden Produkte bereitgestellt, die hauptsächlich zu biobasierten Polymeren, d.h. Kunststoffen und Kunstfasern, weiterverarbeitet werden. Gemessen an der gesamten Chemieproduktion sind diese Produktionskapazitäten als sehr gering einzustufen. Beispielsweise beläuft sich der Anteil der aktuell aufgebauten Produktionskapazitäten von 200 kt Bioethylen an der Weltjahresproduktion von Ethylen im Umfang von schätzungsweise 142 Mio. t (2010) lediglich auf 0,1 %.

Biobasierte Polymere: Kunststoffe und Kunstfasern

1.2.1

Im allgemeinen werden die Begriffe »Polymere« (langkettige Makromoleküle, die sich aus sich wiederholenden Einheiten, den Monomeren, zusammensetzen) und »Kunststoffe« synonym verwendet, auch wenn strenggenommen viele Naturstoffe wie Stärke, Proteine oder DNA aufgrund ihrer chemischen Struktur ebenfalls zu den Polymeren zu zählen sind. Im Folgenden werden unter Polymeren Kunststoffe und Kunstfasern verstanden.

3 Trotz sorgfältiger Recherche kann die Übersicht keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, da in Ermangelung anderer zuverlässiger Quellen Presseinformationen der Unternehmen ausgewertet werden mussten. Da sich in den letzten Jahren gezeigt hat, dass mehrere Produktionsanlagen, deren Bau angekündigt worden war, letztlich gar nicht oder mit deutlicher zeitlicher Verzögerung realisiert wurden, wurden in Tabelle III.3 keine Anlagen aufgenommen, die erst in Planung sind. Da der Schwerpunkt dieser Studie auf Chemikalien liegt, wurden zudem keine Anlagen für die Herstellung von Ethanol als Kraftstoff in die Übersicht aufgenommen. Allein in den USA wurden im Jahr 2014 8 Anlagen zur Herstellung von Ethanol aus lignocellulosehaltiger Biomasse in Betrieb genommen.



Kunststoffe und Kunstfasern stellen eine wichtige Produktparte der chemischen Industrie in Deutschland dar und machen ca. ein Viertel ihres Umsatzes aus (VCI 2015). Die Menge an Kunststoffen, die weltweit produziert wird, belief sich im Jahr 2013 auf 299 Mio. t, davon 57 Mio. t in Europa. Die wichtigsten kunststoffnachfragenden Länder in Europa waren im Jahr 2013 Deutschland (25% des Kunststoffverbrauchs in Höhe von 46 Mio. t), Italien (14%), Frankreich (10%), Großbritannien (8%), und Spanien (8%). Kunststoffe finden in nahezu allen Bereichen unseres Lebens Anwendung. In Europa ist der größte Verwendungsbereich für Kunststoffe der Verpackungssektor: Von 46,3 Mio. t Kunststoffen, die im Jahr 2013 in Europa verarbeitet wurden, entfielen 40% auf Verpackungen, gefolgt vom Bausektor (20%), dem Automobilbau (9%) sowie Elektro/Elektronik (6%) (Plastics Europe 2015).

Biobasierte Polymere stellen ein wichtiges Produktsegment der industriellen Biotechnologie und Bioökonomie dar. Üblich sind auch die Begriffe »Biokunststoff« bzw. »Bioplastik«. Beide Begriffe sind jedoch nicht eindeutig belegt. So kann sich »Bio« auf den Rohstoff (Biomasse statt fossile Rohstoffe), die Herstellungsweise (biotechnologisch statt chemisch) oder die biologische Abbaubarkeit beziehen. Ein »Biokunststoff« kann (je nach Definition) eines oder mehrere dieser Kriterien in sich vereinen (Abb. III.1). Bei biobasierten Polymeren müssen folgende Fälle unterschieden werden (Tab. III.4):

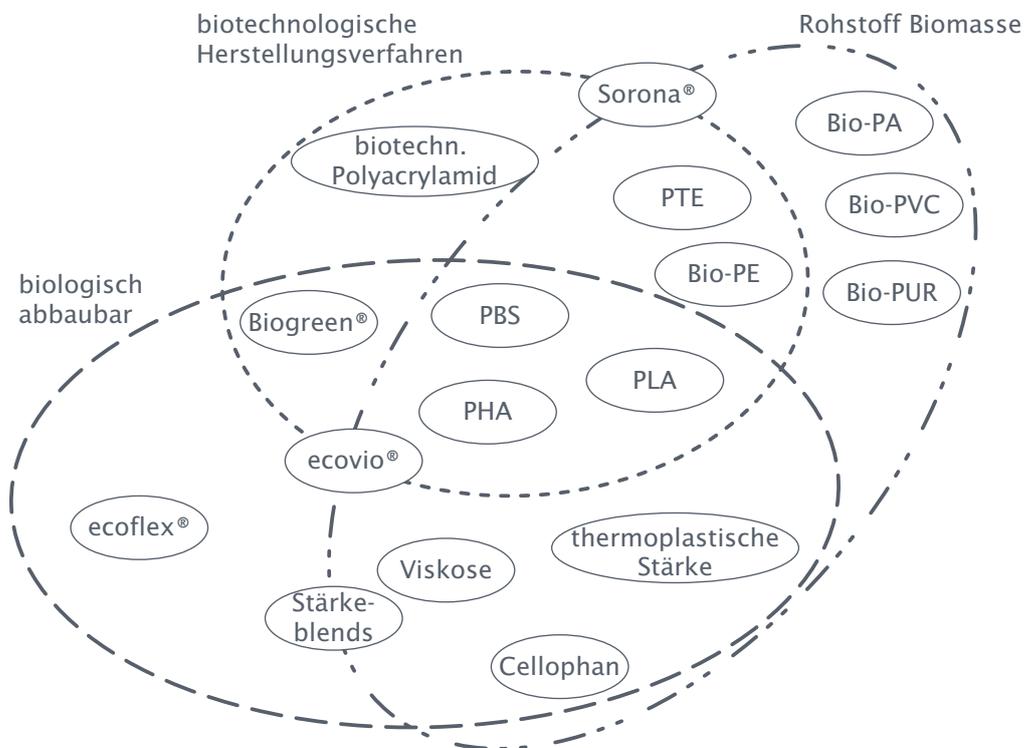
- > Das Polymer kann entweder direkt aus dem Agrarrohstoff gewonnen (z. B. Cellulose oder Stärke), oder es kann nachfolgend noch modifiziert werden, bleibt aber in seiner Grundstruktur intakt (z. B. stärke- und cellulosebasierte Kunststoffe).
- > Der Agrarrohstoff liefert die Bausteine für eine chemisch-thermische Synthese (z. B. Polyamide [PA] oder Polyurethane [PUR] aus pflanzlichen Ölen).
- > Der Agrarrohstoff dient als Kohlenstoff- und Energiequelle für eine biotechnologische (fermentative) Synthese. Dabei können wiederum zwei Fälle unterschieden werden: 1. Der biotechnologische Verfahrensschritt dient allein der Bereitstellung der monomeren Polymerbausteine, während die eigentliche Polymerisation chemisch oder thermisch erfolgt. Beispiele sind PLA und PE, 2. die Synthese des Polymers erfolgt insgesamt durch ein biotechnologisches Verfahren ausgehend von Agrarrohstoffen, beispielsweise Polyhydroxyalkanoate (PHA).

Dem Kernbereich dieses Berichts ist nur der dritte Fall (biotechnologische Verfahrensschritte im Herstellprozess) zuzuordnen. Je nach Definition werden auch Polymere, die aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden, aber biologisch abbaubar sind, als »Biokunststoffe« bezeichnet. Ein Beispiel ist das kompostierbare, petrochemische Polymer Polybutylenadipaterephthalat (Handelsname ecoflex® [BASF o. J.]).

Häufig werden sogenannte Blends aus zwei oder mehr Polymeren hergestellt, um durch geeignete Mischungen die für eine bestimmte Anwendung gewünschten Materialeigenschaften zu erhalten. So werden auch biobasierte Kunststoffe zunehmend mit Polymeren aus fossilen Rohstoffen gemischt. Ein Beispiel sind Stärkeblends. Außerdem gibt es auch Polymere, die sich aus petrochemischen und biobasierten Bausteinen zusammensetzen. Beispiele hierfür sind Biopolyethylenterephthalat (Bio-PET 30) oder Polytrimethylterephthalat (PTT), bei denen die Alkoholkomponente biotechnisch aus Biomasse hergestellt wird, während der Terephthalatbaustein aus fossilen Rohstoffen stammt.

Abb. III.1

Biokunststoffe



Im allgemeinen Sprachgebrauch umfasst der Begriff Biokunststoff Polymere, die ganz oder teilweise auf Biomasse als Rohstoff zurückgehen, bei deren Herstellung biotechnologische Verfahren eingesetzt wurden oder die biologisch abbaubar sind. Die dargestellten Beispiele wurden entsprechend ihrer Eigenschaften diesen drei Gruppen zugeordnet. Erläuterungen finden sich im Text.

PHA: Polyhydroxyalkanoate; PBS: Polybutylensuccinat; PLA: Polymilchsäure; PTE: thermoplastisches Elastomer, Bio-PE: biobasiertes Polyethylen; Bio-PA: biobasiertes Polyamid; Bio-PVC: biobasiertes Polyvinylchlorid; Bio-PUR: biobasiertes Polyurethan; ecoflex®: Handelsname für Polybutylenadipaterephthalat; ecovio®: Handelsname für Blend aus Polybutylenadipaterephthalat und Polymilchsäure (PLA); Biogreen®: Handelsname für Polyhydroxyalkanoate aus fossilen Substraten

Eigene Darstellung

Tab. III.4 Übersicht über das Gesamtgebiet der Biokunststoffe

Rohstoff	Verwendung für	Verarbeitungsprozesse	biologische Abbaubarkeit	Beispiele
pflanzliche Biomasse (biobasiert)	direkte Gewinnung des Polymers	thermisch, chemisch, Polymerstruktur bleibt intakt	+	thermoplastische Stärke, Cellophan, Viskose
	Gewinnung von Bausteinen/Vorstufen für die chemische Synthese	chemische Synthese der Bausteine und Polymerisation	+/-	Bio-PUR, Bio-PA
	Ausgangsmaterial (C- und Energiequelle) für biotechnologische Synthese	biotechnologische Synthese der Bausteine (Fermentation), Polymerisation chemisch	+/-	PLA aus Milchsäure; PE aus Bioethanol
fossile Rohstoffe	Gewinnung von Bausteinen	chemischer Prozess	+	ecoflex®
	Ausgangsmaterial für biotechnologische Synthese	biotechnologische Verfahrensschritte	+/-	Polyacrylamid aus biotechnologisch produziertem Acrylamid, Biogreen® (PHA aus Erdgas)
biobasiert und fossil	fermentative Gewinnung von Bausteinen aus pflanzlicher Biomasse, chemische Synthese von Bausteinen aus fossilen Rohstoffen	chemische Polymerisation zu Kopolymer aus fossilen und biobasierten Bausteinen	+/-	Sorona™ (Copolymer als Bio-1,3-PDO und fossiler Terephthalsäure, nicht biologisch abbaubar)

Eigene Darstellung

Technologie- und Marktentwicklung global

Wegen der uneinheitlich gebrauchten Begrifflichkeiten sowie der unterschiedlichen Möglichkeiten, Biopolymere zu definieren und abzugrenzen, liefert eine



Sekundäranalyse von einschlägigen Marktstudien (Carus et al. 2013; European Bioplastics o.J.; FNR 2014c; Frost & Sullivan 2011a; ki Kunststoff Information 2011 u. 2012; Shen et al. 2009) kaum vergleichbare Zahlen. Um dennoch einen Eindruck von der aktuellen Marktsituation und der künftigen Marktentwicklung zu geben, werden im Folgenden eine Auswertung und Interpretation von in sich konsistenten Marktzahlen dargestellt, die vom Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe der Hochschule Hannover erhoben und unter Offenlegung der Erhebungs- und Berechnungsmethodik auf dem Informationsportal Biopolymerplattform veröffentlicht werden (IfBB 2015). Zudem wurden mit derselben Methodik Daten für Deutschland ermittelt (FNR 2014c). Einschränkend ist darauf hinzuweisen, dass in den Daten des IfBB auch Biokunststoffe enthalten sind, die nicht in den Kernbereich dieses Berichts fallen, aber aus den aggregierten Marktzahlen nicht nachträglich herausgerechnet werden können. Dies sind biomassebasierte Polymere ohne biotechnische Verfahrensschritte im Herstellprozess (bioabbaubare Biokunststoffe auf Stärke- bzw. Cellulosebasis sowie Biopolyurethane, Biopolycarbonat und (teilweise) Biopolyamide sowie biologisch abbaubaren Polymere auf petrochemischer Basis (PBAT, PCL)). Soweit zuordenbar, sind diese nicht in die in diesem Bericht verwendete Abgrenzung fallenden Polymere in den folgenden Tabellen entsprechend gekennzeichnet. Die globale Situation im Jahr 2013 lässt sich folgendermaßen charakterisieren:

- › Produktionskapazität: Im Jahr 2013 belief sich die weltweite Produktionskapazität für Biokunststoffe auf 1,622 Mio. t. Darin enthalten sind Produktionskapazitäten für Biokunststoffe mit biotechnischen Verfahrensschritten im Umfang von rund 1,4 Mio. t, was 75 % der weltweiten Produktionskapazität für Biokunststoffe entspricht (Tab. III.5). Die Weltproduktion für Kunststoffe wird mit 299 Mio. t für das Jahr 2013 angegeben (Plastics Europe 2015). Wenn auch Produktionskapazitäten und Produktionsmengen nicht direkt vergleichbar sind, lässt sich aus diesen Zahlen doch abschätzen, dass sich der Anteil der Biokunststoffe an allen Kunststoffen auf ca. 0,5 % belaufen dürfte.
- › Marktgröße: Unter Zugrundelegung durchschnittlicher Marktpreise für die jeweiligen Biokunststoffe lässt sich für die Produktionskapazität von 1,622 Mio. t ein Marktvolumen von 5,8 Mrd. Euro im Jahr 2013 errechnen.
- › Marktsegmente: 38 % der weltweiten Produktionskapazitäten für Biokunststoffe im Jahr 2013 entfielen auf biologisch abbaubare Biokunststoffe, 62 % auf beständige Biokunststoffe.
- › Marktsegmente nach Art der Biokunststoffe: Unter den Biokunststoffen mit biotechnischen Verfahrensschritten im Herstellprozess entfielen im Jahr 2013 mit 600 kt die größten Produktionskapazitäten auf Bio-PET 30, gefolgt von Bio-PE (200 kt), PLA (185 kt), PTT (110 kt) und PHA (75 kt). Zudem steuerten die Gruppen bioabbaubare Polyester mit 175 kt sowie Biopolya-

mide mit 79 kt signifikante Produktionskapazitäten bei, jedoch wird nur ein (nichtherausrechenbarer) Anteil der in diesen Gruppen enthaltenen Biopolymere mit biotechnischen Verfahrensschritten hergestellt (Tab. III.5).

- › Bedeutung der Drop-ins: Mit Bio-PET 30, Bio-PE, PTT, Bio-PA und einem Teil der bioabbaubaren Polyester (z.B. PBS) entfällt von den Biokunststoffen mit biotechnischen Verfahrensschritten eine Produktionskapazität von ca. 1,1 Mio. t auf Drop-ins, was auf die aktuell hohe Bedeutung dieser – risikomindernden – Markterschließungsstrategie hinweist (Tab. III.5).

Tab. III.5 Globale Produktionskapazitäten für Biokunststoffe 2013 und 2018 (Prognose)

Biokunststoff	biotechnischer Verfahrens- schritt	Drop- in	globale Produktionskapazität			
			2013		2018	
			in kt	in %	in kt	in %
gesamt			1.622	100	6.731	100
Biopolyethylenterephthalat 30 (Bio-PET 30)	x	x	600	37	5.000	74
Biopolyethylen (Bio-PE)	x	x	200	12	202	3
Polytrimethylenterephthalat (PTT)	x	x	110	7	108	2
Biopolyamid (Bio-PA)	x	x	79	5	101	2
Polymilchsäure (PLA)	x		185	11	438	7
Polyhydroxyalkanoate (PHA)	x		34	2	74	1
Biopolyvinylchlorid (Bio-PVC)	x	x	0	0	81	1
Polyethylenfuranoat	x		0	0	47	1
Biopolypropylen (Bio-PP)	x	x	0	0	27	0,4
bioabbaubare Polyester	teilweise		175	11	370	6
bioabbaubare Stärkeblends			183	11	209	3
beständige Stärkeblends			11	1	13	0,2
Celluloseregenerat			28	2	27	0,4
Cellulosederivate			5	0,3	7	0,1
biothermoplastisches Elastomer (Bio-TPE)		x	3	0,2	3	0,0
Biopolycarbonat (Bio-PC)			5	0,3	20	0,3
Biopolyurethan (Bio-PUR)			2	0,1	2	0,0

Eigene Auswertung der Daten auf IfBB 2015



- › Anwendungen der Biokunststoffe: 2013 waren zwei Drittel der weltweiten Produktionskapazität für Biokunststoffe auf die Herstellung von Biokunststoffen für Verpackungen ausgerichtet, gefolgt von Biokunststoffen für Textilanwendungen (z.B. PLA, PTT), für Konsumgüter (hierunter fallen beispielsweise Sport- und Freizeitausrüstungen, Spielzeuge, Kugelschreiber), für Landwirtschaft und Gartenbau (z.B. Folien, Pflanztöpfe) sowie den Automobilbau (Tab. III.6). Damit unterscheidet sich das Spektrum der Anwendungen von Biokunststoffen zurzeit deutlich von dem der (petrochemischen) Kunststoffe: Bei den petrochemischen Kunststoffen sind die bedeutendsten Anwendungsbereiche Verpackungen (40% des Kunststoffverbrauchs von insgesamt 46,3 Mio. t in Europa), gefolgt von der Bauwirtschaft (20%), dem Automobilbau (9%), Elektro- und Elektronikanwendungen (6%) sowie Landwirtschaft (4%) (Plastics Europe 2015). Die Unterschiede in den Anwendungsbereichen sind wesentlich darauf zurückzuführen, dass durch Biokunststoffe zunächst Anwendungen (z.B. Verpackungen, Landwirtschaft) erschlossen wurden, bei denen die Bioabbaubarkeit wesentliches Kriterium für ihren Einsatz ist. Petrochemiebasierte Polymere adressieren hingegen Märkte, in denen vor allem beständige Kunststoffe benötigt werden. Es ist zu erwarten, dass sich die Anwendungsbereiche beider Kunststoffgruppen mit der zunehmenden Bedeutung beständiger Biokunststoffe einander angleichen werden.

Produktionskapazitäten und Marktgrößen für Biokunststoffe werden in den kommenden fünf Jahren wachsen. Für das Jahr 2018 lassen sich die folgenden Entwicklungen aus den IfBB-Zahlen ableiten:

- › Produktionskapazität: 2018 wird ein erheblicher Anstieg der Produktionskapazität für Biokunststoffe von 1,6 Mio t (2013) auf 6,7 Mio. t erwartet (Tab. III.5), vor allem durch Anlagen in Asien, gefolgt von Südamerika.
- › Marktgröße: Aus dem Ausbau der Produktionskapazität lässt sich für das Jahr 2018 eine Marktgröße von 17,4 Mrd. Euro errechnen.
- › Marktsegmente: Der prognostizierte Anstieg der Produktionskapazitäten wird vor allem auf einem Ausbau von Produktionskapazitäten für beständige Biokunststoffe beruhen, deren Anteil an den Produktionskapazitäten von 62% (2013) auf 83% (2018) ansteigen soll. Dementsprechend wird der Anteil bioabbaubarer Kunststoffe an den Biokunststoffproduktionskapazitäten sinken (von 38% [2013] auf 17% [2018]).
- › Marktsegmente nach Art der Biokunststoffe: Der Ausbau der Produktionskapazitäten beruht vor allem auf der Ausweitung der Produktion für Bio-

PET 30⁴, gefolgt von PLA und bioabbaubaren Polyestern (u. a. mit Bernsteinsäuremonomeren). Außerdem werden einige neue Biokunststoffe auf den Markt kommen: die Drop-ins Bio-PVC und Bio-PP sowie PEF (Tab. III.5).

- Anwendungen der Biokunststoffe: Bedingt dadurch, dass aus heutiger Sicht die Entwicklung bis 2018 wesentlich durch den Ausbau der Produktionskapazitäten für Bio-PET 30 geprägt werden und dieser Biokunststoff für die Herstellung von Flaschen verwendet wird, wird der Anteil der weltweiten Produktionskapazitäten für Biokunststoffe für Verpackungen von 67 % (2013) auf 81 % (2018) steigen (Tab. III.6).

Tab. III.6 Globale Produktionskapazitäten für Biokunststoffe 2013 und 2018 (Prognose), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen der Biokunststoffe

Anwendungsbereich	Produktionskapazität			
	2013		2018	
	in kt	in %	in kt	in %
gesamt	1.622	100	6.731	100
Verpackungen	1.092	67	5.430	81
Textilien	167	10	449	7
Konsumgüter	103	6	185	3
Landwirtschaft und Gartenbau	89	5	142	2
Automobil und Transport	85	5	337	5
Bauwirtschaft	16	1	36	1
Elektro, Elektronik	5	0,3	19	0,3
andere	64	4	133	2

Eigene Auswertung der Daten auf IfBB 2015

Technologie- und Marktentwicklung in Deutschland

Die Situation in Deutschland lässt sich folgendermaßen charakterisieren (FNR 2014c; Tab. III.7 u. III.8):

- Produktionskapazität: Für das Jahr 2011 wurde in Deutschland eine Produktionskapazität für Biokunststoffe von 79.000 t ermittelt.
- Marktgröße: Die Marktgröße wurde für 2010 auf 400 Mio. Euro geschätzt.

⁴ 2012 kündigte die Firma Coca-Cola an, bis zum Jahr 2016 ca. 4,6 Mio. t Bio-PET 30 für Getränkeflaschen zu verwenden (FNR 2014c)



III. Anwendungen und Produkte der IBT

Tab. III.7 Produktionskapazitäten für Biokunststoffe in Deutschland (2011)

	Produktionskapazität	
	in t/Jahr	in %
gesamt	79.000	100
bioabbaubar	66.500	84
Stärkeblends, thermoplastische Stärke	41.230	52
PLA-Blends	19.950	25
Cellulosederivate	5.320	7
beständig	12.200	15
Biopolyamid (Bio-PA)	11.200	14
Biopolyurethan (Bio-PUR)	1.000	1
Anwendungsbereiche		
Verpackungen	30.000	38
Konsumgüter	8.000	10
Landwirtschaft und Gartenbau	9.500	12
Catering	11.000	14
Technik (Automobil, Elektro/Elektronik)	20.500	26

Eigene Zusammenstellung von Daten aus FNR 2014c

Tab. III.8 Marktgrößen für Biokunststoffe in Deutschland (2011)

	Marktgröße	
	in Mio. Euro	in %
gesamt	400	100
bioabbaubar	292	73
Stärkeblends, thermoplastische Stärke	164	41
PLA-Blends	104	26
Cellulosederivate	24	6
beständig	108	27
Biopolyamid (Bio-PA)	96	24
Biopolyurethan (Bio-PUR)	12	3
Anwendungsbereiche		
Verpackungen	96	24
Konsumgüter	36	9
Landwirtschaft und Gartenbau	40	10
Automobil, Transport	96	24
andere	132	33

Eigene Zusammenstellung von Daten aus FNR 2014c



- Marktsegmente: Der Anteil bioabbaubarer Biokunststoffe an den Produktionskapazitäten lag 2011 bei 84 % (66.500 t), am Marktvolumen bei 73 % (292 Mio. Euro). Produktionskapazitäten für beständige Biokunststoffe beliefen sich auf 12.200 t (15 %), die Marktgröße auf 108 Mio. Euro (27 %).
- Marktsegmente nach Art der Biokunststoffe: Bei den biologisch abbaubaren Biokunststoffen entfiel im Jahr 2011 der größte Teil der Produktionskapazitäten auf Stärkeblends und thermoplastische Stärke (62 %), gefolgt von Polymilchsäureblends (30 %) und Cellulosederivate (8 %). Bei den beständigen Biokunststoffen wurden die Produktionskapazitäten ganz überwiegend zur Herstellung von Biopolyamiden (92 %) genutzt sowie zur Produktion von Biopolyurethanen (8 %).
- Anwendungen der Biokunststoffe: 2010 wurden in den Produktionsanlagen in Deutschland ganz überwiegend Biokunststoffe für Verpackungen hergestellt (38 %), gefolgt von Biokunststoffen für technische Anwendungen (26 %, z.B. elektronische Geräte, Automobilbau) sowie zu etwa gleichen Anteilen für Landwirtschaft und Gartenbau (12 %), Catering (14 %) und Konsumgüter (10 %).
- Wettbewerbsposition Deutschlands: In Deutschland gibt es etwa 20 Hersteller von Biokunststoffen, darunter sowohl international agierende Chemiekonzerne als auch mittelständische Unternehmen. Deutschland wird aktuell und künftig als Produktionsstandort für Biokunststoffe zwar nur eine untergeordnete Bedeutung zugewiesen. Deutschland wird jedoch bei Forschung, Entwicklung, Verarbeitung und Anwendung von Biokunststoffen eine international bedeutende Rolle zugemessen wegen des umfassenden technischen Kunststoff-Know-hows in der chemischen Industrie, einem gut entwickelten Kunststoffmaschinenbau, zahlreichen mittelständischen Kunststoffverarbeitern sowie potenziell großen Absatzmärkten, z.B. im Automobilbau, der Bauwirtschaft und im Verpackungsbereich (FNR 2014c).

Entwicklungstrends und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die Produktionskapazitäten für Biokunststoffe sowie die korrespondierenden Marktgrößen – von niedrigem Niveau aus – in den letzten Jahren deutlich gewachsen sind. Hierbei ist eine stetige Zunahme der Anzahl und Vielfalt an Biokunststoffen, Biokunststoffherstellern sowie daraus hergestellten Produkten und Anwendungen zu verzeichnen. Hierzu haben die kontinuierliche Verbesserung der Qualität der Biokunststoffe sowie die bessere Verfügbarkeit materialtechnischer Informationen wesentlich beigetragen. Trotz dieser positiven Entwicklung werden Biokunststoffe – gemessen an der Gesamtkunststoffproduktion – noch auf Jahre ein Nischendasein führen. Derzeit liegt ihr Anteil unter 1 %.



Stand Ende der 1980er Jahre bei der Biokunststoffentwicklung die Eigenschaft der biologischen Abbaubarkeit im Vordergrund, so hat sich der Schwerpunkt in den letzten Jahren von den bioabbaubaren zu den beständigen Biokunststoffen verlagert. Das künftige Marktwachstum wird ganz wesentlich von den beständigen Biokunststoffen bestimmt werden, nicht zuletzt deshalb, weil sie es ermöglichen werden, neue Anwendungsbereiche für Biokunststoffe über den Verpackungssektor hinaus zu erschließen: dies sind insbesondere der Automobilbau, die Bauwirtschaft sowie Konsumgüter.

Bei den beständigen Biokunststoffen dominieren zurzeit die sogenannten Drop-ins, d.h. biobasierte Kunststoffe, die die gleiche chemische Struktur und gleiche Material-, Verarbeitungs- und Entsorgungseigenschaften wie petrochemische, am Markt etablierte Massenkunststoffe aufweisen, jedoch aus Biomasse als Rohstoff hergestellt wurden.

Zurzeit ist erst bei wenigen Biokunststoffen (PLA, Bio-PE, Bio-PET) Kostenvorteilhaftigkeit mit petrochemischen Kunststoffen erreicht bzw. absehbar. Durch weitere Prozessverbesserungen, Steigerung der Ausbeute und durch Skaleneffekte in größeren Produktionsanlagen wird sich die Preisdifferenz zwischen Biokunststoffen und petrochemischen Kunststoffen in den kommenden Jahren voraussichtlich verkleinern lassen. Produktionsstandorte für Biokunststoffe werden vor allem in Asien und Südamerika aufgebaut, Deutschland und Europa wird eine wichtige Rolle bei der Entwicklung, Verarbeitung und Anwendung von Biokunststoffen zugemessen.

In materialtechnischer Hinsicht werden sich die Grenzen zwischen den früher klar getrennten Bereichen der Biokunststoffe einerseits und der petrochemischen Kunststoffe andererseits zunehmend verwischen, da naturfaserverstärkte petrochemische Kunststoffe, Chemiefaser-verstärkte Biocomposite sowie petrochemische Kunststoffe mit biobasierten Anteilen (z.B. Bio-PET 30) an Bedeutung gewinnen.

Körperpflege, Wasch- und Reinigungsmittel

2.

Die Herstellung von Wasch- und Reinigungsmitteln, Körperpflegemitteln und Kosmetika ist der chemischen Industrie zuzuordnen. Ihr Anteil an der Chemieproduktion in Deutschland beläuft sich auf rund 8 % (IKW 2015). Sie wird im Rahmen dieses Berichts gesondert betrachtet, weil das Innovationsgeschehen nicht nur von den für Fein-, Spezial-, und Bulkchemikalien dargelegten Faktoren beeinflusst wird (Kap. III.1). Im Unterschied zur sonstigen chemischen Industrie werden in diesem Teilssektor insbesondere Produkte für den Endverbraucher hergestellt. Zudem bestehen Bezüge zum Wellness- und Gesundheitssektor.



Im Jahr 2013 waren rund 450 Unternehmen mit 45.000 Beschäftigten Mitglied im Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e.V. (IKW), davon waren 123 Unternehmen Hersteller von Wasch- und Reinigungsmitteln, 296 produzierten Waren der Kosmetikindustrie, 27 Unternehmen waren beiden Bereichen zuzuordnen. Neben international agierenden Konsumgüterherstellern wie Henkel, Beiersdorf, L'Oréal, Johnson & Johnson, Unilever oder Procter & Gamble sind viele kleinere, häufig spezialisierte Unternehmen in diesem Bereich aktiv. Der Umsatz zu Endverbraucherpreisen belief sich 2013 auf 17,2 Mrd. Euro, wovon etwa drei Viertel mit Schönheitspflegeprodukten und ein Viertel mit Haushaltspflegeprodukten erwirtschaftet wurde (IKW 2015).

Zu den Schönheitspflegeprodukten gehören Haar-, Haut- und Körperpflegeprodukte (z.B. Seifen, Shampoos, Badezusätze, Deodorantien, Zahnpflegemittel und Rasierpflegemittel) sowie dekorative Kosmetik. Die Angebotspalette reicht von der Deckung von Grundbedürfnissen (z.B. Zahnpasta) über spezialisierte Produkte für bestimmte Zielgruppen (z.B. Anti-Aging-Produkte, Haarwuchsmittel) bis zu Luxusprodukten im Hochpreissegment. Neben Produktqualität und Preis spielen Markenimage und Design bei bestimmten Produktgruppen eine zentrale Rolle und erlauben hohe Gewinnmargen. Zu den Haushaltspflegemitteln werden Textilwaschmittel, Geschirrspülmittel sowie Reinigungsmittel für Haushalt und Auto gezählt (IKW 2015).

Schönheitspflegemittel

In der Kosmetikindustrie kommt traditionell eine Vielzahl an pflanzlichen Inhaltsstoffen zum Einsatz. Neben Trägerstoffen und Lösungsmitteln (z.B. Pflanzenöle), die für die Textur des Produktes verantwortlich sind, werden auch viele Wirkstoffe in Kosmetikprodukten aus Pflanzen gewonnen. Ebenso wie in der Pharmaindustrie zeichnet sich in den letzten Jahren ein Trend ab, Substanzen, deren Extraktion und Aufreinigung aus den natürlichen Quellen aufwendig und kostenintensiv ist, mit biotechnologischen Methoden in Mikroorganismen, in humanen oder pflanzlichen Zellkulturen herzustellen (Reisch 2011).

Mit dem Ziel der Produktentwicklung wird auch biologische Grundlagenforschung zu grundsätzlichen Fragen, beispielsweise dem Prozess der Hautalterung, betrieben. Seit einigen Jahren werden Kosmetika auf dem Markt angeboten, die bei Anwendung gezielt die Genexpression verändern sollen, beispielsweise »Reparaturgene einschalten«. Außerdem erhofft sich die Branche Erkenntnisse und Produkte aus der Stammzellforschung. Es befinden sich Produkte in der Entwicklung, die Extrakte aus pluripotenten Stammzellen aus Pflanzen oder kultivierten Placentazellen enthalten, denen die Kapazität zugeschrieben wird, die Regeneration von Hautzellen zu beschleunigen (Rinaldi 2008). 2011 wurde in den USA eine Zelltherapie auf Basis kundeneigener Zellen



für kosmetische Anwendungen zugelassen (Schmidt 2011). Insgesamt gibt es in diesem Anwendungsbereich fließende Übergänge zwischen kosmetischen und medizinischen Anwendungen. Innerhalb der Kosmetik stellen diese sogenannten »Cosmeceuticals« ein überdurchschnittlich wachsendes Marktsegment dar (Brandt et al. 2011). Einige Beispiele für biotechnologisch hergestellte Kosmetikinhaltsstoffe sind:

Vitamine: Vielen Kosmetikprodukten werden Vitamine zugesetzt, die fermentativ mit Mikroorganismen hergestellt werden,

Enzyme: Beispiele für den Einsatz von Enzymen in Kosmetikprodukten sind (Aehle 2007):

- › Haarfärbung: Der Einsatz von Enzymen verspricht mildere Bedingungen als konventionelle Haarcolorationen oder Blondierungen, die Wasserstoffperoxid (H_2O_2) enthalten. Zudem könnten Enzyme den Ergrauungsprozess der Haare verzögern. Aufgrund der hohen Anzahl an Patentanmeldungen durch große Haarkosmetikhersteller wie L’Oreal, Wella, Lion, Henkel oder Kao lässt sich vermuten, dass die Branche die Entwicklung von enzymhaltigen Haarfärbemitteln intensiv verfolgt.
- › Sonnenschutz- und After-Sun-Produkte: Das Enzym Photolyase aus Algen kann DNA-Schäden nach UV-Bestrahlung reparieren und wird in einigen Sonnencremes und After-Sun-Produkten verwendet.
- › Peelings: Proteasen, beispielsweise Papain oder Bromelain, werden in Hautpeelings eingesetzt. Sie bauen Proteine in der Hornschicht der Haut ab und setzen auf diese Weise tote Hautzellen frei.
- › Zahnpflegeprodukte: Zahnpasten, die Enzyme enthalten, welche auch im Speichel vorkommen, versprechen eine verbesserte antibakterielle Schutzfunktion des Speichels.

Inhaltsstoffe, die gezielt die Genexpression beeinflussen sollen: BioLysat (L’Oreal, Paris) enthält hydrolysierte Bifidusbakterien, die die Expression von »Reparaturgenen« in der Haut stimulieren sollen (Reisch 2011).

Kosmetische Produkte selbst unterliegen keiner Zulassungspflicht (wie beispielsweise Pharmazeutika), jedoch müssen bestimmte Inhaltsstoffe wie Konservierungsstoffe, Farbstoffe oder UV-Filter zugelassen werden (BfR o.J.). Die Hersteller müssen aber die Unbedenklichkeit der Produkte durch Sicherheitsbewertungen garantieren. Gemäß der Richtlinie 76/768/EWG sind Tierversuche für gebrauchsfertige Kosmetika in der EU seit 2004 verboten, seit 2009 gilt dieses Verbot auch für die einzelnen Bestandteile kosmetischer Mittel. Außerdem dürfen kosmetische Mittel, deren Bestandteile in Tierversuchen getestet wurden, unabhängig vom Ort der Durchführung der Tierversuche seit 2013 in der EU nicht mehr in Verkehr gebracht werden. Daher kommt Ersatz- und Ergänzungsmethoden zu Tierversuchen in der Körperpflege- und Waschmittelindust-

rie eine große Bedeutung zu, um die Unbedenklichkeit der Kosmetika gewährleisten zu können. Hierzu liefern Zellkulturtechniken, Stammzellforschung sowie *Tissue Engineering* wichtige Beiträge (Spielmann et al. 2012).

Wasch- und Reinigungsmittel

Wasch- und Reinigungsmittel, die in Haushalt und Industrie genutzt werden, sind das größte Segment im Markt für technische Enzyme (Kap. III.1.1). In Haushaltswaschmitteln haben sich Enzyme seit den 1960er Jahren flächendeckend durchgesetzt. Der Einsatz von Enzymen in Spülmaschinenreinigern ist heute Stand der Technik. Außerdem werden Enzyme und/oder Mikroorganismen in biologischen Abflussreinigern eingesetzt.

Die wichtigsten Enzyme, die in Wasch- und Reinigungsmitteln eingesetzt werden, sind hydrolytische Enzyme (Hydrolasen): Proteasen, Amylasen, Lipasen, Cellulasen und Mannasen. Enzyme verbessern die Reinigungsleistung von Wasch- und Reinigungsmitteln, indem sie eine unspezifische Hydrolyse der Schmutzstoffe katalysieren, d.h. hochmolekulare Bestandteile der Verschmutzungen – Proteine, Fette und Polysaccharide – zu niedermolekularen Komponenten abbauen, welche sich dann leicht von der verschmutzten Oberfläche lösen (Aehle 2007).

Enzymhersteller bieten heutzutage ein großes Portfolio an maßgeschneiderten Enzymen für den Einsatz in Wasch- und Reinigungsmitteln an, um der Vielfalt der möglichen Verschmutzungen von Textilien bzw. Geschirr gerecht zu werden. Moderne Waschmittel enthalten Mischungen verschiedener Hydrolasen, in der Regel mindestens zwei und bis zu acht verschiedene Enzyme in einem Produkt. Der Gehalt enzymhaltigen Granulats im Waschmittel liegt bei 0,2 bis 2% (Rähse 2012), wobei es neben produktspezifischen Unterschieden in der Waschmittelrezeptur noch große regionale Unterschiede gibt, um den regional unterschiedlichen Waschprozessen und -gewohnheiten in Bezug auf Häufigkeit, Waschtemperatur, bevorzugte Waschprogramme sowie auf die technischen Spezifikationen der verwendeten Waschmaschinen Rechnung zu tragen. Der Anteil der Enzymkosten an den gesamten Rohstoffkosten von Waschmitteln beläuft sich auf etwa 3 bis 5% (Hede 2014; Rähse 2012).

Mitte der 1960er Jahre kamen die ersten enzymhaltigen Waschmittel in den Handel. Seitdem sind folgende Entwicklungen zu verzeichnen (Hede 2014; Rähse 2012):

Erweiterung des Spektrums der in Waschmitteln eingesetzten Enzyme: Nachdem die ersten enzymhaltigen Waschmittel Mitte der 1960er Jahre lediglich Proteasen zur besseren Entfernung eiweißhaltiger Flecken (z.B. Blutflecken) enthielten, wurden 1972 Amylasen zum Abbau stärkehaltiger Verschmutzun-



gen eingeführt. 1986 hatten Cellulasen die Marktreife erlangt, 1988 Lipasen, gefolgt von Mannanasen.

Erweiterung der Funktionen von Enzymen in Waschmitteln: Mit der Erweiterung des Spektrums der in Waschmitteln eingesetzten Enzyme ging auch eine Erweiterung der Funktionen einher, die Enzyme in den Waschmitteln erfüllen. Während Proteasen, Amylasen und Lipasen der Entfernung von unterschiedlichen Anschmutzungen dienen, werden Cellulasen eingesetzt, um das »Vergrauen« von Textilien zu verhindern und Farbe bzw. Weißgrad der Gewebe zu erhalten, indem sie verhindern, dass im Waschprozess Ablagerungen auf dem Gewebe entstehen. Zudem können sie durch den Abbau von aus dem Gewebe herausstehenden Mikrofibrillen die Knötchen- und Pillingbildung reduzieren und damit hinauszögern, dass Textilien abgetragen aussehen. Darüber hinaus ermöglichen spezifisch optimierte Enzyme die Volumenreduktion von Waschmitteln (Kompaktwaschmittel). Enzyme tragen zur Substitution von Waschmittelinhaltsstoffen bei, insbesondere von Phosphaten, die aus ökologischen Gründen unerwünscht sind, und sie ermöglichen Wasser- und Energieeinsparungen im Reinigungsprozess.

Erweiterung des Spektrums der Wasch- und Reinigungsmittel, in denen Enzyme eingesetzt werden: Enzyme werden primär in Voll- und Colorwaschmitteln, teilweise auch in Feinwaschmitteln eingesetzt. Seit 1975 werden nicht nur enzymhaltige Waschmittel in Pulver- bzw. Tablettenform angeboten, sondern auch enzymhaltige Flüssigwaschmittel. Die zweitwichtigste Anwendung sind Haushaltsgeschirrspülmittel. Der Durchdringungsgrad für enzymhaltige Geschirrspülmittel ist in Europa am höchsten, gefolgt von den USA (Tab. III.9). Enzymhaltige Wasch- und Geschirrspülmittel werden hingegen nur selten in Großwäschereien oder in Industriespülmaschinen verwendet, wie sie in Großküchen und Restaurants eingesetzt werden. In diesen Bereichen werden hohe Anforderungen an die Reinigungswirkung bei sehr kurzen Waschzeiten gestellt. Deshalb kommen üblicherweise aggressive Chemikalien zum Einsatz, deren Kompatibilität mit Enzymen gering ist. Eine Nische für enzymhaltige Industriewaschmittel ist die Reinigung von Wäsche mit Blutflecken, die beispielsweise in Schlachthäusern oder Krankenhäusern anfällt.

Optimierung der Enzyme: Voraussetzung für die zuvor skizzierten Entwicklungstrends waren die Identifizierung neuer Enzyme sowie die Optimierung bekannter Enzyme mithilfe der in Kapitel II.3 beschriebenen Techniken. Dabei werden folgende Optimierungsziele verfolgt:

- > kosteneffiziente Herstellverfahren für die Enzyme in großem Maßstab;
- > hohe (unspezifische) Aktivität gegenüber Schmutzstoffen;
- > Erhalt gleichbleibend hoher Aktivität (Stabilität) der Enzyme sowohl in pulverförmigen als auch flüssigen Waschmitteln sowie unter (schwankenden, suboptimalen) Transport- und Lagerbedingungen;

2. Körperpflege, Wasch- und Reinigungsmittel



- › Erhöhung der Flexibilität bei der Formulierung von Waschmitteln, z.B. durch höhere Toleranz gegenüber anderen Inhaltsstoffen, durch erhöhte Stabilität;
- › höhere Toleranz der Enzyme gegenüber den Waschbedingungen. Waschmittelenzyme müssen ihre Aktivität in alkalischen Lösungen mit hohem pH-Wert (Waschlauge) und auch in Gegenwart von potenziell hemmend wirkenden anderen Waschmittelinhaltsstoffen (Builder, oberflächenaktive Substanzen, Bleichmittel) entfalten. Insbesondere für Waschmittel, die in Europa verkauft werden sollen, besteht eine Nachfrage nach »kaltaktiven« Enzymen, die nicht erst bei hohen Temperaturen von bis zu 60 °C, sondern bereits bei Raumtemperatur, d.h. im Bereich von 15 bis 30 °C eine hohe Waschleistung ermöglichen. Da das Aufheizen des Waschwassers den größten Anteil am Gesamtenergiebedarf von Wasch- und Reinigungsvorgängen hat, kann durch Absenkung der Waschtemperatur ohne Einbußen bei der Reinigungsleistung ein wesentlicher Beitrag zur Energieeinsparung und zum Klimaschutz geleistet werden.

Arbeits- und Verbrauchersicherheit: Enzyme, die in Wasch- und Reinigungsmitteln verwendet werden, bergen das Potenzial, allergische Atemwegserkrankungen zu verursachen, wenn sie in Form enzymhaltige Stäube eingeatmet werden (Schweigert et al. 2000). Dies stellte in den 1960/1970er Jahren zunächst ein Arbeitsschutzproblem dar, das jedoch schnell beherrscht wurde. Zum einen muss das Entstehen der enzymhaltigen Stäube vermieden werden. Maßnahmen umfassen beispielsweise die Granulierung und Verkapselung der Enzyme, die seit 1971 praktiziert wird, ihre Handhabung in weitgehend automatisierten und geschlossenen Anlagen, das Tragen persönlicher Schutzausrüstung sowie der Betrieb von Luftfilteranlagen, die Enzymkonzentrationen in der Luft unter 60 ng/m³ halten. Zum anderen müssen potenziell exponierte Arbeitskräfte in regelmäßigen arbeitsmedizinischen Untersuchungen daraufhin getestet werden, ob bei ihnen enzymspezifische Antikörper nachweisbar sind. Ist dies der Fall, werden die betreffenden Personen von einer weiteren Exposition gegenüber den Enzymen ausgeschlossen. Es liegen langjährige empirische Erfahrungen vor, dass auf diese Weise das Fortschreiten der Sensibilisierung zu einer Allergie mit klinischen Symptomen verhindert werden kann. Die Formulierung enzymhaltiger Wasch- und Reinigungsmittel ist zudem darauf ausgerichtet, die Exposition der Verbraucher gegenüber den Enzymen zu minimieren. Der Enzymgehalt der Luft liegt beim Waschen von Textilien im Haushalt üblicherweise in der Größenordnung von 0,01 ng/m³ und stellt damit kein Sensibilisierungsrisiko für die Verbraucher dar (Basketter et al. 2010 u. 2012; Eduard et al. 2012; Sarlo et al. 2010).



Tab. III.9 Entwicklung des Anteils enzymhaltiger Haushaltswasch- und -reinigungsmittel an allen Haushaltswasch- und -reinigungsmitteln in verschiedenen Weltregionen 2000 und 2010

Weltregion	2000 (in %)	2010 (in %)
Europa	80	90
Lateinamerika	50	75
Nordamerika	50	70
Asien-Pazifik-Raum	50	60
Mittlerer Osten, Afrika	30	60

Quelle: Novozymes A/S 2012

Lebensmittel- und Getränkeherstellung

3.

Die Lebensmittelindustrie verarbeitet Erzeugnisse der Landwirtschaft und Fischerei zu Nahrungsmitteln. Zur Lebensmittelindustrie gehören Schlachten und Fleischverarbeitung, Fischverarbeitung, Obst- und Gemüseverarbeitung, Herstellung von pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten, Milchverarbeitung, Mahl- und Schälmaschinen, Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen, Herstellung von Back- und Teigwaren sowie Herstellung von sonstigen Nahrungsmitteln (z. B. Zucker und Süßwaren, Kaffee, Tee, Gewürze, Spezialitäten). Die Getränkeherstellung umfasst die Herstellung von nichtalkoholischen Getränken und Mineralwasser sowie die Herstellung von alkoholischen Getränken vornehmlich durch Gärung, darunter Bier, Wein und Spirituosen (Statistisches Bundesamt 2008b).

Im Jahr 2013 waren in Deutschland rd. 540.000 Beschäftigte in der Lebensmittel- und Getränkeherstellung in 5.657 Betrieben tätig; der Umsatz belief sich auf mehr als 165 Mrd. Euro (Statistisches Bundesamt 2015).

Gemessen an ihren FuE-Ausgaben wird die Lebensmittel- und Getränkeindustrie als Low-Tech-Industrie eingestuft (Aslesen 2008), die im Wesentlichen auf Know-how und Innovationen zurückgreift, die in den vorgelagerten Branchen Chemie und Anlagen- und Maschinenbau entwickelt werden. Während bei den überwiegend mittelständischen Unternehmen Innovationen in der Regel auf inkrementellen Veränderungen bei den Prozessen und Produkten beruhen, werden umfassende, auch grundlagenorientierte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vor allem von multinationalen Konzernen wie z. B. Nestlé und Unilever betrieben (Menrad 2004).

Seit Jahren ist die Nachfrage nach Lebensmitteln und Getränken durch eine zunehmende Differenzierung und Polarisierung gekennzeichnet: Die Differen-



zierung spiegelt sich darin wider, dass situationsabhängig unterschiedliche Qualitäten nachgefragt werden. Diese Qualitäten beziehen sich zum einen auf verschiedene Marktsegmente (z.B. Biolebensmittel – konventionelle Lebensmittel; hoch verarbeitete Convenienceprodukte – weitgehend naturbelassenen Produkte; Standardlebensmittel – Spezialitäten und Produkte für bestimmte Zielgruppen), zum anderen auf Vermarktungswege (z. B. Lebensmitteleinzelhandel [Discounter, Supermarkt, Fachgeschäft], Direktvermarktung, Onlinelieferservice) sowie auf den Preis. Insbesondere bei der Preisgestaltung ist eine Polarisierung zu beobachten: einerseits ist ein Trend zu sehr preiswerten Waren, andererseits zu hochpreisigen und qualitativ hochwertigen Produkten zu verzeichnen, während das mittlere Preis- und Qualitätssegment immer mehr ausdünnert. Gleichzeitig ist der Wettbewerb intensiv und die Gewinnspannen in den meisten Marktsegmenten gering. Überdurchschnittliche Margen können – zumindest temporär – in bestimmten Teilegmenten (z. B. zielgruppenspezifische Spezialitäten für Kinder, Sportler, Gesundheitsbewusste, Veganer; funktionelle Lebensmittel mit gesundheitlichen Zusatznutzen) realisiert werden.

Der Biotechnologie kommt bei der Lebensmittel- und Getränkeherstellung eine wichtige Rolle zu. Seit Jahrtausenden werden Lebensmittel und Getränke durch Gärungsmethoden hergestellt. Die zunächst traditionellen und handwerklichen Verfahren sind heutzutage auf eine moderne wissenschaftliche Grundlage gestellt und im Hinblick auf industrielle Produktionsprozesse weiterentwickelt und optimiert worden. Zudem kommt der Biotechnologie in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie – zusätzlich zu den traditionellen biotechnischen Verfahren – angesichts der zuvor beschriebenen Trends zur Differenzierung und Polarisierung wachsende Bedeutung zu, sofern sie zu folgenden Zielen signifikante Beiträge leistet (Nusser et al. 2007):

- > Kostensenkung durch Ertrags- und Ausbeuteerhöhung, Verkürzung von Prozessdauer und Reifezeiten, Erschließung kostengünstiger Rohstoffe, Verringerung der erforderlichen Zahl der Prozessschritte, Verringerung von Rest- und Abfallstoffen bzw. Gewinnung von Wertstoffen aus Reststoffen
- > Erhöhung von Prozesssicherheit und -stabilität, Vermeidung von Fehlproduktionen und Qualitätsmängeln
- > Erhöhung der Produktqualität bzw. Gewährleistung eines einheitlichen Qualitätsniveaus
- > Innovative Produkte mit höheren Gewinnmargen.

Verfahren und Produkte der industriellen Biotechnologie spielen heutzutage in folgenden Bereichen der Lebensmittel- und Getränkeherstellung eine wichtige Rolle:

Analytik: Sowohl in der Prozess- und Qualitätskontrolle als auch in der Lebensmittelüberwachung werden immunologische, enzymatische und mole-



kularbiologische Analyse- und Nachweisverfahren eingesetzt. Neben lebensmittelspezifischen Qualitätsparametern (z.B. Gehalt an wertgebenden Inhaltsstoffen) sind Verfahren für die Reinheits- und Identitätskontrolle, den Herkunftsnachweis (Galimberti et al. 2013), für die Überprüfung des Hygienezustands und die Kontamination mit Krankheitserregern, der Nachweis der Verwendung gentechnisch veränderter Organismen bzw. Rohstoffe (Broll/Zagon 2006) sowie für den Gehalt an Schadstoffen, Allergenen oder antinutritiven Substanzen (Schauzu et al. 2012) von besonderem Interesse.

Lebensmittelherstellung und -verarbeitung: Für die Herstellung zahlreicher Lebensmittel werden Mikroorganismen oder Enzyme eingesetzt, die den Lebensmittelrohstoffen in Form von Starterkulturen bzw. Enzympräparaten zugesetzt werden. Eine Übersicht über enzymatische Verfahren in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie gibt Tabelle III.10. Beispiele für fermentative und enzymatische Verfahren sind (Aehle 2007; Nusser et al. 2007; Soetart/Vandamme 2010; www.transgen.de/lebensmittel/einkauf/ [26.2.2016]):

- Milchprodukte: Indem Enzyme, Bakterien (meist Milchsäurebakterien) oder Pilze in der Milchverarbeitung eingesetzt werden, werden haltbare Milchprodukte wie Joghurt, Käse und Quark hergestellt. Um laktosefreie Milchprodukte zu erhalten, wird der Milch das Enzym Laktase zugesetzt, das den Milchzucker Laktose spaltet.
- Alkoholische Getränke: Bei der Bier- und Weinherstellung werden die in der Braugerste bzw. dem Traubensaft enthaltenen Zucker durch Brau- und Weinhefen zu Alkohol vergoren. Neben der Funktion als Geschmacksträger hat Alkohol eine konservierende Wirkung.
- Sauergemüse: Durch Fermentation, meist mit Milchsäurebakterien, wird Gemüse (z. B. Kohl, Sojabohnen, Gurken) haltbar gemacht, auf diese Weise Sauerkraut, Tofu und andere Sojaprodukte hergestellt und ein typischer Geschmack erzielt.
- Fruchtsaftherstellung: Bei der Herstellung von Fruchtsäften kommen Enzyme zum Einsatz, die die Saftausbeute erhöhen, die Viskosität erniedrigen und die Trübstoffentfernung unterstützen.
- Fermentierte Getränke: Indem Milch bzw. Obstsäfte mit Hefen und/oder Bakterien, häufig auch mit Mischkulturen inkubiert werden, werden fermentierte Getränke wie Kombucha, Kefir, Erfrischungsgetränke (Bio-nade®) hergestellt. Die Mikroorganismen bilden typische Geschmacksstoffe und tragen zur Konservierung bei.
- Brot und Backwaren: Einsatz von Hefen, Sauerteigkulturen (Mischkulturen aus Hefen und Bakterien) und Enzymen zur Auflockerung des Teiges, zur Geschmacksbildung, für eine längere Haltbarkeit sowie eine vereinfachte industrielle Herstellungsweise.

3. Lebensmittel- und Getränkeherstellung



- › Fleischwaren: Zur Reifung von Rohwürsten und Schinken werden Starterkulturen eingesetzt; für die Herstellung von Fleischextrakten und Peptidpräparaten werden eiweißspaltende Enzyme verwendet.

Tab. III.10 Einsatzbereiche und Wirkungen von Enzymen in der Lebensmittel- und Getränkeproduktion

Einsatzbereich	Wirkprinzip, Prozess oder Ziel des Enzymeinsatzes
Milchverarbeitung	Dicklegung der Milch als erste Stufe der Käseherstellung, Gewinnung von Molke und Molkeprodukten Beschleunigung der Käsereifung, Intensivierung des Aromas, Verhinderung von Fehlgärungen durch Lysozymzusatz, Herstellung lactosereduzierter Milch durch enzymatische Lactosespaltung, Intensivierung der Süße des Milchprodukts, Herstellung bioaktiver Peptide, bei fettfreien Joghurts: Verbesserung von Textur und Wasserhaltevermögen, geschmackliche Vortäuschung eines höheren Fettgehalts, Optimierung technologischer Eigenschaften von Eiweißen wie Aufschlagvolumen, Schaumstabilität, Viskosität z. B. bei Cremes und Desserts, auch beim Ersatz tierischer durch pflanzliche Eiweiße
Alkohol-, Bier- und Weinherstellung	Steigerung der Vergärbarkeit, Verkürzung und Effizienzsteigerung des Mälzprozesses, Abbau von Trübstoffen, Verbesserung der Filtrierbarkeit, Herstellung von kalorienreduzierten Bieren, Abbau von unerwünschten Geschmacksstoffen, Verhinderung von Fremdaromen, Verkürzung der Reifezeit, Erhöhung der Traubensaftausbeute, Beeinflussung der Farbstofffreisetzung und der Aromabildung
Obst- und Gemüseverarbeitung, Saftherstellung	Abbau pflanzlicher Zellwände, Reduktion der Viskosität, Erhöhung der Saftausbeute, verbesserte Extraktion von Farb- und Aromakomponenten und Antioxidantien, Beschleunigung der Saftklärung und Filtration, Verbesserung der Lagerfähigkeit von Säften
Stärkeindustrie	Stärkemodifikation, Spezialstärken, Stärkeverarbeitung zu verschiedenen Zuckern, darunter Dextrine, Glucose-/Fructosesirups, Maltose, Fettaustauschstoffe auf Stärkebasis
Süßwaren	Verhinderung des Auskristallisierens von Zucker bei Marzipan und Füllungen, nachträgliches Verflüssigen von Pralinenfüllungen, Verbesserung der Konsistenz von Eiskrem- und Schokoladeprodukten durch Spaltung von Milchzucker



III. Anwendungen und Produkte der IBT

Einsatzbereich	Wirkprinzip, Prozess oder Ziel des Enzymeinsatzes
Backwarenherstellung	Verbesserung der Verarbeitungsfähigkeit und der Backeigenschaften der Mehle und Teige, Verkürzung des Aufgehprozesses, Abbau von Proteinen und Fetten, Erhöhung der Haltbarkeit der Backwaren, Verringerung von Abweichungen bei der Produktion, einheitlichere Backwaren, Erzielen von stabiler Kruste, Farbe, Volumen, Dichte, verbesserte Gefrier-Tau-Stabilität vor allem für tiefgekühlte Teige und Backwaren, Abbau von Asparagin, dem Vorläufer des möglicherweise krebs- erregende Acrylamids
Fleischverarbeitung und Wurstherstellung	Fleischzartmachung, Restrukturierung von kleinen Fleischstücken, Verbesserung der Zartheit und des Aromas von Fleischprodukten, beschleunigte Reifung höhere Festigkeit, Abtrennen von Fleischresten vom Knochen und nachfolgende Verarbeitung in Würstwaren, Zusammenfügen kleiner Fleischstücke zu größeren Fleischteilen (»enzymatisches Kleben«, Formfleisch), Texturverbesserung von Brühwürsten
Proteinverarbeitung	Gelatineherstellung, Herstellung bioaktiver Peptide
Öle, Fette	Entschleimung von Pflanzenölen, Gewinnung von Mono- und Diglyceriden, Veränderung des Fettsäurespektrums (z. B. gesättigte/ungesättigte Fettsäuren, langkettige mehrfach ungesättigte Fettsäuren), Veredlung von Fetten (z. B. für Kakaobutterersatzstoffe), veränderte Konsistenz von Streichfetten
Aromen und Würzmittel	Gewinnung von Käsearomen, Butteraroma, Herstellung von Aromen aus pflanzlichem oder tierischem Eiweiß (z. B. Würze, Braten- oder Fleischaromen), Gewinnung von Zitrusaromen aus Schalen, Herstellung von Sojasoße
Farbstoffe	Herstellung von Farbextrakten und färbenden Lebensmitteln aus Pflanzen

Eigene Zusammenstellung von Informationen aus Nusser et al. 2007, www.transgen.de/datenbank/ (26.2.2016)

Herstellung von Lebensmittelzutaten, -zusatz- und -hilfsstoffen: Zahlreiche Zutaten für verarbeitete Lebensmittel sowie Lebensmittelzusatz- und -hilfsstoffe werden durch fermentative oder enzymatische Verfahren produziert. Als quantitativ bedeutsame Beispiele seien genannt:

- › Glucose- und Glucose-Fructose-Sirup: Zum Süßen von Lebensmitteln werden häufig Glucose- und Glucose-Fructose-Sirup verwendet. Diese Sirups werden großtechnisch aus Stärke hergestellt, indem Stärke enzymatisch in Glucose gespalten und zu Fructose isomerisiert wird. In der EU werden

3. Lebensmittel- und Getränkeherstellung



- jährlich etwa 5 Mio. t dieser Sirups durch enzymatische Stärkeverzuckerung hergestellt und verbraucht.
- > Zitronensäure: Zitronensäure wird als Säuerungsmittel in Lebensmitteln und Getränken sowie als Antioxidationsmittel eingesetzt. Sie wird fast ausschließlich fermentativ durch den Schimmelpilz *Aspergillus niger* gewonnen.
 - > Enzyme als Hilfsstoffe: Der Einsatz von Enzymen als Hilfsstoffe in der Lebensmittel- und Getränkeherstellung ist – neben Enzymen für Wasch- und Reinigungsmitteln – eines der ökonomisch wichtigsten Segmente des Marktes für industrielle Enzyme (Tab. III.1) und belief sich 2014 auf mehr als 1 Mrd. Euro und damit auf ca. ein Viertel des Enzymweltmarkts.
 - > Zusatzstoffe: Zu den Zusatzstoffen gehören Geschmacksverstärker, Süßstoffe, Aminosäuren, Vitamine, Aromen, Farbstoffe, Emulgatoren, Verdickungsmittel, Konservierungsstoffe, Stabilisatoren, Feuchthaltemittel und Antioxidationsmittel.
 - > Inhaltsstoffe für funktionelle Lebensmittel: Unter funktionellen Lebensmitteln (»Functional Food«) werden Lebensmittel verstanden, die einen zusätzlichen Nutzen für die Konsumenten aufweisen, der über die reine Sättigung, die Zufuhr von Nährstoffen und die Befriedigung von Genuss und Geschmack hinausgeht. Dieser Zusatznutzen kann in einer Verbesserung des Wohlbefindens, des individuellen Gesundheitszustands oder in einer Verringerung des Risikos bestehen, dass sich bestimmte Krankheiten (z. B. Diabetes, Krebs, Herz-Kreislauf-Erkrankungen) entwickeln. Auch Lebensmittel, aus denen potenziell schädliche Bestandteile wie z. B. Allergene entfernt wurden, werden zu funktionellen Lebensmitteln gezählt. Funktionelle Lebensmittel gehören zu denjenigen Segmenten des Lebensmittelmarktes, in denen vergleichsweise hohe Gewinnmargen erzielt werden können. Die Wirkungen funktioneller Lebensmittel werden ihrem erhöhten Gehalt bestimmter Inhaltsstoffe zugeschrieben. Die meisten Inhaltsstoffe werden aus natürlichen Quellen isoliert (z. B. Ballaststoffe, Prebiotika – meist Oligosaccharide, die einen positiven Effekt auf die Bakterienflora im Darm haben –, Vitamin E, Phytosterine). Ein Teil wird biotechnisch hergestellt. Zu letzteren zählen Vitamine und Provitamine (C u. A), Carotinoide, Omega-3-Fettsäuren sowie probiotische Bakterien.

Eine Besonderheit des Lebensmittelmarktes innerhalb der industriellen Biotechnologie ist, dass der Einsatz gentechnisch veränderter Organismen (GVO) durch die ablehnende Haltung von Handel und Verbrauchern stark eingeschränkt ist (Gaskell et al. 2010; TNS Emnid 2014; TNS Opinion & Social 2010). Seit 2003 besteht gemäß der EU-Verordnung 1829/2003 über gentechnisch veränderte Lebens- und Futtermittel eine Kennzeichnungspflicht für folgende Lebensmittel und Lebensmittelzutaten:

- ^
- ›
- ∨
- › »Ist ein gentechnisch veränderter Organismus (GVO) bzw. besteht daraus«: Beispiele sind gentechnisch veränderter Mais, gentechnisch veränderte Sojabohnen.
- › »Ist aus einem gentechnisch veränderten Organismus hergestellt worden«: Beispiele sind Öl und Margarine aus gentechnisch veränderten Sojabohnen oder Raps, Zucker aus gentechnisch veränderten Zuckerrüben, Stärke oder Cornflakes aus gentechnisch verändertem Mais, Lecithin und Vitamin E aus gentechnisch veränderten Sojabohnen.
- › »Enthält gentechnisch veränderte Organismen«: Beispiele sind Weizenbier mit gentechnisch veränderter Hefe, Joghurt mit gentechnisch veränderten Milchsäurebakterien, Käse mit gentechnisch veränderten Schimmelpilzen.

Zurzeit werden auf dem deutschen Markt keine bzw. nur sehr wenige, in diesem Sinne kennzeichnungspflichtige Lebensmittel angeboten. Auch die Zahl der festgestellten Verstöße gegen diese Kennzeichnungspflicht ist gering und betrifft meist Importware, die außerhalb der großen Handelsketten vertrieben werden (www.transgen.de/recht/kennzeichnung/[20.2.2015]).

Dennoch ist ein beträchtlicher Anteil der Produkte der Lebensmittel- und Getränkeindustrie indirekt mit Gentechnik verbunden, da ihr Produktionsprozess nicht kennzeichnungspflichtige Gentechnikanwendungen beinhaltet (www.transgen.de/recht/kennzeichnung/[20.2.2015]). Dies liegt zum einen daran, dass weltweit der Anbau gentechnisch veränderter Pflanzen ausgeweitet wird (James 2013) und diese als Futtermittel und Rohstoffe für die Lebensmittelindustrie global gehandelt werden. Spuren gentechnisch veränderter Lebens- und Futtermittelpflanzen sind daher auch häufig in Lebensmitteln auf dem deutschen Markt nachweisbar, unterliegen aber nicht der Kennzeichnungspflicht, sofern die Anteile aus zugelassenen gentechnisch veränderten Organismen unterhalb eines Schwellenwerts von 0,9 % liegen und diese Spuren zufällig und technisch unvermeidbar sind. Zum anderen werden in folgenden Bereichen häufig Gentechnikanwendungen während des Produktionsprozesses eingesetzt, ohne dass dadurch ein kennzeichnungspflichtiges Lebensmittel im zuvor genannten Sinne entsteht (www.transgen.de/recht/kennzeichnung/[20.2.2015]):

- › tierische Lebensmittel wie Eier, Milch und Fleisch, wenn die Tiere mit Futtermitteln aus gentechnisch veränderten Pflanzen, in der Regel Soja, gefüttert wurden;
- › Zusatzstoffe, Vitamine und Aromen, die mithilfe gentechnisch veränderter Mikroorganismen hergestellt werden. Hierzu zählen beispielsweise Aminosäuren, die als Geschmacksverstärker, in Aromapräparaten oder als Baustein des Süßstoffs Aspartam verwendet werden; Konservierungsstoffe wie Nisin und Natamycin, das Antioxidationsmittel Zitronensäure, der Aromastoff Vanillin sowie die Vitamine B12, B2 und C.

4. Textilherstellung und -veredlung



- › Lebensmittelenzyme, die mit gentechnisch veränderten Mikroorganismen hergestellt werden. Es müssen gemäß der EU-Verordnung 1331/2008 über ein einheitliches Zulassungsverfahren für Lebensmittelzusatzstoffe, -enzyme und -aromen und der EU-Verordnung 1332/2008 über Lebensmittelenzyme lediglich diejenigen Enzyme – unabhängig davon, ob sie in einem gentechnisch veränderten Mikroorganismus hergestellt wurden oder nicht – in der Zutatenliste mit Name und Funktion aufgeführt werden, die im *Endprodukt* eine technologische Funktion erfüllen. Beispiele hierfür sind die Enzyme Invertase (verhindert in Süßwaren die unerwünschte Bildung von Zuckerkristallen) und Lysozym (wirkt durch Auflösung von Bakterienzellwänden konservierend). Der ganz überwiegende Teil der in der Lebensmittelherstellung eingesetzten Enzyme fällt jedoch nicht unter diese Definition, da ihre katalytische Funktion in der Regel bei der *Herstellung* des Endprodukts genutzt wird. Zwar sind diese als Prozesshilfsmittel verwendeten Enzyme in den meisten Fällen auch noch im Endprodukt in inaktivierter Form enthalten, müssen aber dennoch gemäß der genannten EU-Verordnungen nicht in der Zutatenliste aufgeführt werden, unabhängig davon, ob sie in einem gentechnisch veränderten Mikroorganismus hergestellt wurden oder nicht.
- › Lebensmittelzutaten, die mithilfe von Enzymen produziert werden, die in gentechnisch veränderten Mikroorganismen hergestellt wurden. Hierunter fallen beispielsweise Glucosesirups, die aus Stärke mithilfe von stärkeabbauenden Enzymen aus GVO hergestellt werden.

Textilherstellung und -veredlung

4.

Die Textilindustrie verarbeitet Fasern zu Textilien und umfasst die Produktionsstufen Spinnerei, Weberei und Strickerei sowie Textilveredlung (Statistisches Bundesamt 2008b). Naturfasern bezieht sie aus der Landwirtschaft, synthetische Fasern und Prozesschemikalien von der chemischen Industrie. Nachgeschaltete Sektoren und Abnehmer für die in der Textilindustrie gefertigten Textilien sind die Bekleidungsindustrie, gewerbliche und private Verbraucher für Haustextilien (z. B. Gardinen, Teppiche) sowie verschiedene Branchen als Kunde für technische Textilien, insbesondere die Fahrzeug-, Bau- und Sportgeräteindustrie.

Mit der Herstellung von Textilien waren in Deutschland im Jahr 2013 713 Betriebe mit knapp 64.000 Beschäftigten befasst; der Umsatz belief sich auf gut 11 Mrd. Euro, wovon mehr als 5 Mrd. Euro (44%) durch Exporte ins Ausland erwirtschaftet wurden (Statistisches Bundesamt 2014a). Damit kommt der mittelständisch strukturierten, stark exportorientierten Textilindustrie heutzutage nur noch geringe volkswirtschaftliche Bedeutung zu. Sie durchläuft seit 1970 einen immer noch andauernden Strukturwandel: Die arbeitsintensive Be-



kleidungsindustrie und die Herstellung einfacher Standardwaren sind aus Kostengründen ins Ausland, vor allem nach Osteuropa und Asien, verlagert worden, und ein großer Teil der die Bekleidungsindustrie beliefernden Textilindustrie ist ihren Abnehmern ins Ausland gefolgt.

Im Rahmen des Strukturwandels haben sich deutsche Unternehmen auf qualitativ hochwertige, technologisch anspruchsvolle und innovative Produkte ausgerichtet. Dabei werden zunehmend traditionelle Technologien (Stricken, Weben, Flechten) durch neuere Verfahren (wie Verbundstoff- oder Vliesstofftechnik) ergänzt. Zudem haben technische Textilien stark an Bedeutung gewonnen. Unter technischen Textilien werden textilbasierte Produkte verstanden, die in erster Linie wegen ihrer funktionalen Eigenschaften überwiegend für gewerbliche bzw. industrielle Produkte und Zwecke (und nicht wegen ästhetischer Eigenschaften für Konsumprodukte bzw. -zwecke) verwendet werden. Die wichtigsten Marktsegmente für technische Textilien sind Fahrzeugbau, Bauindustrie, Sport- und Freizeitprodukte. Die deutschen Hersteller technischer Textilien sind in Europa Marktführer und nehmen auch weltweit eine Spitzenposition ein. Nach Angaben des Industrieverbands Veredlung – Garne – Gewebe – Technische Textilien e.V. (IVGT) belief sich der Umsatz der deutschen Hersteller technischer Textilien 2013 auf rund 6 Mrd. Euro, das ist mehr als die Hälfte des Branchenumsatzes (BMW i 2015; Commerzbank 2014).

In der Textilindustrie werden traditionell nasschemische Verfahren zur Verarbeitung der Fasern eingesetzt, was Potenziale bietet, chemische durch biotechnische Prozesse zu ergänzen bzw. zu ersetzen. Tabelle III.11 gibt eine Übersicht über die relevanten Verfahren und ihren jeweiligen Entwicklungsstand.

Enzymatische Prozesse kommen bei der industriellen Verarbeitung von Naturfasern (vor allem Baumwolle, Wolle, Seide sowie aus Faserzellstoff hergestellte Fasern) zu Geweben in der Bekleidungsindustrie routinemäßig zum Einsatz. Seit etwa 15 Jahren wird auch der Einsatz von Enzymen zur Oberflächenbehandlung und Funktionalisierung von synthetischen Fasern erforscht. Bei der Herstellung und Funktionalisierung technischer Textilien können biotechnische Verfahren Beiträge leisten. Die Verfahren werden im Folgenden näher charakterisiert.

Vorwäsche: Erster Schritt der Faserverarbeitung ist die Vorwäsche. In der Vorwäsche werden Verunreinigungen sowie fettige, ölige oder wachsartige Faserbegleitstoffe entfernt, die den weiteren Verarbeitungsprozess stören bzw. die Qualität des Endproduktes beeinträchtigen könnten. Konventionell werden hierfür geeignete Waschmittel, Säuren und Laugen bei hohen Temperaturen eingesetzt, die für Naturfasern durch enzymatische Verfahren ergänzt bzw. ersetzt wurden. Bei der Vorbehandlung von Baumwollfasern kann das konventionelle Abkochen mit Lauge durch ein enzymatisches Verfahren (»bio-scouring«) vollständig ersetzt werden.

Tab. III.11 Entwicklungsstand biotechnischer Verfahren in der Textilindustrie

Verfahren	Entwicklungsstand
enzymatische Vorwäsche von Baumwolle	kommerzialisiert
enzymatisches Entbasten von Seide	kommerzialisiert
enzymatisches Carbonisieren von Wolle (Entfernung von Pflanzenteilen)	kommerzialisiert, geringer Durchdringungsgrad
enzymatische Entfernung von Stärkeschichten	kommerzialisiert
enzymatische Entfernung von Schichten aus Polyvinylalkoholen	Pilotanlagen
Biobleiche von indigogefärbten Jeansstoffen mit Laccase-Mediator-System zum Erzielen bestimmter Farbnuancen	kommerzialisiert, Spezialanwendung
Biobleiche mit Glucoseoxidase und Peroxidase, in Kombination mit enzymatischer Entfernung von Stärkeschichten	Pilotanlagen
enzymatische Entfernung von Bleichmittelresten	kommerzialisiert
fermentative Herstellung von Textilfarbstoffen	kommerzialisiert, Nischenanwendung
Biostoning zum Erzielen des abgetragenen Aussehens bei Jeans	kommerzialisiert
Biopolishing zum Glätten der Faser- und Gewebeerflächen aus Cellulosefasern, Verhindern von Flusenbällchenbildung (»pilling«)	kommerzialisiert
enzymatische Filzfreiausrüstung von Wolle	kommerzialisiert, geringer Durchdringungsgrad
enzymatische Modifikation von Wollfasern	kommerzialisiert, geringer Durchdringungsgrad
Oberflächenmodifikation und Funktionalisierung synthetischer Fasern	Pilotanlagen
biotechnische Verfahren für die Herstellung und Funktionalisierung technischer Textilien	Labor

Eigene Zusammenstellung von Informationen aus Paul/Genescà 2013; Pflaum et al. 2008; Radhakrishnan 2014; Wehrschütz-Sigl et al. 2010

Für das enzymatische Abkochen werden Enzymmischungen mit Amylasen, alkalischen Pektinasen und Hemicellulasen in Kombination mit Tensiden und Komplexbildnern verwendet. Einsparungen ergeben sich beim Wasser-, Chemikalien und Energieverbrauch sowie durch Verkürzung der Prozessdauer (Nierstrasz/Cavaco-Paulo 2010). Zudem lässt sich eine höhere Qualität der Fasern durch reduzierte Faserschädigung erzielen und die Korrosion von metallischen Maschinenteilen verringern. Verfahrenskombinationen mit enzymatischem Entschlichten sind möglich (Pflaum et al. 2008). Ebenso sind das enzymatische



Entbasten von Rohseide und die enzymatische Entfernung von Pflanzenresten aus Wolle (enzymatisches Carbonisieren) Stand der Technik.

Entschlichten: Um Kettfäden gegenüber den mechanischen Beanspruchungen beim Weben widerstandsfähiger zu machen, werden sie mit Schlichtemitteln überzogen. Als Schlichten werden makromolekulare Produkte auf natürlicher (Stärke, Cellulosederivate, Gelatine) oder synthetischer Basis (z. B. Polyvinylalkohole und Polyacrylate) sowie Öle, Fette oder Wachse zur Glättung eingesetzt (Bode et al. 2007). Die Schlichte muss nach dem Webvorgang wieder entfernt werden, um das Gewebe für die nachfolgenden Prozessschritte des Bleichens, Färbens etc. zugänglich zu machen. Da über 75 % der weltweit eingesetzten Schlichten Stärke oder Stärkederivate sind, kommen Stärke abbauende Enzyme (Amylasen) zur Entschlichtung routinemäßig zum Einsatz (Nierstrasz/Cavaco-Paulo 2010). Darüber hinaus sind Enzyme bekannt, die für den Abbau polyvinylalkoholbasierter Schlichten eingesetzt werden können (Paul/Genescà 2013). Es ist Gegenstand aktueller FuE-Arbeiten, Verfahren zur wirtschaftlichen Produktion dieser Enzyme im industriellen Maßstab zu entwickeln (Jia et al. 2014).

Bleichen: Drei verschiedene Enzymsysteme wurden daraufhin untersucht, ob sie als Alternative zu chemischen Bleichmitteln wie z. B. Wasserstoffperoxid (H_2O_2) eingesetzt werden können: Peroxidasen, Glucoseoxidase, Laccase-Mediator-Systeme. Laccase-Mediator-Systeme werden kommerziell zum Bleichen von Jeans eingesetzt, die mit Indigo gefärbt wurden, um eine bestimmte Farbnuance (»grey look«) zu erzielen. Die Nutzung von Glucoseoxidase ist in Kombination mit der enzymatischen Entschlichtung von Stärkeschlichten von Interesse, da auf diese Weise das Endprodukt der enzymatischen Entschlichtung, Glucose, als Ausgangsstoff für die prozessintegrierte Herstellung des Bleichmittels Wasserstoffperoxid genutzt werden könnte. Zusammen mit Peroxidasen, die die Wirkung von Peroxid verstärken, wurden vielversprechende Ergebnisse erzielt. Eine Kostenwettbewerbsfähigkeit mit konventionellen Bleichverfahren konnte jedoch noch nicht erreicht werden (Paul/Genescà 2013, S. 183).

Entfernung von Bleichmitteln: Das Bleichmittel Wasserstoffperoxid (H_2O_2) muss vor den nachfolgenden Färbeschritten vollständig entfernt werden. Konventionell erfolgt dies durch mehrfaches Spülen bei hohen Temperaturen und durch Zugabe von chemischen Reduktionsmitteln. Durch den Einsatz des Enzyms Katalase wird H_2O_2 bei moderaten Temperaturen innerhalb von Minuten gespalten und entfernt; Spülvorgänge können entfallen (Aehle 2007).

Färben: Verschiedene Textilfarbstoffe lassen sich fermentativ mit Bakterien bzw. Pilzen herstellen (Kasiri/Safapour 2014; Radhakrishnan 2014).

Biostoning: Um den Stonewashedeffekt bei Jeansstoffen zu erzielen, wurden im konventionellen Verfahren die Kleidungsstücke zusammen mit Bimssteinen gewaschen. Dieses Verfahren ist nahezu vollständig durch die enzymatische



Behandlung der Kleidungsstücke mit Cellulaseenzymen ersetzt worden. Allerdings besteht dabei das Problem, dass sich bereits abgelöste Farbstoffe wieder auf dem Stoff ablagern. Verschiedene Ansätze werden verfolgt, um dieses Problem zu verringern. Eine häufig genutzte Option ist die Immobilisierung der Cellulasen auf (einer geringeren Menge von) Bimssteinen (Paul/Genescà 2013).

Biopolishing: Durch eine Cellulasebehandlung wird die Oberfläche von baumwoll- und cellulosebasierten Textilien geglättet, indem von der Oberfläche abstehende Celluloseketten abgebaut werden. Dadurch wird das Gewebe weicher, glatter und ansehlicher, da auch die Bildung von »Flusenbällchen« (»pilling«) reduziert wird (Aehle 2007).

Filzfreiausrüsten von Wolle: Durch Proteasebehandlungen kann Wolle vor dem Verfilzen geschützt werden (Aehle 2007). Eine solche Proteasebehandlung kann alternativ zu chemischen Oxidationsverfahren (in der Regel mithilfe von Chlor) und Beschichtung mit Polymerharzen eingesetzt werden. Filzfrei ausgerüstete Wolle kann in der Maschine gewaschen werden. Die Nutzung dieses Verfahrens in der Textilindustrie ist noch gering, da eine intensive Prozesskontrolle erforderlich ist, um eine unerwünschte Schädigung der Wollfasern durch die proteinabbauenden Enzyme zu vermeiden (Pflaum et al. 2008).

Anti-Smell-Ausrüstung: Um das Auftreten von Gerüchen zu vermeiden, werden Textilien mit Cyclodextrinen beschichtet. Cyclodextrine werden durch den enzymatischen Abbau von Stärke gewonnen. Sie sind in der Lage, Schweißkomponenten zu binden, und verhindern somit Schweißgerüche (Bode et al. 2007).

Oberflächenmodifikation und Funktionalisierung synthetischer Fasern: Die Textilindustrie verarbeitet vor allem synthetische Fasern. Es ist Gegenstand der aktuellen FuE-Arbeiten, für eine breitere Nutzung biotechnischer Prozesse bzw. Prozessschritte das Potenzial von Enzymen zur Oberflächenmodifikation und Funktionalisierung synthetischer Fasern auszuloten. Da synthetische Fasern aufgrund ihrer chemischen Struktur wasserabweisend (hydrophob) und damit schwer benetzbar sind, besteht Bedarf nach enzymatischen Verfahren, die die Faseroberfläche so verändern, dass die Feuchtigkeitsaufnahme erhöht wird. Dadurch sollen die Effizienz der nachfolgenden Färbe- und Ausrüsteprozesse erhöht und auch der Tragekomfort der so behandelten Textilien gesteigert werden. Der Nachweis der Machbarkeit einer enzymatischen Oberflächenmodifikation wurde für die wirtschaftlich bedeutendsten synthetischen Fasern, nämlich für Polyester, insbesondere Polyethylenterephthalat (PET), für Polyamide sowie für Polyacrylnitril erbracht. Um die Prozesse zur industriellen Anwendungsreife zu bringen, wird die Optimierung der Enzyme, ihre effiziente Herstellung im industriellen Maßstab sowie die Entwicklung entsprechender Textilveredelungsprozesse erforscht (Guebitz/Cavaco-Paulo 2008; Silva et al. 2015).



Technische Textilien, »Smart Textiles«: Eine für die deutsche Textilindustrie besonders wichtige Produktgruppe sind technische Textilien. Weltweit belief sich der Faserverbrauch für technische Textilien im Jahr 2010 auf etwa 22 Mrd. t, das waren 28 % des Fasergesamtverbrauchs für alle Textil- und Bekleidungs-zwecke (80 Mrd. t). Bislang ist die Bedeutung biotechnischer Verfahren für die Herstellung und Funktionalisierung technischer Textilien sowie der Untergruppe der »Smart Textiles« gering. Letztere reagieren auf Veränderungen in der Umwelt mit einer Veränderung ihrer Eigenschaften. Beiträge der Biotechnologie zu technischen Textilien liegen darin, dass Enzyme an die Fasern gekoppelt werden oder dass durch die Aktivität von Enzymen die kontrollierte Freisetzung bestimmter funktioneller Stoffe aus den Textilien ausgelöst wird (Wehrschütz-Sigl et al. 2010). Die prinzipielle Eignung entsprechender biotechnischer Verfahren wurde beispielsweise in folgenden Fällen nachgewiesen: Durch die Kopplung aktiver Enzyme an Gewebe konnten eine antimikrobielle Ausrüstung von Baumwolle und Wolle erzielt werden; Naturfasern schwerer entflammbar gemacht werden; der Abbau giftiger Substanzen nachgewiesen werden, was eine Weiterentwicklung zu entgiftenden Schutztextilien eröffnet, die beispielsweise chemische Kampfstoffe zerlegen; das Verstopfen von textilen Filtermaterialien verhindert bzw. verzögert werden; Verbandsmaterialien mit blutgerinnungsfördernden Biomolekülen bestückt werden (Paul/Genescà 2013; Wehrschütz-Sigl et al. 2010). Kosteneffiziente Lösungen müssen noch entwickelt werden, um die Langzeitstabilität und -aktivität der an der textilen Matrix immobilisierten Biomoleküle im praktischen Gebrauch der Textilien (z.B. häufiges Waschen) zu gewährleisten.

Lederherstellung

5.

Die deutsche Lederindustrie umfasst rund 35 industriell arbeitende Betriebe mit ca. 2.500 Beschäftigten und einem Umsatz von rund 500 Mio. Euro. Von den rund 8 Mio. Quadratmetern Flächenleder, die im Jahr 2011 in Deutschland produziert wurden, wurde der Großteil als Auto- und Möbelleder (75 %) verwendet, außerdem für die Herstellung von Schuhen (15 %) sowie 10 % für Lederwaren, Bekleidung und den Reitsport- und Sattlerbereich (VDL o.J.).

Leder wird aus tierischen Häuten hergestellt. Die Lederherstellung umfasst mehr als ein Dutzend nasschemischer Prozessschritte. Sie dienen dazu, die Häute zu reinigen und für die nachfolgenden Prozessschritte aufzuschließen, die Häute durch Gerbung zu konservieren und dem resultierenden Leder bestimmte Eigenschaften zu verleihen (Thanikaivelan et al. 2005). Der Einsatz von Enzymen hat in der Lederherstellung eine lange Tradition. Es werden vor allem eiweiß- und fettspaltende Enzyme, sogenannte Proteasen und Lipasen, einge-

setzt. Sie dienen dem Entfernen von Schmutz, Fett und Fleischresten und der Modifikation der Eiweißstruktur der Häute, damit Gerb- und Beizchemikalien besser eindringen und bestimmte Oberflächeneffekte erzielt werden können (Dettmer et al. 2013).

Neben einer Erhöhung der Effizienz der eingesetzten Enzyme zielen FuE-Arbeiten vor allem darauf ab, biotechnische Verfahren zu entwickeln und zu optimieren, die über die bislang etablierten Anwendungen hinaus für folgende Prozessschritte genutzt werden können:

Enzymatische Enthaarung: Seit Jahren wird an der Entwicklung enzymatischer Enthaarungsverfahren gearbeitet, die die in stark alkalischer Lösung ablaufende chemische Enthaarung der Tierfelle ersetzen könnte. Herausforderungen bestehen darin, eine vollständige Haarentfernung zu gewährleisten, ohne die Oberfläche der Häute anzugreifen und damit die Lederqualität zu beeinträchtigen (Dettmer et al. 2012).

Biotechnische Produktion von Prozesshilfsmitteln: wie z.B. pflanzlichen Gerbstoffen oder waschaktiven Substanzen (Biotenside).

Enzymatische Oberflächenmodifizierung und -funktionalisierung von Häuten: Erzielung besonderer Effekte und Lederqualitäten.

Beiträge zum Lederrecycling: Biotechnische Beiträge zum Lederrecycling liegen in der Rückgewinnung von Chrom aus chromgegerbtem Leder, um es wieder in der Gerbung einsetzen zu können, sowie in der Umwandlung von Altleder bzw. Lederabschnitten in Wertstoffe.

Wertstoffgewinnung aus Reststoffen der Lederproduktion: Bei der Lederherstellung fallen Reststoffe biologischen Ursprungs an, wie z.B. Haare, an den Rohhäuten an hängende Fleisch- und Fettreste, Lederabschnitte. Sie werden kompostiert, zu Biogas umgesetzt und zur Herstellung von Proteinhydrolysaten z.B. für Futtermittel verwendet. Es besteht Bedarf, weitere hochwertige Verwertungsmöglichkeiten zu erschließen.

Zellstoff- und Papierherstellung

6.

Die Zellstoff- und Papierindustrie verarbeitet Holz zu Faserstoffen (Holzstoff, Zellstoff) und diese weiter zu Papier, Karton und Pappe mit den Sorten Verpackungspapiere und Kartons, grafische Papiere, Hygienepapiere sowie technische Papiere und Spezialpapiere. Die deutsche Zellstoff- und Papierindustrie umfasst mehr als 100 Betriebe, beschäftigte im Jahr 2013 rund 40.300 Personen und hatte einen Umsatz von 14,3 Mrd. Euro. Im Jahr 2013 belief sich die Produktion auf etwa 1 Mio. t Holzstoff, 1,6 Mio. t Zellstoff sowie 22,6 Mio. t Papier, Karton und Pappe (VdP 2014a).



Tab. III.12 Entwicklungsstand biotechnischer Verfahren in der Zellstoff- und Papierindustrie

Verfahren	Entwicklungsstand
enzymatische Entfernung der Borke	Labormaßstab
biotechnische Verfahren in der Faserstoffherzeugung	Pilotanlagen
Biopulping in der mechanischen Faserstoffherzeugung	Pilotanlagen
Biopulping in der chemischen Faserstoffherzeugung	Pilotanlagen
biotechnische Verfahren in der Herstellung von Faserzellstoffen	Pilotanlagen
Biobleiche von Faserstoffen	
Biobleiche mit Xylanasen (in Kombination mit Kraftverfahren)	kommerzialisiert
Biobleiche mit Laccase-Mediator-System	Pilotanlagen
enzymatische Fasermodifikationen	
Verbesserung der Mahlbarkeit von Faserstoffen	kommerzialisiert
Verbesserung der Entwässerungseigenschaften von Faserstoffen	kommerzialisiert
Verringerung von Gefäßzellenausbrüchen	kommerzialisiert
Entfernung von Pitch aus Faserstoffen	kommerzialisiert
Kontrolle der Schleimbildung bei der Papierherstellung	kommerzialisiert
enzymatische Kontrolle klebriger Verunreinigungen (Stickies)	kommerzialisiert

Quelle: nach Bajpai 2012, S. 3

Holz besteht hauptsächlich aus den Polymeren Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Die sogenannten Faserstoffe, die den eigentlichen Rohstoff für die Papierherstellung darstellen, bestehen vor allem aus Cellulosefasern. Sie werden in der Regel aus Baumstämmen, Durchforstungsholz und Hackschnitzeln aus der Sägeindustrie hergestellt. Auch aus Altpapier werden Faserstoffe für die Papierherstellung gewonnen. Um das Holz in seine Fasern zu zerlegen und Lignin und Hemicellulosen zu entfernen, kann es mechanisch zerfasert und/oder chemisch zu Zellstoff verarbeitet werden. Der zweite wichtige Prozessschritt ist das Bleichen. Im dritten Prozessschritt wird Papier hergestellt, indem die in Wasser aufgelösten, gebleichten pflanzlichen Faserstoffe auf einem Sieb entwässert werden und sich dabei zu einem zusammenhängenden Faservlies, dem Papier, verbinden (VdP 2014b). Tabelle III.12 gibt eine Übersicht über die in der Zellstoff- und Papierindustrie etablierten sowie die in der Entwicklung befindlichen biotechnischen Verfahren. Sie werden im Folgenden näher charakterisiert:

Enzymatische Entfernung der Borke: Die äußere schützende Schicht von Bäumen, die sogenannte Borke (umgangssprachlich Rinde), muss, um die Papierproduktion und -qualität nicht zu beeinträchtigen, vor der Herstellung des Faserstoffs weitgehend entfernt werden. Stand der Technik ist das mechanische



Abschälen der Borke. Dabei verbleiben jedoch bei Nadelbäumen zunächst etwa 3%, bei Laubbäumen etwa 10% der Borke auf den Baumstämmen. Eine weitergehende Entfernung der Borke erfordert einen verlängerten Maschineneinsatz mit entsprechend erhöhtem Zeit- und Energieaufwand und führt zu Holzverlusten. Es ist Gegenstand der Forschung, Holzverluste und Aufwand zu verringern, indem die weitergehende Entfernung von Borkenresten mithilfe von Enzymen durchgeführt wird. Zum Einsatz kommen Enzyme, die spezifisch die Schicht zwischen Borke und Holz abbauen, das sogenannte Kambium. Aufgrund von Versuchen mit kommerziell verfügbaren Enzymen zeichnet sich ab, dass sich enzymatische Verfahren insbesondere als Ergänzung zur mechanischen Borkenentfernung eignen, indem nach einem ersten Schälvorgang verbleibende, mechanisch besonders schwer zu entfernende Borkenstücke enzymatisch gelockert und der Baumstamm anschließend einer zweiten mechanischen Borkenentfernung unterworfen wird. Es besteht noch Forschungsbedarf, die eingesetzten Enzyme und Enzymkombinationen und die Verfahrensschritte bei der enzymatischen Borkenentfernung zu optimieren und auf dieser Basis ein industriell einsetzbares Verfahren zu entwickeln (Bajpai 2012, S. 23 ff.).

Biotechnische Verfahren in der Faserstoffherzeugung, Biopulping: Grundsätzlich unterscheidet man zwei verschiedene Verfahren zur Gewinnung von Faserstoffen aus Holz: mechanisches Zerfasern von Holz zu Holzstoff sowie chemisches Herauslösen der Cellulosefasern aus dem Holz zur Gewinnung von Zellstoff. Die mechanischen Verfahren zeichnen sich durch eine hohe Ausbeute, aber geringere Faserstoffqualität und hohen Energieaufwand aus, während chemische Verfahren qualitativ hochwertigere Faserstoffe liefern, aber nur geringe Ausbeuten bei gleichzeitig hohem Chemikalieneinsatz erzielen. Häufig werden Kombinationen von mechanischen und chemischen Verfahren zur Faserstoffherzeugung genutzt. Biotechnische Verfahren zur Faserstoffherzeugung sollen insbesondere dazu beitragen, den Energieaufwand bzw. Chemikalieneinsatz konventioneller Faserstoffherzeugungsverfahren zu verringern. Versuche mit isolierten ligninabbauenden Enzymen waren wegen der Komplexität der Holzstruktur und der zu ihrem Abbau erforderlichen Enzymsysteme nicht erfolgversprechend. Deshalb wird die Vorbehandlung des Holzes mit holzzersetzenden Weißfäulepilzen vor dem Holzaufschluss favorisiert. Durch die Stoffwechsellaktivität der Pilze wird die Holzstruktur geschwächt, was die nachfolgende Zerfaserung erleichtert. Die umfassendsten Versuchsreihen wurden in den USA in Kombination mit der mechanischen Zerfaserung durchgeführt, aber auch in Japan und Brasilien wurden sogenannte Biopulpingverfahren mit Weißfäulepilzen untersucht und bis zum Pilotanlagenstadium entwickelt. Dabei konnte der Nachweis erbracht werden, dass der Energiebedarf des mechanischen Holzaufschlusses durch die Biopulping-Vorbehandlung tatsächlich deutlich geringer als im herkömmlichen Verfahren ausfällt. Nachteile liegen in dem großen Zeit- und



Flächenbedarf für die Bebrütung der Holzschnitzel sowie in der veränderten Qualität des resultierenden Faserstoffs. Die Weiterentwicklung zum industriellen Maßstab und der Nachweis, dass das Verfahren langfristig stabil betrieben werden kann, stehen noch aus. Noch nicht zufriedenstellend gelöst ist die Anzucht der Weißfäulepilze in den großen Mengen, die zum Beimpfen der Holzschnitzel benötigt werden. Die Kombination von Biopulping mit chemischen Verfahren des Holzaufschlusses ist bisher zwar weniger intensiv untersucht, aber ebenfalls bis zum Pilotmaßstab entwickelt worden (Bajpai 2012, S. 67 ff.).

Biotechnische Verfahren in der Herstellung von Faserzellstoff: Faserzellstoff (»dissolving pulp«) ist ein spezieller, qualitativ sehr hochwertiger Zellstoff, der für die Herstellung von Chemiefasern, insbesondere Viskose-, Modal- und Lyocellfasern, benötigt wird. Er zeichnet sich durch einen hohen Cellulosegehalt, einen geringen Hemicelluloseanteil, eine enge Molekulargewichtsverteilung und eine große Helligkeit aus. Der Einsatz von Cellulasen und Xylanasen wird ausgelotet mit dem Ziel, in Faserzellstoffen den Cellulosegehalt zu erhöhen und den Hemicellulosegehalt zu verringern. Ein noch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem ist die geringe Zugänglichkeit der Cellulose bzw. Hemicellulosen für die Enzyme, sodass sowohl Reaktionsgeschwindigkeit als auch erzielbare Endkonzentrationen an Cellulose bzw. Hemicellulose für eine industrielle Nutzung dieser enzymatischen Verfahren noch nicht ausreichen (Bajpai 2012, S. 193 ff.).

Biotechnische Verfahren zum Bleichen von Faserstoffen (Biobleaching): Faserstoffe müssen gebleicht werden, um helle Papierqualitäten zu erhalten, die nicht vergilben. Als Bleichmittel wurden früher Chlorgas bzw. Chlorverbindungen eingesetzt, die wegen ihrer Toxizität mittlerweile weitgehend durch sauerstoffhaltige Bleichmittel abgelöst wurden. Zudem wird das Potenzial biotechnischer Verfahren zum Bleichen von Zellstoff ausgelotet. Auf dem Enzym Xylanase basierende Verfahren werden seit Jahren in der industriellen Produktion eingesetzt, auf Laccase-Mediator-Systemen beruhende Verfahren werden im Pilotmaßstab erprobt, der Einsatz von Weißfäulepilzen (statt isolierter Enzyme) wurde im Labormaßstab untersucht (Bajpai 2012, S. 93 ff.).

Enzymatische Fasermodifikationen: Mehrere enzymatische Prozesse werden im industriellen Maßstab kommerziell eingesetzt, um die Fasern zu modifizieren. Dies sind insbesondere die Modifikation von Fasereigenschaften durch Cellulasen mit dem Ziel, die Zerfaserbarkeit und Mahlbarkeit des Faserstoffs zu verbessern, die Verbesserung der Entwässerbarkeit von Faserstoffen und Papieren durch den Einsatz von Cellulase- und Hemicellulasegemische sowie die Verringerung von Gefäßzellenausbrüchen (»vessel picking«), die die Bedruckbarkeit von Papieren aus tropischen Harthölzern beeinträchtigen. Enzymatische Fasermodifikationen erfolgen in der Regel auf der Stufe der Faserstoffherzeugung. Dadurch können im Produktionsprozess der Energieaufwand für die Mahlung des Faserstoffs verringert, teure durch kostengünstigere Faserstoffe

ersetzt, die Entwässerbarkeit von Faserstoffen verbessert und der Energieaufwand für das Trocknen verringert werden. In manchen Fällen können auch die Papiermaschinen mit höherer Geschwindigkeit laufen, sodass die Produktivität gesteigert werden kann. Auch bestimmte Papiereigenschaften können durch die Fasermodifikation beeinflusst werden. Aktuell wird daran gearbeitet, das Spektrum der papiertechnisch relevanten Fasermodifikationen zu erweitern (Bajpai 2012, S. 159 ff.).

Pitchentfernung: Als »Pitch« werden Störstoffe im Papierherstellungsprozess bezeichnet, die auf Ablagerungen von Baumharzen in den Maschinen zurückzuführen sind. Diese Störstoffe werden in mehreren verschiedenen Prozessschritten freigesetzt. Dies sollte möglichst vermieden werden, da andernfalls die Laufgeschwindigkeit der Papiermaschinen verringert werden muss, es zu häufigeren Maschinenstillständen, verlängerten Rüst- und Wartungszeiten sowie verminderter Papierqualität kommt und der Verbrauch an Prozesschemikalien erhöht wird. Zudem wirkt Pitch im Papierfabrikabwasser toxisch. Die Häufigkeit des Auftretens von Pitchproblemen hängt von den eingesetzten Baumarten, den genutzten Verfahrensvarianten sowie dem Ausmaß der Schließung von Wasserkreisläufen in Papierfabriken ab. Konventionelle Maßnahmen zur Kontrolle von Pitchproblemen bestehen in der Lagerung des Holzes vor seiner Verwendung, da sich der Harzgehalt während der Lagerung verringert, sowie in der Entfernung der Harzablagerungen in den Maschinen durch geeignete Chemikalien. Biotechnische Verfahren zur Pitchkontrolle umfassen die Bebrütung des Holzes mit Pilzen, die Baumharze abbauen. Die Verringerung des Harzgehaltes während der Lagerung kann dadurch intensiviert bzw. beschleunigt werden. Für die Verringerung von Pitchproblemen im Papierproduktionsprozess sind seit vielen Jahren Enzyme kommerziell verfügbar, insbesondere Lipasen, die im Hinblick auf ihre Temperaturstabilität und ihr Temperaturoptimum an die Bedingungen von Papierproduktionsprozessen angepasst wurden. Es ist Gegenstand der Forschung, industriell einsetzbare Verfahren zur Pitchkontrolle unter Nutzung oxidativ wirkender Enzyme zu entwickeln. Dabei wird insbesondere das Potenzial von Laccase-Mediator-Systemen sowie von Lipoxygenasen ausgelotet (Bajpai 2012, S. 33 ff.).

Kontrolle der Schleimbildung bei der Papierherstellung: Im Hinblick auf Nährstoffe, Temperatur und Feuchtigkeit bieten Papierfabriken ideale Bedingungen für das Wachstum schleimbildender Mikroorganismen. Die Schleime sind Ablagerungen, die vor allem aus Biofilmen sowie Holzfasern und verschiedenen im Papierprozess verwendeten Zusätzen bestehen. Die Kontrolle der Schleimbildung stellt eine dauerhafte Herausforderung beim Betrieb von Papierfabriken dar, da durch die Schleimbildung sowohl Rohmaterialien (z. B. Faserstoffe, Altpapier) als auch Prozesshilfsstoffe negativ verändert, unangenehme Gerüche verursacht, die Papierqualität beeinträchtigt, Hygieneprobleme im



Endprodukt verursacht (z. B. bei Verpackungsmaterialien für Lebensmittel) und die Funktionsfähigkeit der Papiermaschinen beeinträchtigt werden können. Neben konstruktiven Maßnahmen (z.B. Verwendung von Materialien und Oberflächen, die für Mikroorganismen schwer zu besiedeln sind, Vermeidung von Toträumen etc.), der Art der Prozessführung und Hygienemaßnahmen, insbesondere unter Einsatz von Bioziden (d.h. Mikroorganismen abtötende Mittel), wurden als weitere Alternativen zur Schleimkontrolle Enzyme, Bacteriophagen (das sind Bakterien befallende und abtötende Viren), die Einführung kompetierender Mikroorganismen sowie biologische Dispergiermittel zum Ablösen der Schleime erforscht. Kommerzialisiert sind Enzymmischungen, die Bestandteile der mikrobiellen Biofilme abbauen und damit das Ablösen der Schleime von Oberflächen unterstützen, sowie biologische Dispergiermittel, die in der Regel auch Biozide enthalten (Bajpai 2012, S. 263 ff.).

Enzymatische Entfernung von Druckfarben (De-inking): Bei der Papier-, Karton- und Pappproduktion wird in erheblichem Umfang Altpapier eingesetzt. Im Jahr 2013 verbrauchte die deutsche Zellstoff- und Papierindustrie 16,1 Mio. t Altpapier, das entsprach 72% der Papier-, Karton- und Pappproduktion (VdP 2014a). Um das Altpapier wiederverwenden zu können, müssen die Druckfarben entfernt werden. Dies erfolgt konventionell durch chemische Prozesse. Um Druckfarben auch enzymatisch aus Altpapierfaserstoffen entfernen zu können, wurde die Eignung von vielen Enzymen, insbesondere Lipasen, Esterasen, Cellulasen, Hemicellulasen, Pektinasen, Ligninasen, Amylasen und lignolytischen Enzymen untersucht. Entsprechende Enzympräparate sind kommerziell verfügbar. Ihr Einsatz kann zur Einsparung von Chemikalien, Verbesserung der Faserstoffqualität sowie zu Kostensenkungen beitragen. Eine Herausforderung für einen noch breitere Nutzung stellt es dar, Enzympräparate bereitzustellen, die für die jeweiligen Altpapiere, Druckfarben sowie Prozessparameter optimiert sind (Bajpai 2012, S. 139 ff.).

Kontrolle klebriger Verunreinigungen: Insbesondere bei der Verwendung von Sekundärfaserstoffen (z.B. aus Altpapier) sowie bei weitgehender Schließung von Wasserkreisläufen treten bei der Papierherstellung verstärkt Probleme durch klebrige Verunreinigungen, sogenannte »Stickies«, auf, die sowohl den Betrieb der Papiermaschinen als auch die Produktqualität beeinträchtigen können. Es stehen mechanische und chemische Verfahren zur Entfernung von Stickies zur Verfügung. Darüber hinaus sind Enzympräparate, basierend auf Esterasen, kommerziell verfügbar und im industriellen Einsatz, die bei bestimmten Stickiearten den konventionellen mechanischen und chemischen Methoden der Stickiekontrolle überlegen sind. Es ist Gegenstand der aktuellen Forschung und Entwicklung, weitere Enzympräparate zu entwickeln, die gegen das gesamte Spektrum der Stickies wirksam sind (Bajpai 2012, S. 307 ff.).

Bergbau und Metallgewinnung

7.

Mit dem Begriff »Biomining« werden technische Verfahren bezeichnet, die die Stoffwechselleistungen bestimmter Mikroorganismen nutzen, um Metalle aus Erzen oder Reststoffen zu gewinnen. Gelegentlich wird der Begriff »Bioleaching« synonym verwendet, obwohl er streng genommen nur diejenigen Bioprozesse bezeichnet, bei denen das jeweilige Metall in Lösung gebracht wird (Johnson 2014). Auch die Biooxidation spielt eine Rolle, bei der die Freisetzung des Metalls durch Auflösung des umgebenden Minerals begünstigt, das Metall selbst jedoch nicht in Lösung gebracht wird (Schippers 2009).

Beim *Bioleaching* werden eisen- und schwefeloxidierende Bakterien und Archaeen eingesetzt, um schwerlösliche Metallsulfide in wasserlösliche, auslaugbare Metallsulfate umzusetzen. Neben einem geringen Energiebedarf und einer hohen Kosteneffizienz zeichnen sich Biolaugungsverfahren dadurch aus, dass die Emission von Klimagasen und Schadstoffen in die Luft deutlich geringer ist als bei thermischen Erzverarbeitungsverfahren. Allerdings fallen große Mengen an schwefelsäurehaltigen Abwässern an, die neutralisiert und von Schwermetallen befreit werden müssen. Zudem sind Zeit- und Platzbedarf hoch.

Am häufigsten wird Bioleaching als Haufen- oder Haldenlaugung durchgeführt, wobei die zerkleinerten, zu Haufen aufgeschichteten Erze mit Schwefelsäure besprüht werden. Die durch die Stoffwechselaktivität der in diesen Halden lebenden Mikroorganismen gelösten Metalle treten in die Flüssigkeit über, die gesammelt und weiter aufgearbeitet wird. Geschlossene Bioreaktoren werden wegen der höheren Kosten nahezu ausschließlich für die Gewinnung von Gold und Kobalt verwendet. In kommerziell betriebene Anlagen werden zwischen 40 und mehr als 8.000 t goldhaltiges Konzentrat/Tag verarbeitet (Johnson 2014).

Ein anderer Reaktionstyp und Stoffwechselmechanismus liegt dem sogenannten heterotrophen Bioleaching zugrunde. Hierbei scheiden die dazu befähigten Mikroorganismen organische Säuren sowie biologische Komplexbildner (z.B. Siderophore) aus, die die Metalle aus den Feststoffen heraus in Lösung bringen. Das heterotrophe Bioleaching ist technisch weit weniger ausgereift als die bereits genannten oxidativen Prozesse, wird aber als vielversprechend für die Gewinnung von Metallen aus Reststoffen (z.B. Elektronikschrott, Kraftwerksaschen) eingeschätzt (Hennebel et al. 2015).

Biomining hat gegenüber nichtbiotechnischen Metallgewinnungsverfahren in den Fällen komparative Vorteile, in denen minderwertige oder komplexe, d.h. verschiedene Metalle enthaltende Erze ausgebeutet werden sollen. Ähnliches gilt, wenn die Erze größere Mengen an Arsen enthalten, die bei einem Schmelzprozess gasförmig emittiert würden, beim Biomining jedoch in der festen bzw. flüssigen Phase zurückgehalten werden können (Johnson 2014).



Weltweit werden etwa 15% der Kupferproduktion durch Biomining gewonnen (Johnson 2014); entsprechende kommerzielle Anlagen werden in Chile, Australien, Zypern, Peru, Myanmar, den USA und China betrieben (Brierley/Brierley 2013). 5% der weltweiten Goldproduktion erfolgt durch biooxidative Verfahren (Johnson 2014); aktive Länder sind Südafrika, Brasilien, Peru, Australien, Ghana, China, Russland, Kasachstan und Usbekistan (Brierley/Brierley 2013). Darüber hinaus sind in kleinerem Umfang Verfahren für die biotechnische, kommerzielle Gewinnung von Uran, Zink, Kobalt, Blei, Nickel und Molybdän etabliert. Aktuelle internationale Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zielen darauf ab, biohydrometallurgische Prozesse in folgender Hinsicht weiterzuentwickeln (Asghari et al. 2013; Brierley/Brierley 2013; Hennebel et al. 2015; Johnson 2014; Mishra/Rhee 2014):

- › Entwicklung von Biominingverfahren, die unter der Erdoberfläche, d.h. in bereits ausgebeuteten Bergwerken eingesetzt werden können,
- › Entwicklung neuer Bioleachingverfahren zur Gewinnung von Kupfer aus den häufig vorkommenden kupferhaltigen Erzen Pyrit und Enargit, die mit herkömmlichem Bioleaching nicht ausgebeutet werden können,
- › Entwicklung von Biominingverfahren zur Gewinnung von Metallen mit hoher strategischer Bedeutung. Hierzu zählen Antimon, Beryllium, Kobalt, Gallium, Germanium, Graphit, Indium, Magnesium, Niobium, Fluor, Metalle der Platingruppe, Seltene Erden, Tantal und Wolfram,
- › Entwicklung von Biominingverfahren für das »urban mining«, bei dem Metalle aus Reststoffen (z.B. Elektronikschrott, Kraftwerksaschen, aus der Krebstherapie bzw. Magnetresonanztomografie stammende platin- und gadoliniumhaltige Krankenhausabwässer und -abfälle, verbrauchte Katalysatoren) gewonnen werden,
- › Nutzung reduktiver Stoffwechselprozesse für die Entwicklung biohydrometallurgischer Verfahren,
- › Nutzung bioelektrochemischer Prozesse für die Metallgewinnung,
- › Nutzung der Fähigkeit von Pflanzen, Metalle zu akkumulieren, in technischen Prozessen (Phytomining),
- › Optimierung der Kombination von biotechnischen, chemischen, elektrochemischen und Schmelzverfahren zur Metallgewinnung.

Umweltbiotechnik: Abfall-, Abwasser-, Abgas- und Bodenbehandlung

8.

Seit Jahrzehnten werden biotechnologische Verfahren in der nachsorgenden Umwelttechnik eingesetzt, d.h. bei der Abwasserbehandlung in Kläranlagen, bei



der Bioabfallbehandlung, in Abluftreinigungsanlagen, bei der Sanierung kontaminierter Böden, von Gewässern und Grundwasser sowie von Sedimenten (Juwarkar et al. 2010 u. 2014; Rayu et al. 2012). Hierfür wird in erster Linie die natürlich vorkommende Mikroorganismenflora genutzt. Dabei handelt es sich meistens um Mischkulturen, deren Zusammensetzung nicht bekannt und kaum gezielt beeinflussbar ist. Grundsätzlich kann zwischen In-situ- und Ex-situ-Verfahren unterschieden werden. Bei In-situ-Verfahren werden die kontaminierten Umweltmedien ohne größere technische Eingriffe an ihrem natürlichen Standort einer biotechnischen Behandlung unterzogen. Dabei zielen die ingenieurtechnischen Maßnahmen darauf ab, den zum Abbau der Kontaminationen befähigten Mikroorganismen möglichst gute Stoffwechselbedingungen zu schaffen, z. B. durch Belüftung, durch Zufüttern limitierender Nährstoffe oder durch Einbringen von spezifisch zum Abbau befähigten Mikroorganismenkulturen. Bei Ex-situ-Verfahren werden die kontaminierten Medien meist in spezielle Anlagen oder Bioreaktoren verbracht, in denen weitere Prozessparameter gezielt kontrolliert und beeinflusst werden können. Ex-situ-Verfahren bergen auch das Potenzial, durch Metabolic Engineering optimierte Mikroorganismen einzusetzen (Juwarkar et al. 2014; Rayu et al. 2012).

Es ist Gegenstand der aktuellen Forschung, die Leistungsfähigkeit etablierter Verfahren weiter zu steigern, die Produktion von Biomasse als (unerwünschtes, aber unvermeidliches) Nebenprodukt der eigentlichen Abbau- und Reinigungsprozesse zu minimieren und den Flächen- und Bioreaktorvolumenbedarf der Verfahren weiter zu reduzieren (Miksch et al. 2015). Ein wesentliches Hemmnis für eine umfassendere Nutzung biotechnischer Umweltsanierungsverfahren liegt darin, dass aufgrund der komplexen, standortspezifischen Gegebenheiten, die das biotechnische Verfahren beeinflussen, der Sanierungserfolg, der notwendige Zeitbedarf und damit auch die Kosten zum Erreichen eines bestimmten Sanierungsziels nur eingeschränkt vorhersagbar sind. In dieser Hinsicht sind unspezifische, nichtbiologische Behandlungsverfahren (z. B. Verbrennung) oft im Vorteil. Vor diesem Hintergrund wird betont, dass es nicht ausreicht, die Stoffwechsellleistungen der beteiligten Mikroorganismengemeinschaften besser zu verstehen und zu beeinflussen. Vielmehr müsse dies flankiert werden von systematischen Aktivitäten zum Management des vorhandenen interdisziplinären Wissens und zur Modellierung, unter welchen standortspezifischen Gegebenheiten welches biotechnische Verfahren wie zu betreiben ist, um die jeweiligen Sanierungsziele zu erreichen (Majone et al. 2015). Im Folgenden wird ein Überblick über wichtige Beispiele für den Einsatz von biotechnischen Verfahren in der Umwelttechnik gegeben.



Abwasserbehandlung

Die Abwasserbehandlung in Kläranlagen umfasst in der Regel mindestens drei bis vier Verfahrensschritte: eine erste mechanische Stufe, in der ungelöste Stoffe mechanisch abgetrennt werden; eine zweite, biologische Stufe, die die Hauptreinigungsstufe darstellt und in der der Großteil der im Abwasser enthaltenen Schmutzstoffe durch Mikroorganismen verstoffwechselt und dadurch teilweise in Biomasse (Belebtschlamm) überführt, teilweise zu niedermolekularen Verbindungen abgebaut wird. In einer dritten Stufe wird der Klärschlamm vom Wasser abgetrennt und einer Stabilisierung und anschließenden weiteren Verwertung zugeführt. Eine weitergehende Abwasserreinigung, in der zusätzlich Stickstoff und Phosphor durch biologische oder chemische Verfahren aus dem Wasser entfernt werden, kann in einem vierten Verfahrensschritt erfolgen. Im Jahr 2010 gab es in Deutschland 9.632 öffentliche Kläranlagen. Der Anschlussgrad der Bevölkerung an öffentliche Kläranlagen lag bei 95,7%; rund 3% der Bevölkerung behandelten ihr Abwasser in Kleinkläranlagen. In den öffentlichen Kläranlagen wurden 2010 insgesamt knapp 10 Mrd. m³ Abwasser behandelt. Im Jahr 2010 wurden 99,9% der in Kläranlagen anfallenden Abwassermenge biologisch gereinigt (Umweltbundesamt 2014, S. 85). Innovationen in der Abwasserbehandlung zielen darauf ab, Stickstoff- und Phosphorverbindungen aus Abwässern und Klärschlämmen zurückzugewinnen, einer Nutzung zugänglich zu machen und dadurch Stoffkreisläufe zu schließen. Im Jahr 2010 wurden 98% der biologisch gereinigten Abwassermenge mit zusätzlichen Verfahren gereinigt: 99% der biologisch gereinigten Abwassermenge wurde einer Nitrifikation unterzogen, in der die Stickstoffverbindung Ammonium bzw. Ammoniak zu Nitrat oxidiert wird; aus 97% der biologisch gereinigten Abwassermenge wurde Nitrat durch den biotechnischen Prozess der Denitrifikation zu gasförmigem Stickstoff umgewandelt und so aus dem Wasser entfernt. Bei 93% wurde gezielt Phosphor entfernt (Umweltbundesamt 2014, S. 85).

In Deutschland werden die meisten biologischen Reinigungsstufen aerob betrieben, d.h., die Becken werden künstlich belüftet, um eine hohe Geschwindigkeit beim Abbau der Wasserverschmutzungen zu erzielen. Nachteilig sind der hohe Energiebedarf für die Belüftung sowie der hohe Anfall von Klärschlamm, der einer Entsorgung zugeführt werden muss. Klärschlamm aus häuslichen Abwässern enthält viele Nähr- und Humusstoffe. Je nach Abwasserart und Behandlungsverfahren kann Klärschlamm jedoch auch umwelt- bzw. gesundheitsgefährdende Stoffe enthalten. Im Jahr 2012 fielen in Deutschland 1,846 Mio. t Klärschlamm (Trockenmasse) zur Entsorgung an. Davon wurde mehr als die Hälfte (1,008 Mio. t; 55%) verbrannt, 30% (544.065 t) wurden in der Landwirtschaft als Düngemittel verwendet, 13% (235.439 t) wurden bei landschaftsbaulichen Maßnahmen wie z.B. Rekultivierungen oder Kompostie-



rungen eingesetzt, 2% wurden sonstigen stofflichen Verwertungen zugeführt (Statistisches Bundesamt 2014b).

Sowohl die biologische Abwasserbehandlung als auch eine Klärschlammbehandlung kann auch unter Luftabschluss, d.h. anaerob, erfolgen. Zwar ist die Umsetzungsgeschwindigkeit geringer als bei aeroben Verfahren. Vorteile liegen jedoch in der Entstehung von vergleichsweise deutlich geringeren Mengen an Klärschlamm, einem geringeren Energiebedarf sowie der Gewinnung von Biogas als Stoffwechselendprodukt des anaeroben Stoffwechsels.

Kompostierung

Unter Kompostierung versteht man den Abbau von leicht verwertbarem organischem Material (Biomasse in Form von z.B. Küchen- und Gartenabfällen, Bioabfall, Grünschnitt) durch Bakterien und Pilze unter Einfluss von Luftsauerstoff (aerob). Ein Teil der Biomasse wird bei der Kompostierung in Humus umgewandelt. Etwa 20 bis 40% des deutschen Siedlungsabfallaufkommens sind Bio- und Grünabfälle, von denen ein Großteil kompostiert wird. In der Abfallwirtschaft wird Kompostierung in großtechnischen Anlagen betrieben; zudem erfolgt in kleinem Maßstab auch Eigenkompostierung durch gärtnerisch tätige Betriebe und Personen. Kompost wird zur Düngung, zur Verbesserung der Bodeneigenschaften, bei der Rekultivierung und zur Herstellung von Pflanzkultursubstraten verwendet.

Biogasproduktion

Biogas kann sowohl aus gezielt für diesen Zweck erzeugter Biomasse (Energiepflanzenanbau) als auch aus Biomassereststoffen, z.B. aus landwirtschaftlicher Produktion hergestellt werden. Die eingesetzte Biomasse wird durch Mikroorganismen unter Luftabschluss, d.h. anaerob, zu Methan und Kohlendioxid verstoffwechselt. Das Methan wird in der Regel zur dezentralen, gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung in ein Blockheizkraftwerk weitergeleitet oder in einer Gasaufbereitungsanlage aufgearbeitet und in das bestehende Erdgasnetz eingeleitet. Im Jahr 2013 wurden in Deutschland 7.850 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 3,5 GW betrieben, die 27.900 GWh Strom und 11.800 GWh Wärme erzeugten. Die Einspeisekapazität für Biomechan belief sich im Jahr 2013 auf 86.395 Nm³/h in insgesamt 147 Anlagen. Die Biomasse, die zur Biogasgewinnung eingesetzt wurde, stammte 2013 etwa je zur Hälfte aus speziell zu diesem Zweck angebauten Energiepflanzen (48% des massebezogenen Substrateinsatzes in Biogasanlagen) und aus Reststoffen (52%; vor allem Exkrememente (Gülle, Mist, 44%) sowie industrielle und landwirtschaftliche Reststoffe (6%) und Bioabfall (2%)) (FNR 2014b).



Sanierung kontaminierter Standorte

Für die Beseitigung von Schadstoffen aus kontaminierten Böden kommen neben chemisch-physikalischen und thermischen Verfahren auch biologische Bodensanierungsverfahren zum Einsatz. Der Einsatz von Mikroorganismen zur Sanierung kontaminierter Standorte ist Stand der Technik und wird in Deutschland von mehreren Unternehmen als Dienstleistung angeboten (Frauenstein/Mahrle 2009): Im Jahr 2008 wurden in Deutschland insgesamt 100 Bodenbehandlungsanlagen mit einer Anlagenkapazität von mehr als 7 Mio. t/Jahr stationär betrieben. Davon nutzten 71 Anlagen (mit einer Kapazität von ca. 3,8 Mio. t/Jahr) biologische Verfahrensschritte.

Abluft- und Abgasbehandlung

Seit den 1980er Jahren werden sogenannte Biofilter eingesetzt, um Abluft zu behandeln, die mit Geruchsstoffen bzw. leicht flüchtigen organischen Substanzen belastet ist. Bei den Biofiltern handelt es sich um Festbettreaktoren, auf deren Filtermaterial Mikroorganismen immobilisiert sind. Die Abluft durchströmt das Filtermaterial. Die Abluftinhaltsstoffe werden daran adsorbiert und von den Mikroorganismen verstoffwechselt. In Deutschland werden tausende Biofilteranlagen zur Geruchsminderung insbesondere in Kläranlagen, Deponien, Müllaufbereitungsanlagen, Betrieben der Nahrungsmittelindustrie, Tierhaltungen, Schlachthöfen und Tierkörperbeseitigungsanstalten betrieben. Zudem werden Biofilter auch zur Behandlung lösemittelbelasteter Abluft in Industriebetrieben (z. B. Lackierung) eingesetzt. Eine neuere Entwicklung der Abgasbehandlung ist die stoffliche Verwertung von Kohlendioxid aus Industrieabgasen durch Mikroalgen (Kap. II.1.4).

Umweltanalytik

In der Umweltanalytik werden Biosensoren basierend auf Enzymen oder Mikroorganismen eingesetzt.

Automobilindustrie

9.

Die Automobilindustrie umfasst Unternehmen, die mit der Herstellung von Kraftwagen zur Personen- und Güterbeförderung, der Herstellung verschiedener Teile und Zubehör (Zulieferer) sowie mit der Herstellung von Anhängern, Aufbauten und Sattelanhängern befasst sind (Statistisches Bundesamt 2008a u. 2008b).



Die Automobilwirtschaft ist eine der bedeutendsten Branchen in Deutschland: Mit einem Umsatz von 362 Mrd. Euro erwirtschaftete sie im Jahr 2013 ca. 20% des Umsatzes des verarbeitenden Gewerbes. Rund 13% der Beschäftigten im verarbeitenden Gewerbe sind in der Automobilindustrie tätig (2013: 756.000 Beschäftigte). Bezieht man Vorleistungen in anderen Sektoren mit ein, können bis zu 1 Mio. Beschäftigte der Automobilindustrie zugeordnet werden. Die deutsche Automobilindustrie ist sehr exportorientiert sowie forschungs- und entwicklungsstark: Mit FuE-Aufwendungen von insgesamt 23,5 Mrd. Euro im Jahr 2012 wurden 6,6% des Umsatzes in Forschung und Entwicklung investiert. Innovationsschwerpunkte der Automobilindustrie liegen in den Bereichen (Bormann et al. 2014; Schade et al. 2014)

- > Effizienzsteigerung der Kraftfahrzeuge aus Gründen des Klimaschutzes und wegen steigender Preise für fossile Kraftstoffe,
- > Entwicklung alternativer Antriebe (z.B. Elektromobilität, Wasserstoff-Brennstoffzellen),
- > Effizienzsteigerungen in der Produktion, Verbesserungen der Produktionsprozesse,
- > Ausstattung der Fahrzeuge mit informationstechnischen Assistenz- und Kommunikationssystemen sowie
- > Mobilitätsdienstleistungen.

Folgende biobasierte Produktgruppen sind für die Automobilindustrie relevant:

- > biobasierte Kunst- und Werkstoffe,
- > Bioschmierstoffe,
- > biobasierte Lacke,
- > Kautschuk, der vor allem in der Reifenherstellung verwendet wird,
- > biobasierte Prozesschemikalien, z.B. Lösungsmittel, Entrostungsmittel, Klebstoffe,
- > Biokraftstoffe,
- > mikrobielle Brennstoffzellen bzw. biobasierte Energieträger für Brennstoffzellen.

Tabelle III.13 gibt eine Übersicht, in welchem Umfang diese Produktgruppen bereits in der Automobilindustrie eingesetzt werden. Biotechnische Verfahren sowie biobasierte Produktgruppen können insbesondere durch Wechsel der Rohstoffbasis aus Klimaschutz- und Kostengründen sowie zur Effizienzsteigerung der Kraftfahrzeuge (z. B. durch Leichtbau) einen Beitrag leisten. Biotechnische Entwicklungen bei Brennstoffzellen sind in einem noch zu frühen Entwicklungsstadium, um als alternative Antriebe mit anderen Optionen (z. B. Lithium-Ionen-Batterien) wettbewerbsfähig zu sein.



Tab. III.13 Mengen und Märkte biobasierter Produktgruppen in der deutschen Automobilindustrie 2011

biobasierte Produktgruppe	Mengen 2011 in t	Marktgröße in DE 2011 in Euro	Anmerkung
biobasierte Kunststoffe	12.000	84 Mio.	79.000 t in allen Sektoren in DE
naturfaserverstärkte Kunststoffe	40.000	70 Mio.	67.000 t in allen Sektoren in DE
Bioschmierstoffe	k.A.	k.A.	40.000 t in allen Sektoren in DE
biobasierte Lacke	k.A.	k.A.	140.000 t konventionelle Lacke im Automobilbau (Autoserienlacke 115.000 t; Autoreparaturlacke 25.000 t)
Naturkautschuk für Reifen	270.000	k.A.	
Biokraftstoffe, davon	3,7 Mio.	k.A.	energetischer Anteil der Biokraftstoffe am Gesamtkraftstoffverbrauch 5,9%
Biodiesel	2,4 Mio.		
Pflanzenöl	20.000		
Bioethanol	1,24 Mio.		

Eigene Zusammenstellung von Informationen aus FNR 2014c

Durch die Erschließung neuer Absatzmärkte für biobasierte Produkte (z. B. Biokunststoffe) kommt der Automobilindustrie eine wichtige Rolle für die weitere wirtschaftliche Entwicklung der Bioökonomie zu: Zum einen könnte sie als anspruchsvoller Leitkunde fungieren, der entsprechende Innovationen bei Vorleistern, z. B. der chemischen Industrie oder den Zulieferern, fördert und fordert. Zum anderen könnte sie signifikante Mengen biobasierter Produkte abnehmen, um sie in der Massenproduktion von Kraftfahrzeugen bzw. in den zum Automobilbau eingesetzten Maschinen und Anlagen einzusetzen. Dies sei anhand der folgenden groben Abschätzung des Kunststoffbedarfs für die Pkw-Produktion erläutert:

In einem modernen Pkw sind etwa 20 Gewichtsprozent der Bauteile aus Kunststoffen; dies sind ca. 100 bis 150 kg/Pkw (Rusu et al. 2011). Im Jahr 2013 betrug die Welt-Pkw-Produktion deutscher Automobilhersteller 14,1 Mio. Pkw, davon wurden 5,4 Mio. Pkw in Deutschland gefertigt. Legt man einen Kunststoffgehalt von 125 kg/Pkw zugrunde, lässt sich ein Kunststoffbedarf von



675.000 t für die Inlandsproduktion sowie von 1,8 Mio. t für die Weltjahres-Pkw-Produktion deutscher Hersteller errechnen. Wenn auch dieser Kunststoffbedarf allein wegen der materialtechnischen Eigenschaften nicht vollständig durch biobasierte Kunst- und Werkstoff ersetzt werden kann, so zeigt sich doch, dass die Automobilindustrie ein großer potenzieller Nachfrager nach biobasierten Kunst- und Werkstoffen sein könnte. Zum Vergleich: die weltweite Produktionskapazität biobasierter Kunststoffe beläuft sich zurzeit auf ca. 740.000 t, würde also rein rechnerisch in etwa ausreichen, um den zuvor errechneten Kunststoffbedarf für die Inlandsproduktion zu decken.

Tabelle III.13 zeigt, dass biotechnischen Verfahren und biobasierten Produktgruppen in der Automobilindustrie eine derzeit noch geringe Bedeutung zukommt. Als Haupthemmnis für einen breiteren Einsatz werden noch nicht wettbewerbsfähige Kosten genannt.





Ökonomische Perspektiven der industriellen Biotechnologie

IV.

In diesem Kapitel werden die wirtschaftliche Entwicklung und die wirtschaftliche Bedeutung der industriellen Biotechnologie untersucht. Es werden sowohl die bisherige Entwicklung als auch treibende und hemmende Faktoren für die zukünftige Entwicklung dargestellt. Es werden zunächst vier Aspekte näher betrachtet, die zentral sowohl für die Marktdurchdringung als auch die erfolgreiche Realisierung von wirtschaftlichen Effekten am Standort Deutschland sind; darauf aufbauend wird die bisherige und potenzielle volkswirtschaftliche Bedeutung analysiert, die von der Entwicklung der vier Aspekte abhängt:

Märkte für Produkte und Dienstleistungen (Kap. III.1): aktuelle und künftige Marktentwicklungen für relevante Produktgruppen (z.B. Fein- und Spezialchemikalien, Bulkchemikalien, Biopolymere, Enzyme etc.)

Industrieentwicklung und Geschäftsmodelle (Kap. III.2): Übersicht über die in diesem Bereich tätigen Unternehmen und ihre Geschäftsmodelle

(Kosten-)Wettbewerbsfähigkeit der industriellen Biotechnologie (Kap. III.3): Vorteilhaftigkeit biobasierter Produkte sowie (Kosten-)Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu konventionellen Produkten, insbesondere im Hinblick auf den Einfluss von Rohstoffkosten

Internationale Wettbewerbsfähigkeit (Kap. III.4): Bewertung der Position Deutschlands im internationalen Vergleich

Volkswirtschaftliche Bedeutung (Kap. III.5): Zu der volkswirtschaftlichen Bedeutung zählen die Schaffung und Sicherung von Arbeitsplätzen, Beiträge zur langfristigen nachhaltigen Wertschöpfung durch geringere Umweltbelastung und Beanspruchung von knappen Ressourcen durch die Industrie.

Marktentwicklung

1.

Viele mögliche Produkte und Verfahren der industriellen Biotechnologie befinden sich noch nicht in der Massenproduktion, aber zahlreiche Marktstudien sagen für die Zukunft ein deutliches Marktwachstum für die IBT voraus. Die Vorhersagen sind jedoch nicht einfach zu interpretieren. Die vorliegenden Marktabschätzungen verwenden unterschiedliche Abgrenzungen der industriellen Biotechnologie (z.B. im Hinblick darauf, ob Bioethanol einbezogen wird oder nicht), beziehen sich auf verschiedene Zeithorizonte und zeigen methodische Einschränkungen. Meist sind sie in großem Maße auf Einschätzungen von Experten basiert. Schwankungen der internationalen Rohstoffpreise, Veränderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen und technologische Fortschritte spielen bei diesen Entwicklungen eine große Rolle, sind aber sehr schwer vor-



herzusagen, wie die Ölpreisentwicklungen der letzten Jahre belegen. Folglich bestehen erhebliche Unsicherheiten bei der Abschätzung der Marktvolumina. Diese lassen sich auch nicht durch Vergleiche verschiedener Marktabschätzungen beheben, weil die Ausgangs- und Datengrundlagen der jeweiligen Studien oft zu unterschiedlich sind.

Das Ziel ist deshalb, die Ergebnisse der verschiedenen Marktstudien zusammenzufassen und die Bandbreiten bzw. Unsicherheiten zu verdeutlichen. In Tabelle IV.1 sind für die gesamte Chemie sowie für Teil- und weitere Märkte das weltweite Marktpotenzial, die erwarteten jährlichen Wachstumsraten sowie in Klammern die Anteile im jeweiligen Gesamtmarkt angegeben.

Die Marktgröße für biotechnologisch hergestellte Chemikalien wird für das Jahr 2012 bzw. 2013 auf eine Marktgröße zumeist etwas über 100 Mrd. Euro bzw. US-Dollar geschätzt, teilweise sind dies vorab gegebene Prognosen. Für das Jahr 2017 bzw. 2018 wird in vielen Studien eine Marktgröße von über 250 Mrd. Euro bzw. US-Dollar und im Jahr 2025 von über 500 Mrd. US-Dollar prognostiziert. Der Anteil biotechnologisch hergestellter Produkte am gesamten Chemiemarkt würde demnach deutlich steigen: vom niedrigen einstelligen Prozentbereich 2005 bis auf 20 bis 30 % im Zeitraum 2020 bis 2025 (Festel Capital 2012; USDA 2008). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die häufig zitierten, aber sehr hohen Schätzungen der USDA (2008) auf Abschätzungen der Marktanteile durch McKinsey basiert. McKinsey (2009) hat jedoch diese Zahlen selbst in späteren Abschätzungen erheblich nach unten korrigiert.

Insgesamt wird sowohl für Fein-, Spezial- und Basischemikalien als auch für Wirkstoffzwischenprodukte für Arzneimittel und Biokunststoffe jeweils ein erhebliches Wachstum erwartet. Die verschiedenen Marktstudien prognostizieren für die jeweiligen Teilmärkte ähnliche Wachstumsraten, z. B. bei Festel Capital (2009) mit einer Bandbreite der jährlichen Wachstumsraten von 17 bis 25 %. Die höchsten Anteile der Biotechnologie am jeweiligen Gesamtmarkt werden aktuell für Wirkstoffzwischenprodukte für Arzneimittel und Haushalts-/Spezialchemikalien geschätzt. Auch zukünftig wird vor allem für diese Bereiche eine sehr hohe Bedeutung erwartet. Der Markt für Bioplastik hat jüngst im Verpackungsbereich deutlich an Fahrt gewonnen. Coca Cola hat im Jahr 2011 erste Plastikflaschen in den Vertrieb gebracht, die zu 14 % aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen (BIO PET). Andere Lebensunternehmen (z. B. Heinz) haben bereits Lizenzen für die dahinter stehende Technologie erworben.

Auch für die Märkte der Zwischenprodukte zur weiteren Verarbeitung, wie kommerzielle Aminosäuren oder Enzyme, wird ein deutliches Marktwachstum prognostiziert. Für den Markt solcher Enzyme, die nicht einer bestimmten Anwendung zugeordnet werden können, wird ein jährliches Wachstum zwischen 4 und 6,5 % für die nächsten Jahre erwartet (OECD 2009).

1. Marktentwicklung

Tab. IV.1 Marktabschätzungen für die industrielle Biotechnologie (Umsatz absolut in Mrd. Euro oder Mrd. US-Dollar und in % des jeweiligen Gesamtmarkts)

Produktgruppe	Quelle	2005/ 2006	2007/ 2008	2010/ 2011	2012/ 2013	~2015	~2017/ 2018	~2020	~2025	Wachstumsrate*
biotechnisch hergestellte Chemikalien gesamt (Mrd. US-Dollar)	USDA 2008	21 (1,8%)		132-183					483-614 (22-28%)	k.A.
biotechnisch hergestellte Chemikalien gesamt (Mrd. US-Dollar)	Mc Kinsey (2009)	65 (6%)			88 (9%)					k.A.
biotechnisch hergestellte Chemikalien gesamt (US-Dollar)	Frost & Sullivan (2011c)		62			89		146		9%
biotechnisch hergestellte Chemikalien gesamt (Mrd. US-Dollar)	Frost & Sullivan (2013)		74 (4%)		182 (6%)		349 (12%)			17%
biotechnisch hergestellte Chemikalien gesamt (Mrd. Euro)	Festel Capital (2009)		48 (3,7%)				340 (15%)			22%
biotechnisch hergestellte Chemikalien gesamt (Mrd. Euro)	Festel Capital (2012)			91,9 (6,2%)		228 (12,1%)		515,1 (21,6%)		20%
biotechnologisch hergestellte Chemikalien gesamt (Mrd. Euro)	Rajagopal (2012)		56 (4%)		104 (6%)		264 (12%)			17%
Basischemikalien (Mrd US-Dollar)	USDA (2008)	0,9 (0,1%)		5-11					50-86 (6-10%)	k.A.
Basischemikalien (Mrd US-Dollar)	Frost & Sullivan (2013)			21,55		45,54		95,57		16%

Produktgruppe	Quelle	2005/ 2006	2007/ 2008	2010/ 2011	2012/ 2013	~2015	~2017/ 2018	~2020	~2025	Wachstumsrate*
Basischemikalien (Mrd. Euro)	Festel Capital (2009)	12 (1,5%)	34 (3,6%)	16,1 (4%)	34 (9%)	71 (19,5%)	113 (10%)			25%
Basischemikalien (Mrd. Euro)	Festel Capital (2012)									16%
Biopolymere (Mrd. US-Dollar)	USDA (2008)	0,3 (1,3%)	15-30					45-90 (10-20%)		k.A.
Biopolymere (Mrd. US-Dollar)	Frost & Sullivan (2011a)			0,24		4,1				33%
Biopolymere (Mrd. US-Dollar)	Frost & Sullivan (2013)			25,7		80,4		224,2		24%
Biopolymere (Mrd. Euro)	IFBB (2014)			3,5	4,4	12,3	14,9			27%
Spezialchemikalien (Mrd. US-Dollar)	USDA (2008)	5 (15,0%)		87-110					300-340 (45-50%)	k.A.
Spezialchemikalien (Mrd. US-Dollar)	Frost & Sullivan (2013)			29,29		68,84		119,6		15%
Spezialchemikalien (Mrd. Euro)	Festel Capital (2009)		15 (4,8%)		38 (9,1%)		73 (13,1%)			17%
Spezialchemikalien (Mrd. Euro)	Festel Capital (2012)			21,9		51,4 (11,5%)		89 (15%)		15%

1. Marktentwicklung

Produktgruppe	Quelle	2005/ 2006	2007/ 2008	2010/ 2011	2012/ 2013	~2015	~2017/ 2018	~2020	~2025	Wachstumsrate*
Feinchemikalien (Mrd. US-Dollar)	USDA (2008)	15 (2,0%)		25-32					88-98 (45-50%)	k.A.
Haushaltschemikalien (Mrd US-Dollar)	Frost & Sullivan (2013)			24,42		57,44		139		19%
Haushaltschemikalien (Mrd. Euro)	Festel Capital (2009)		11 (5,4%)		32 (11,7%)		84 (22,3%)			23%
Haushaltschemikalien (Mrd. Euro)	Festel Capital (2012)			18,2		42,9 (14,4%)		103,7 (25,5%)		19%
Wirkstoffzwischen- produkte für Arznei- mittel (Mrd. US-Dollar)	Frost & Sullivan (2011c)				22,1			52,3		9%
Wirkstoffzwischen- produkte für Arznei- mittel (Mrd. US-Dollar)	Frost & Sullivan (2013)			22,0		53,2		111,7		17%
Wirkstoffzwischen- produkte für Arznei- mittel (Mrd. Euro)	Festel Capital (2009)		10 (18,7%)		31 (33,7%)		70 (47,9%)			21%
Wirkstoffzwischen- produkte für Arznei- mittel (Mrd. Euro)	Festel Capital (2012)			16,5 (28%)		39,7 (40,1%)		83 (53,2%)		17%

* Die Wachstumsraten beziehen sich auf den Zeitpunkt der Zukunftsprognose der Schätzungen; dies sind i. d. R. die Jahre 2010/2011 oder 2012/2013

Eigene Zusammenstellung auf Basis der angegebenen Quellen

Es ist allerdings zu beachten, dass diese Marktabschätzungen mit hohen Unsicherheiten verbunden sind. So mussten auch in der Vergangenheit Marktprognosen erheblich revidiert werden. Diese hatten bereits für 2010 einen Anstieg der Biochemikalien am Chemiegesamtmarkt auf 15 bis 20% erwartet (BMBF 2007; Frost & Sullivan 2003; McKinsey 2003), doch dürfte der aktuelle Anteil in der Größenordnung deutlich unter 10% liegen. Ein weiteres Beispiel für die Unsicherheiten der Marktentwicklung zeigt eine Analyse von Hirth (2010), bei der verschiedene Prognosen von einigen früheren Marktstudien zu Polymere und Schmierstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen mit der tatsächlichen Entwicklung sowie aktuellen Marktstudien verglichen wurden. Demnach konnte die prognostizierte Entwicklung zwischen 2002 und 2010 nicht annähernd erreicht werden,⁵ dass Wachstum war in beiden Fällen nicht einmal halb so hoch wie angenommen. Gleichzeitig wird für den Zeitraum 2010 bis 2020 aber ein absolut noch höheres Wachstum als zwischen 2002 und 2010 in den Marktstudien für diese Produktgruppen erwartet (Hirth 2010).

Ob die Gründe für diese Diskrepanz von Prognosen und tatsächlicher Entwicklung schlicht in einer zu einer optimistischen Sichtweise der Akteure liegen (und auch für die aktuellen Prognosen zutreffen) oder in schwer vorhersehbaren Entwicklungen in dieser Branche, bleibt offen: In der Regel wird bei den Marktabschätzungen nicht angegeben, welche Rahmenbedingungen zugrunde gelegt wurden. Generell lassen sich viele Treiber und Barrieren für die verschiedenen Märkte feststellen. Zahlreiche Studien (u. a. BIO-TIC 2014a; Carus et al. 2010; Frost & Sullivan 2011c; Nusser et al. 2007; Pöyry 2010; Wydra et al. 2010) haben verschiedene Barrieren im Innovationsverlauf und entlang der Wertschöpfungskette identifiziert und detailliert analysiert. Hierzu zählen z. B. Verfügbarkeit von günstiger Biomasse; technische Probleme bei der Hochskalierung biotechnologischer Prozesse; Probleme bei Messung und Kommunikation von Produkteigenschaften, Finanzierungsprobleme von Pilot- und Demonstrationsanlagen. In den folgenden Kapiteln wird eine Reihe von wirtschaftlichen Aspekten diskutiert, welche bislang vergleichsweise wenig im Fokus bisheriger Analysen standen, aber eine hohe Relevanz für die kommerzielle Entwicklung der industriellen Biotechnologie haben.

5 Hirth (2010) vergleicht nur die aktuellen Daten bis 2008, die Ergebnisse der Marktanalyse der FNR (2014c) deuten aber darauf hin, dass zwischen 2008 und 2010 eher eine stagnierende Entwicklung beim Absatz in diesen Bereich stattgefunden hat.

Industrielle Entwicklung und Geschäftsmodelle 2.

Die Skizzierung der Unternehmenslandschaft und der Geschäftsmodelle in der industriellen Biotechnologie ist aus mehreren Gründen schwierig:

Die Wertschöpfungsketten in der industriellen Biotechnologie sind sehr lang und komplex. In der Regel müssen mehrere Unternehmen in diesen Wertschöpfungsketten zusammenwirken. Die Heterogenität der biobasierten Produkte ist sehr groß und reicht von Feinchemikalien bis hin zu Massenchemikalien, verschiedenen Textilien, Autointerieur oder perspektivisch z.B. auch Reifen. Die einzelnen Produkte können dabei ihre ganz eigenen Wertschöpfungsketten besitzen, und es können unterschiedlichste Akteurskonstellationen auftreten.

Ein großer Teil der biotechnologischen Aktivitäten findet nicht unbedingt in den dedizierten, d.h. spezialisierten Biotechnologieunternehmen statt, sondern in großen diversifizierten Chemieunternehmen, die nicht schwerpunktmäßig in der Biotechnologie tätig sind. Diese Unternehmen weisen häufig den Anteil der Umsätze oder Zahl der Mitarbeiter, die auf die IB-Aktivitäten zurückzuführen sind, nicht aus.

Um eine bessere Einschätzung von Unternehmensaktivitäten in der industriellen Biotechnologie zu erhalten, werden zwei wichtige Aspekte näher dargestellt. Erstens werden die zunehmenden Aktivitäten bei Massenprodukten (vor allem Bulkchemikalien) betrachtet, denn diese liefern Indizien für die Aktivitäten großer Chemieunternehmen. Zweitens wird die Entwicklung dedizierter IBT-Unternehmen betrachtet. Diese sind teilweise auch bei der biotechnologischen Forschung und Entwicklung von Bulkchemikalien – meist in der Funktion als Auftragsforscher bzw. Forschungsdienstleister – beteiligt, sie sind aber vor allem in anderen Bereichen (Fein-/Spezialchemikalien) aktiv.

Unternehmensaktivitäten und Kooperationen bei Bulkchemikalien

Zwar werden nur wenige Bulkchemikalien bisher biotechnologisch produziert. In jüngerer Vergangenheit haben aber die industriellen Aktivitäten an Dynamik gewonnen. Dies lässt sich daran ablesen, dass eine zunehmende Zahl von Produktionsstätten aufgebaut sowie eine ganze Reihe von Pilot-/Demonstrationsvorhaben durchgeführt werden (Kap. III.3).

Bei der Forschung und Entwicklung und dem Aufbau von Produktionsanlagen für Bulkchemikalien sind vor allem Unternehmen aus drei Bereichen aktiv: Unternehmen aus dem traditionellen Chemiegeschäft, aus dem Agro-Food-Bereich sowie (Bio-)Technologiespezialisten. Die verschiedenen Akteure haben dabei in der jüngeren Vergangenheit zunehmend ihre Aktivitäten und Geschäftsmodelle weiterentwickelt und bauen entweder verstärkt internes bio-

technologisches Know-how auf und/oder führen zunehmend Kooperationen mit Know-how-Trägern durch. Denn in der Regel ist die Kombination des Wissens dieser unterschiedlichen Akteure notwendig, um eine effiziente biobasierte Wertschöpfungskette aufzubauen.

Es gibt dabei aber kein einheitliches Kooperations- oder Geschäftsmodell. Vielmehr lassen sich gerade bei den Chemieunternehmen unterschiedliche Strategien feststellen. Die Unternehmen unterscheiden sich darin, wie bedeutend die Biotechnologie für ihre Tätigkeiten ist und ob sie stark internes Know-how aufbauen oder stärker auf Kooperationen mit anderen Unternehmen setzen. Beispielsweise unterscheidet Rupp-Dahlem (2011) konkret zwischen folgenden Unternehmenstypen, die im Bereich der industriellen Biotechnologie aktiv sind:

Integrierte Prozessentwickler/Bioraffinerien: Diese sind vor allem Unternehmen mit einem Hintergrund aus dem Agrar-/Lebensmittelbereich, die Expertise in enzymatischen Konversionen und mikrobiellen Fermentationen besitzen (z. B. ADM, Cargill, Tate & Lyle, Roquette).

Technologiespezialisten: Diese Unternehmen verfügen vor allem über biotechnologisches Know-how und kommen entweder aus der traditionellen Enzymherstellung (z. B. Genencor, Novozymes) oder sind jüngere Hightechunternehmen (z. B. BRAIN).

Hybridunternehmen Chemie/Lifesciences: Diese Unternehmen besitzen sowohl eine interne »Biotechnologie- als auch Chemiekultur« (z. B. DSM, DuPont, Evonik).

Bioorientierte Chemieunternehmen: Diese Unternehmen setzen mittelfristig auf biotechnologische Produkte, haben aber ihr Know-how noch vorrangig in der Chemie (z. B. Archema, Braskem, Dow, Solvay, Rhodia).

Reine Chemieunternehmen: Diese Unternehmen führen kaum eigene biotechnologische Aktivitäten durch, kooperieren aber durchaus mit anderen Unternehmen im Bereich der biobasierten Produkte (z. B. Eastman, EXXON Mobil). Das vorrangige Ziel ist es, ein umweltfreundlicheres Design der Produkte als bisher zu erreichen. Falls biotechnologische Verfahren hier als vielversprechend eingeschätzt werden, werden sie in eigene Abläufe integriert.

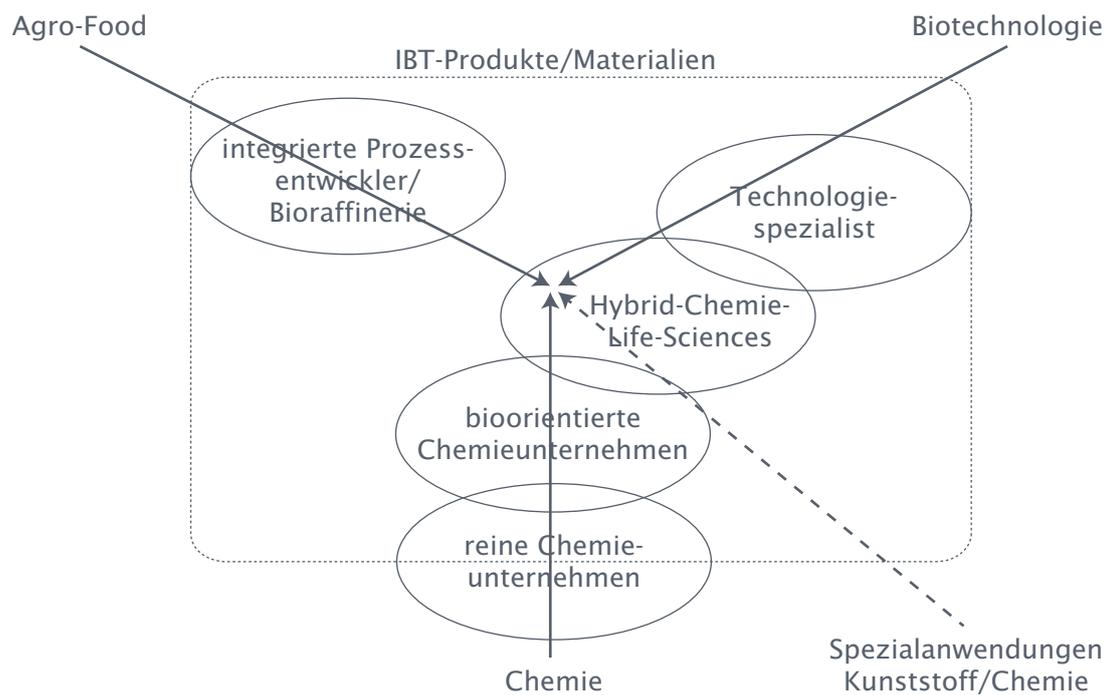
Neben diesen Entwicklungen lassen sich auch zunehmend Aktivitäten von Unternehmen außerhalb des klassischen Chemiebereichs beobachten.

Spezialanwender Kunststoff/Chemie: Es handelt sich häufig um Anwender (z. B. im Verpackungsbereich), die nachfrageseitig Innovationsdruck ausüben oder zumindest die Bereitschaft zur Nutzung biobasierter Produkte signalisieren. Zum Teil gehen die Unternehmen aber auch direkte FuE-Kooperationen ein, wie z. B. der Reifenhersteller Goodyear und der Enzymspezialist Genencor für die biotechnische Herstellung von Isopren.

Abbildung IV.1 zeigt schematisch, wie sich unterschiedliche Unternehmenstypen strategisch zunehmend in Richtung der biobasierten Chemie bzw.

biobasierter Materialien entwickeln. Die Pfeile sollen in Pfeilrichtung die Stärke der Orientierung der Unternehmenstypen aus den traditionellen Branchen in Richtung Biotechnologie verdeutlichen, es handelt sich bei den Pfeilenden nicht um einen Zielpunkt, den alle Unternehmen erreichen werden.

Abb. IV.1 Unternehmenstypen in biobasierter Chemie/ biobasierten Materialien



Eigene Darstellung

Wenn man die Kooperationen zwischen diesen Unternehmenstypen genauer betrachtet, so lassen sich unterschiedliche Kooperationsformen finden: Teils kooperieren Partner aus allen drei Bereichen (Agro-Food, Biotechnologie, Chemie oder anderes Anwendungsfeld), oder aber Partner aus zwei dieser Felder. Beispiele für Kooperationen beim Bau bzw. Betrieb von Produktionsanlagen oder für die Durchführung von strategischen FuE-Projekten sind:

- > Agro-Food und Hybrid: Roquette–DSM
- > Agro-Food und Biotechnologie: ADM–Metabolix (mittlerweile beendet); Cargill–Novozymes; Tate & Lyle–Genomatica
- > Agro-Food, Biotechnologie und Hybrid: Tate & Lyle–Genencor–DuPont
- > Agro-Food, Biotechnologie und bioorientierte Chemie: Roquette–Metex–Solvay
- > Biotechnologie und Hybrid: DuPont–Genencor



- > bioorientierte Chemie und Biotechnologie: Braskem–Novozymes
- > Biotechnologie und Spezialchemie: Genencor–Goodyear; Amyris–Michelin

Somit differenziert sich das Bild der Akteure und ihrer Kooperationen zunehmend aus. Dabei handelt sich sicherlich um eine Momentaufnahme. Bislang ist noch nicht abzusehen, wie sich die Industriestruktur weiterentwickelt. Es ist zudem zu beachten, dass sich diese Betrachtung vor allem auf den Markt der Bulkprodukte bezieht, aber nicht Märkte wie Fein- oder Spezialchemikalien, Lebensmittel etc. abdeckt. Gerade hier sind in einem stärkeren Maße spezialisierte Technologie-Start-ups oder kleine und mittlere Unternehmen (KMU) tätig.

Industriestruktur der KMU

Seit einigen Jahren wird in Expertenkreisen diskutiert, welche Rolle KMU in der industriellen Biotechnologie spielen können. Insgesamt zeigt sich eine deutlich geringere Gründungsdynamik als in den Gründungswellen in der roten Biotechnologie. Als mögliche Gründe gelten die unterschiedlichen sektoralen Rahmenbedingungen in der Chemieindustrie (Wydra et al. 2010): Der Anteil der FuE-Aufwendungen an der Bruttowertschöpfung ist in der Chemieindustrie deutlich geringer als in der Pharmaindustrie. Gerade FuE-Aktivitäten werden aber häufig von KMU durchgeführt. Die Dominanz von Großunternehmen in Teilen der Chemieindustrie erschwert es den Gründungswilligen, in diesen zumeist kapitalintensiven Bereichen Nischen zu finden, die von KMU besetzt werden können. Zudem haben einige Großunternehmen aus der Fein-/Spezialchemie eigenes biotechnologisches Know-how aufgebaut (z. B. Aldrich Sigma, DSM, Evonik, Wacker). Die Hochschulforschung hat eine höhere Affinität zu pharmazeutischen Anwendungen und zur Feinchemie. Gerade in letzterem Bereich gibt es auch einige KMU in der industriellen Biotechnologie.

Im Folgenden werden die aktuelle Situation und die Tätigkeitsbereiche der KMU in der industriellen Biotechnologie in Deutschland näher skizziert. Anzahl und Umsätze der KMU in der industriellen Biotechnologie lassen sich näherungsweise anhand der jährlichen Umfrage der Plattform biotechnologie.de im Auftrag des BMBF bestimmen, die sich in ihrer Klassifikation an Leitlinien der OECD (2005) orientiert. Die OECD unterscheidet dabei zwischen zwei Arten von Biotechnologieunternehmen (biotechnologie.de 2014):

Dedizierte Biotechnologieunternehmen: Ihre Hauptaktivität ist die Anwendung biotechnologischer Verfahren zur Herstellung von Waren bzw. zur Bereitstellung von Dienstleistungen und/oder zur Durchführung biotechnologischer Forschung und Entwicklung.

Sonstige biotechnologisch aktive Unternehmen: Diese wenden biotechnologische Verfahren in Herstellungsprozessen an oder nutzen sie für neue oder wesentlich verbesserte Produkte. Dabei besteht das wesentliche Unternehmensziel nicht vorrangig in der Anwendung biotechnologischer Verfahren zur Herstellung von Produkten oder der Bereitstellung von Dienstleistungen oder der Durchführung biotechnologischer Forschung und Entwicklung (z. B. Pharma- und Chemieunternehmen, Saatguthersteller u. Ä.). Diese Biotechnologieunternehmen können zudem nach dem Anwendungsschwerpunkt ihrer Produkte unterschieden werden (Medizin/Gesundheit, industrielle Anwendungen etc.).

Die Umfrage von biotechnologie.de enthält im Anwendungsbereich der industriellen Biotechnologie nur Informationen zu den Aktivitäten der dedizierten Biotechnologieunternehmen. Aktivitäten der anderen biotechnologisch aktiven Unternehmen, darunter vor allem Großunternehmen (u. a. BASF, Evonik, Wacker) werden nicht anwendungsbereichsspezifisch ausgewiesen. Nicht zuletzt deshalb nimmt die industrielle Biotechnologie innerhalb der Biotechnologie scheinbar weiterhin eine untergeordnete Rolle ein (Tab. IV.2).

Tab. IV.2 Kennzahlen zur Biotechnologiebranche in Deutschland

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Zahl der Unternehmen								
gesamt	495	496	501	531	538	552	565	570
davon IBT	36	38	45	51	56	58	61	58
Anteil IBT	7,2 %	7,6 %	9 %	9,6 %	10,4 %	10,5 %	10,8 %	10,1 %
Umsatz (in Mrd. Euro)								
gesamt	1,76	2,01	2,19	2,18	2,37	2,62	2,90	2,86
davon IBT	k. A.	0,05	0,054	0,129	0,143	0,178	0,193	0,206
Anteil IBT	k. A.	2,5 %	2,5 %	5,9 %	6,0 %	6,8 %	6,7 %	7,2 %

Quelle: biotechnologie.de 2007–2014

Die Bedeutung von dedizierten Biotechnologie-KMU mit Schwerpunkt in den industriellen Anwendungen nimmt aber immerhin sowohl absolut als auch relativ gegenüber der gesamten Biotechnologie zu (Tab. IV.2). Mittlerweile liegt der Anteil der IBT-Unternehmen bei ca. 10%. Der Anteil am Umsatz liegt mit knapp 7% im Jahre 2010 etwas darunter, die Tendenz ist aber ebenfalls steigend. In absoluten Zahlen hat sich der Umsatz im Sechs-Jahres-Zeitraum 2007 bis 2013 von 50 Mio. Euro auf 206 Mio. Euro vervierfacht, die Zahl der Unternehmen von 38 auf 58 erhöht. Dabei handelt es sich vermutlich nicht ausschließlich um Neugründungen, sondern auch um Schwerpunktverlagerungen existierender Unternehmen. In der Umfrage für das Jahr 2013 wurden diese Unterneh-



men daraufhin analysiert, für welche Branchen sie aktiv sind (Mehrfachzuordnungen waren möglich). Demnach ist der Großteil der dedizierten Biotechnologieunternehmen in der industriellen Biotechnologie im Bereich Nahrungs-/ Futtermittel (33) und Pharmaproduktion (29) aktiv. Auf den weiteren Plätzen folgen die Branchen Chemie (20), Kosmetik (18) und Energie (9).

Innerhalb der dedizierten Biotechnologieunternehmen, die in der IBT tätig sind, lassen sich verschiedene Geschäftsmodelle unterscheiden, die vor allem in ihrer strategischen Positionierung differieren. Sie lassen sich grob in Dienstleister, Technologieanbieter und Produktentwickler einteilen. *Dienstleister* sind vorrangig Start-ups und KMU, deren Hauptgeschäft die Auftragsforschung ist (Eckert 2010). Forschungsarbeiten werden lediglich auf Anfrage von Anwendern durchgeführt und stützen sich auf die spezifischen Kernkompetenzen von Start-ups/KMU. Die geschaffene Wertschöpfung der KMU reduziert sich auf den FuE-Bereich und ist eher gering. *Technologieanbieter* betreiben – im Gegensatz zu Dienstleistern – Forschung in Eigeninitiative. Sie setzen das gewonnene Know-how in neue Technologien um oder integrieren mehrere Ansätze in Plattformtechnologien. Die Ergebnisse verkaufen sie meist in Form von Lizenzen an andere Unternehmen. *Produktentwickler und -hersteller* bieten fertige Produkte und Prozesse für den Anwender an. Sie führen neben der Forschung und Entwicklung auch die Fertigung und Vermarktung der entstehenden Produkte und Prozesse durch (Eckert 2010).

Die Start-ups und KMU sind meist forschungsnah und eher im Bereich der Dienstleister und Technologieanbieter angesiedelt. Dies liegt nicht zuletzt an ihrem meist guten Zugang zu neuen Forschungsergebnissen aufgrund ihrer Nähe zu Universitäten und Forschungseinrichtungen. Eine ungefähre Einschätzung der Firmenaktivitäten lässt sich anhand der zur der Umfrage zugehörigen Unternehmensdatenbank von »www.biotechnologie.de« treffen. Fast alle dedizierten Biotechnologieunternehmen, die IBT als Unternehmensschwerpunkt angeben, sind in der Forschung tätig, gut drei Viertel der Unternehmen bieten Dienstleistungen und knapp über die Hälfte bietet Produkte am Markt an. Die Produktherstellung ist aber bislang zumeist auf hochpreisige Nischenprodukte in der Fein-/Spezialchemie beschränkt (Wydra et al. 2010). Insgesamt hat fast die Hälfte der Unternehmen weniger als zehn Mitarbeiter und ein weiteres Viertel weniger als 20 Mitarbeiter.

Es handelt sich demnach vorrangig um sehr kleine Unternehmen, die sich an einer frühen Stelle in der Wertschöpfungskette befinden. In einigen Fällen lässt sich nach Expertenaussagen bereits eine Transformation weg von der Rolle als Dienstleister hin zu hybriden Geschäftsmodellen mit Dienstleistungs- und Produktionsaktivitäten beobachten. Diese Aktivitäten können dazu beitragen, das Marktpotenzial biobasierter Produkte künftig besser ausschöpfen zu können. So könnte eine größere Anzahl diversifizierter KMU zunehmend solche

Märkte durch neue Produkte und Dienstleistungen schaffen, die für Großunternehmen aufgrund einer begrenzten Größe (zunächst) unattraktiv sind. Allerdings lässt sich bislang nicht absehen, ob es tatsächlich zu deutlichen Veränderungen in der gesamten Branche kommen wird. Zumindest sind einige Barrieren ersichtlich bzw. denkbar:

Erstens haben die KMU neben geringen Erfahrungen bei der Skalierung von Produktionsprozessen häufig Finanzierungsengpässe bei der Beschaffung kapitalintensiver Ausrüstung. Daneben werden gerade für Vertriebskapazitäten erhebliche Ressourcen benötigt, die KMU und Start-ups nicht zur Verfügung stehen. Zusätzlich zu den allgemein bestehenden Engpässen bei der Bereitstellung von Risikokapital ist die Situation in der industriellen Biotechnologie nochmals schlechter, da die Aufmerksamkeit gegenüber und die Akzeptanz der industriellen Biotechnologie bei Investoren als gering gelten. Gerade die Finanzierung von Pilotanlagen, welche die häufig geforderten positiven Beispiele liefern könnten, ist unattraktiv, da hier mittelfristig kaum hohe Renditeaussichten bestehen (OECD 2010a u. 2010b). Außerdem herrscht große Unsicherheit in Bezug auf die tatsächlich realisierbare Nachfrage nach Produkten der industriellen Biotechnologie und die damit verbundene Umsetzung neuer Wertschöpfungsketten. Ebenfalls eher geringe Finanzierungsmöglichkeiten bestehen hier durch die staatliche Förderung, die sich vor allem auf die Start-up-Phase der Unternehmen konzentriert (Wydra et al. 2010).

Zweitens ist es durchaus denkbar, dass längst nicht alle Unternehmen eine sehr offensive Wachstumsstrategie verfolgen (OECD 2010b): Demnach versuchen die Unternehmen meist ein organisches Wachstum über interne Forschung und Entwicklung und Finanzierung durch operationales Einkommen zu erreichen, welches in der Regel nicht für eine deutliche Ausweitung der Aktivitäten ausreicht. Es lässt sich aber nicht eindeutig klären, inwieweit dies eine »vorsichtige Strategie« der Unternehmen oder der schwierigen Finanzierungssituation der Unternehmen zuzuschreiben ist.

Internationale Wettbewerbsfähigkeit

3.

Eine hohe internationale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in der industriellen Biotechnologie ist von zentraler Bedeutung für die Realisierung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale im Inland. Weil es international nur wenige vergleichbare Daten gibt, ist eine Bestimmung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in der industriellen Biotechnologie nur begrenzt möglich. Im Folgenden erfolgt eine Annäherung über die Diskussion von vier Indikatorgruppen, die wichtige Stufen in der Innovations- und Wertschöpfungsketten der IBT abdecken:



- › Beurteilung der technologischen Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der industriellen Biotechnologie auf Grundlage von Patentanmeldungen;
- › Internationaler Vergleich der Anzahl der dedizierten Biotechnologieunternehmen mit Schwerpunkt in der industriellen Biotechnologie;
- › Beurteilung der Wettbewerbsfähigkeit anhand der Exporte bei existierenden Produkten im Bereich der industriellen Biotechnologie
- › Standortvergleich der operierenden und angekündigten Produktionsstätten.
- › Die verfügbaren Daten zu diesen Indikatoren decken allerdings jeweils nicht komplett deckungsgleiche Teilbereiche der industriellen Biotechnologie ab. Dies wird im Folgenden dargelegt und bei der Interpretation berücksichtigt.

Patententwicklung

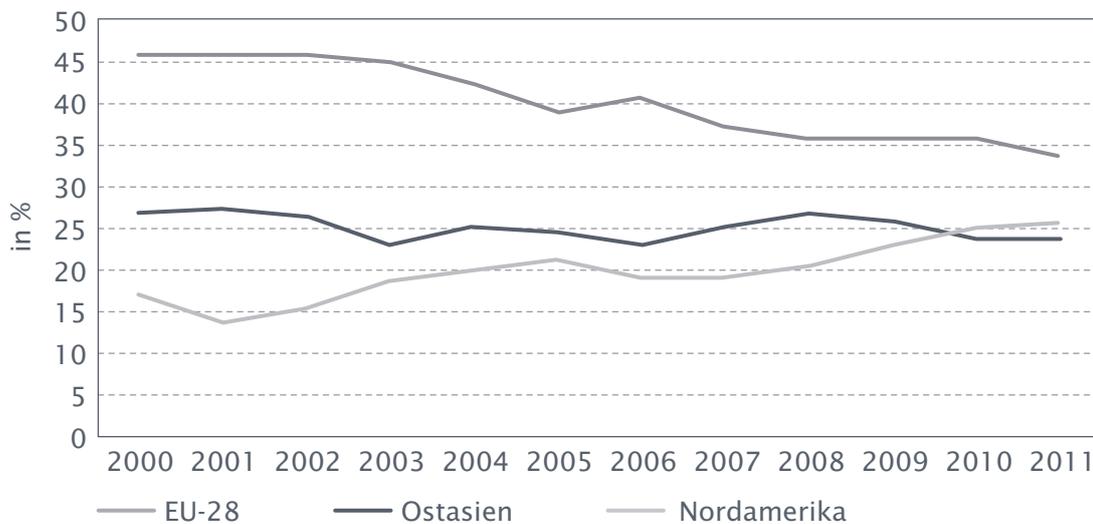
Patentdaten sind eine der wichtigsten Quellen zur Beurteilung der technologischen Wettbewerbsfähigkeit eines Landes. Patentanträge beziehen sich auf technische Erfindungen, die einen bestimmten Zustand des Machbaren erreicht haben, und stellen damit den erfolgreichen Abschluss einer Phase von FuE-Anstrengungen dar. Es ist aber zu beachten, dass eine eindeutige Zuordnung der Erfindungen und Innovationen zu den verschiedenen Feldern der Biotechnologie grundsätzlich nicht möglich ist. So lassen sich zwar Patente für Enzyme und Biochemikalien einigermaßen konkret identifizieren. Ob diese Produkte jedoch für medizinische, agrarische oder eben industrielle Zwecke genutzt werden, bleibt bei einer Analyse der Patentdaten zunächst unbekannt (Aschhoff et al. 2010).

Im Rahmen dieser Studie konnte keine eigene Patentanalyse durchgeführt werden. Stattdessen werden Ergebnisse dargestellt, die im Rahmen des »Key Enabling Technology Observatory« ermittelt wurden. Die industrielle Biotechnologie ist von der Europäischen Kommission als eine von sechs Schlüsseltechnologien identifiziert worden und wird daher in dem entsprechenden spezifischen Monitoring mit berücksichtigt. Dort werden Patentanmeldungen von 47 bedeutenden Ländern mit hohen Aktivitäten bei Schlüsseltechnologien am Europäischen Patentamt ausgewertet. Es werden keine absoluten Werte ausgewiesen, sondern relative Indikatoren die im internationalen Vergleich die Weltanteile, die jeweilige Bedeutung und die Spezialisierung in verschiedenen Ländern widerspiegeln.

Bei den Anteilen an allen am Europäischen Patentamt angemeldeten Patenten zeigt sich in der industriellen Biotechnologie eine deutliche Dominanz von Nordamerika (vor allem USA), allerdings mit rückläufigem Trend (Abb. IV.2). So stammte Anfang des Jahrestausend noch fast die Hälfte der Patente aus Nordamerika (46%), im Jahr 2011 waren es nur noch rund 34%. Im Gegenzug konnte Ostasien stetig zulegen und repräsentiert einen Anteil von rund 25% im

Jahr 2011. In Europa zeigt sich bis 2009 eine recht stabile Entwicklung, danach fällt aber der Anteil auf rund 23 % im Jahr 2011. Bei der Betrachtung einzelner Länder (Abb. IV.3) zeigt sich in Deutschland ein negativer Trend, der Anteil nimmt von rund 11 % auf 7 % im Jahr 2011 ab. Damit liegt Deutschland hinter den USA und Japan aber immerhin weltweit an dritter Stelle.

Abb. IV.2 Anteil an den weltweiten Patenten in der industriellen Biotechnologie von 2000 bis 2011, nach Region der Anmelder

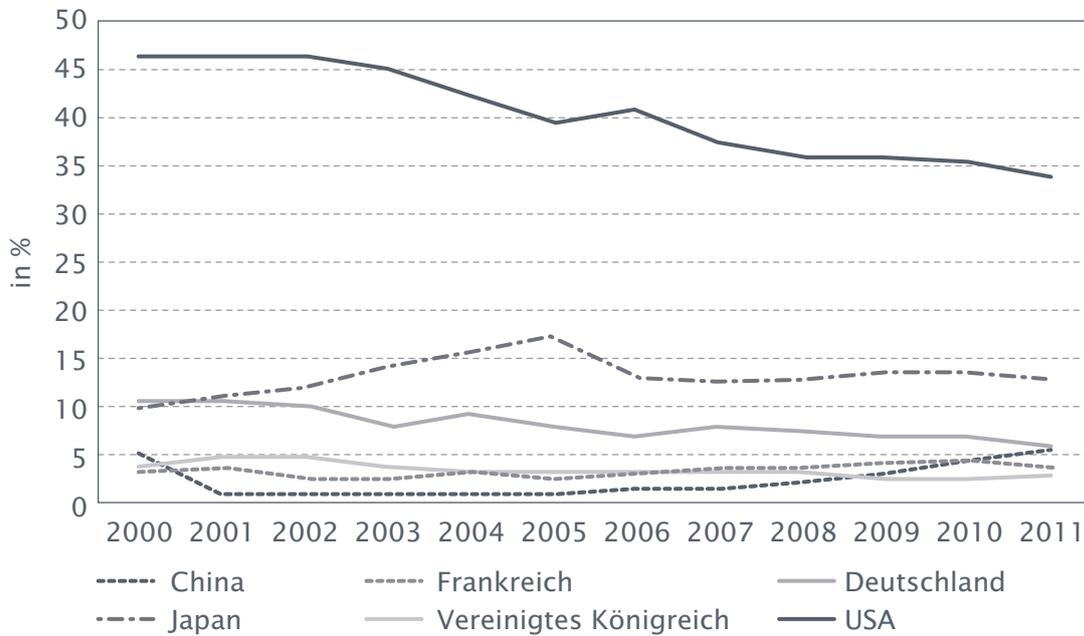


Quelle: <https://webgate.ec.europa.eu/ketsobservatory/> (10.11.2014)

Ein weiterer wichtiger Indikator ist die Signifikanz (Abb. IV.4). Dieser Indikator gibt an, welchen Anteil die Patente in der industriellen Biotechnologie an allen Patenten eines Landes in einem Jahr einnehmen. In allen Ländern nahm die Signifikanz der industriellen Biotechnologie zwischen den Jahren 2000 und 2005 sehr deutlich ab. Diese Phase des Rückgangs, der sich auch in der absoluten Anzahl zeigt, ließ sich auch in anderen Bereichen der Biotechnologie beobachten (Nusser et al. 2007). Die Stagnation ist wahrscheinlich als Folge der Börsenkrise des beginnenden neuen Jahrtausends zu interpretieren, die viel Skepsis gegenüber neuen, patentintensiven Hightechnologien wie der Biotechnologie verbreitete und so zu einem Rückgang der Patente führte (Nusser et al. 2007). Seit 2005 bzw. in Ostasien seit 2007 ist die Signifikanz in allen Ländern/Regionen sehr stabil. Das Niveau liegt in Deutschland in der industriellen Biotechnologie niedriger als in anderen wichtigen Ländern. Aktuell beträgt der Anteil der Patente in der industriellen Biotechnologie an allen Patenten in Deutschland rund 1,4%. In den USA ist der Anteil deutlich höher, dort liegt die Signifikanz im Jahr 2011 bei rund 3,7%.

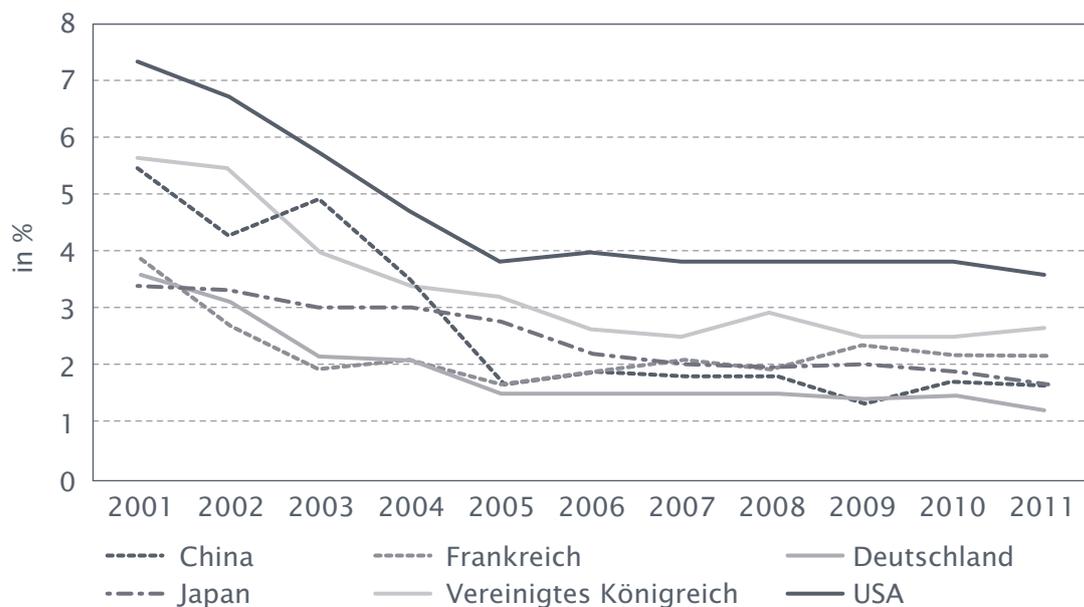


Abb. IV.3 Anteil an den weltweiten Patenten in der industriellen Biotechnologie von 2000 bis 2011, nach Land der Anmelder



Quelle: <https://webgate.ec.europa.eu/ketsobservatory/> (10.11.2014)

Abb. IV.4 Signifikanz bei Patenten in der industriellen Biotechnologie von 2001 bis 2011, nach Land der Anmelder



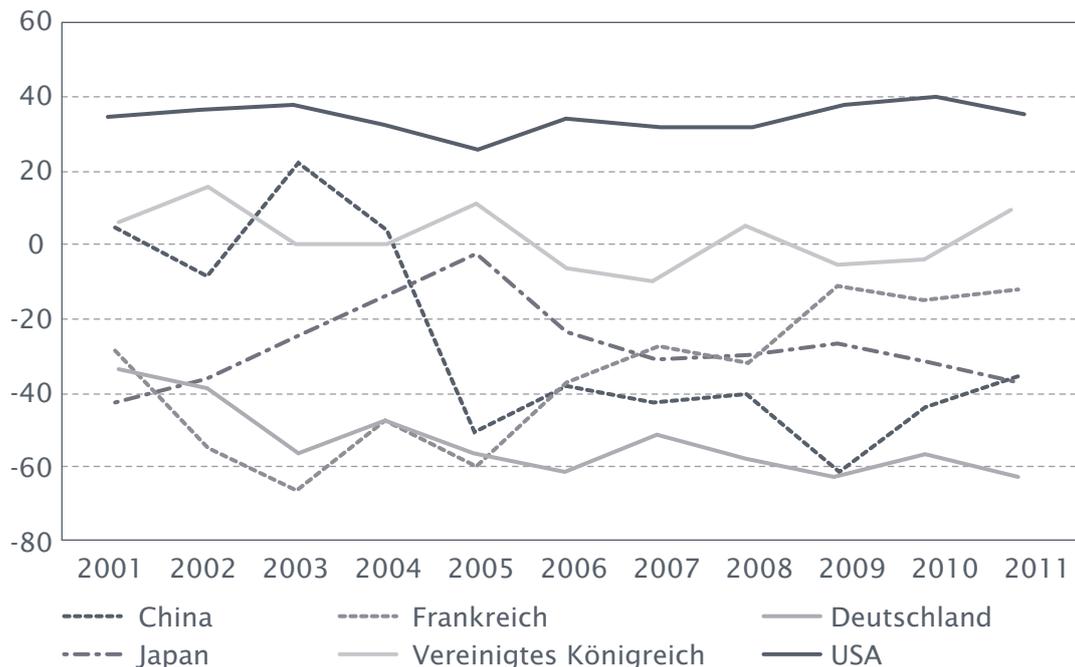
Quelle: <https://webgate.ec.europa.eu/ketsobservatory/> (10.11.2014)



Ein ähnliches Bild zeigt der Indikator der Spezialisierung (Abb. IV.5). Dieser setzt die Signifikanz in einem Land in Verhältnis zu der Signifikanz anderer Länder und zeigt, ob ein Land bei der Patentierung mehr (positive Werte) oder weniger (negative Werte) Fokus auf die industrielle Biotechnologie als andere Länder legt. Deutschland weist eine klare negative Spezialisierung auf, d. h., die industrielle Biotechnologie ist hier von geringerer Bedeutung als in anderen Ländern. Diese negative Spezialisierung zeigt sich zwischen 2000 und 2011 und hat sich im gesamten Zeitverlauf etwas verschlechtert. In den USA zeigt sich hingegen eine recht positive Spezialisierung in der industriellen Biotechnologie.

Zusammenfassend zeigt die Patentanalyse, dass deutsche Akteure durchaus einen signifikanten Anteil an Patenten in der industriellen Biotechnologie anmelden. Aber dies liegt offensichtlich vor allem an der allgemein hohen Patentierungsaktivität, denn es ist keine Spezialisierung Deutschlands in der industriellen Biotechnologie zu erkennen.

Abb. IV.5 Spezialisierung bei Patenten in der industriellen Biotechnologie von 2001 bis 2011, nach Land der Anmelder



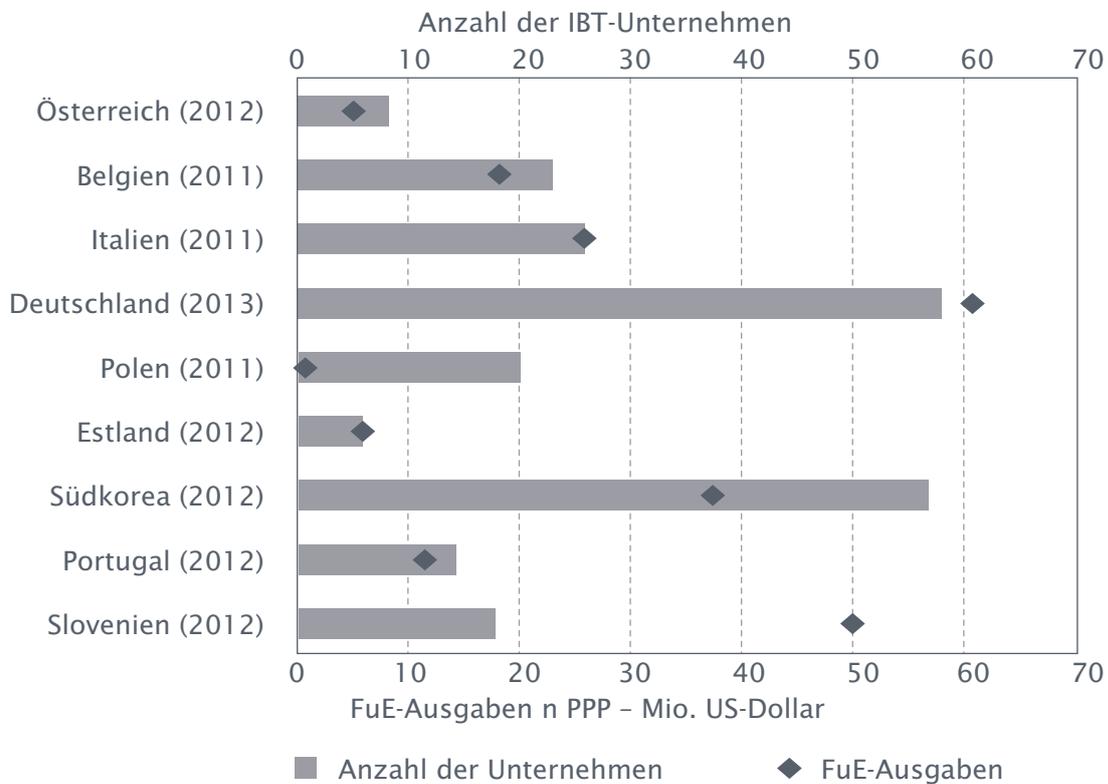
Ein positiver Wert zeigt eine stärkere Spezialisierung als andere Länder an, ein negativer Wert eine unterdurchschnittliche Spezialisierung

Quelle: <https://webgate.ec.europa.eu/ketsobservatory> (10.11.2014)

Dedizierte Biotechnologieunternehmen in der industriellen Biotechnologie

Der internationale Vergleich zwischen den dedizierten IBT-Unternehmen gibt einen Aufschluss über die Größe der Unternehmenslandschaft bei den KMU und deren FuE-Ausgaben. Allerdings liegen für den Vergleich nur für sehr wenige Länder Daten vor, die eine Aufschlüsselung nach Anwendungsfeldern in der Biotechnologie zulassen.

Abb. IV.6 Anzahl der dedizierten industriellen Biotechnologieunternehmen sowie ihrer FuE-Ausgaben in ausgewählten Ländern



Quelle: OECD 2014

Abbildung IV.6 fasst die Zahl der dedizierten IBT-Unternehmen und ihrer FuE-Investitionen zusammen. Deutschland ist hier jeweils führend, allerdings sind die meisten Vergleichsländer deutlich kleiner, nur Italien und Südkorea sind annähernd von der Bevölkerungsgröße und Bruttoinlandsprodukt vergleichbar. Zudem liegt die führende Position Deutschlands an der höheren Gesamtzahl an Biotechnologieunternehmen, der Anwendungsschwerpunkt der industriellen Biotechnologie ist im Vergleich zu den meisten anderen Ländern von geringerer



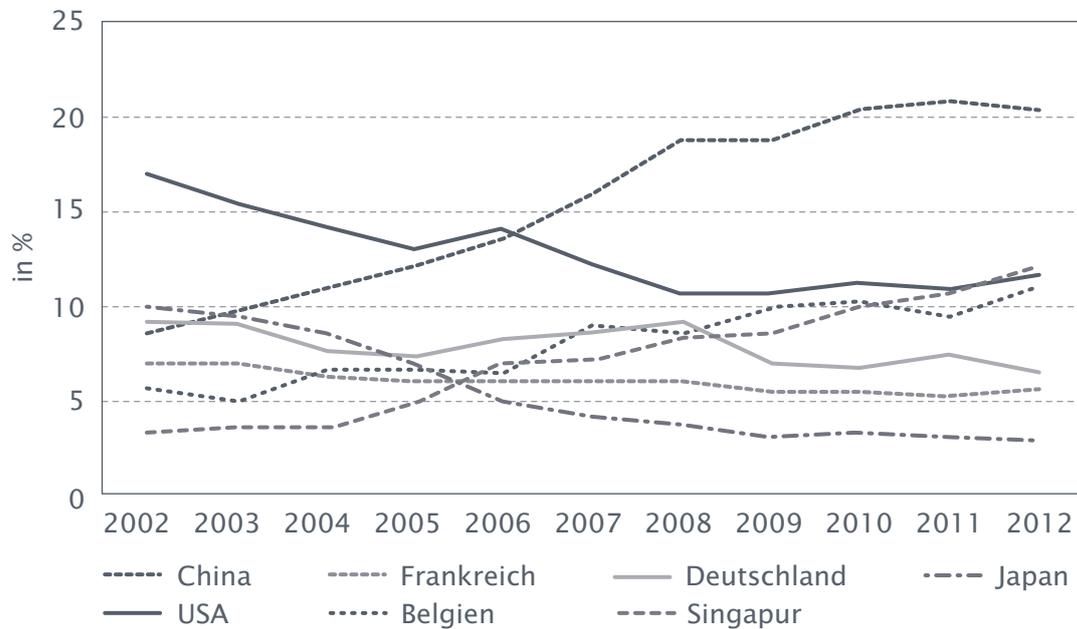
Bedeutung. Dabei ist wiederum zu beachten, dass erstens in Deutschland bei der Befragung nach Anwendungsschwerpunkt der dedizierten Biotechnologieunternehmen der Anteil in der Kategorie »Andere«, also Aktivitäten, die nicht eindeutig einer Anwendung zugeordnet werden können, viel höher als in anderen Ländern ist. In dieser Kategorie dürften Unternehmen enthalten sein, die auch, aber eben nicht nur in der industriellen Biotechnologie tätig sind. Zweitens verfügt Deutschland über eine starke Chemieindustrie, bei der einige Unternehmen (z. B. BASF, Evonik, Henkel, Wacker) auch Aktivitäten in der IBT haben (Kap. III.2) und die in Summe vermutlich deutlich mehr Umsatz und Mitarbeitern in der IBT haben als die dedizierten Unternehmen. Daher kann zusammenfassend davon ausgegangen werden, dass Deutschland im internationalen Vergleich über eine vielversprechende Basis an industriellen Akteuren in der IBT verfügt.

Exportentwicklung

Internationale Märkte bilden eine zentrale Messlatte für die Leistungsfähigkeit bei Spitzentechnologie. Denn Unternehmen treffen hier unmittelbar auf ihre Konkurrenten und müssen ihre Wettbewerbsfähigkeit im direkten Vergleich beweisen (Gehrke et al. 2014). Indikatoren zu Exporten geben tendenziell Aufschluss darüber, wie wettbewerbsfähig ein Land bei der Produktion von IBT-Produkten ist.⁶ Analog zur Patententwicklung werden hierfür im Folgenden zwei Indikatoren ausgewertet, die im Rahmen des »Key Enabling Technology Observatory« ermittelt wurden: die Welthandelsanteile sowie die Spezialisierung der Länder auf die IBT. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass dort nur Produkte mit einbezogen werden, die seit Jahren zu den etablierten Produkten der industriellen Biotechnologie gehören (u. a. Enzyme, Vitamine, Lysin). Diese Fokussierung auf die traditionellen Produkte der IBT ist der Problematik geschuldet, dass IBT-Produkte, die neu sind, oder existierende Produkte, die neu mit industriellen biotechnologischen Verfahren hergestellt werden, in der Außenhandelsstatistik nicht explizit erfasst werden. Sie tauchen weder in einer eigenen Kategorie auf, noch nehmen sie einen hohen Anteil in einer existierenden Produktgruppen ein.

6 Dabei ist zu berücksichtigen, dass die zunehmenden globale Wertschöpfungsketten zu einer Überbewertung des Handelsvolumens führen, weil Zwischenprodukte teilweise mehrfach gezählt werden. So wurde in Studien für einige Branchen gezeigt, dass einige stark exportierende Länder hauptsächlich Durchlaufstationen für den Handel sind und kaum inländische Wertschöpfung durch Produktionsschritte stattfindet (u. a. Timmer et al. 2014). Da für solche Analyse notwendige Daten aber nur auf Branchenebene verfügbar sind, können diese Zusammenhänge für die IBT insgesamt nicht berücksichtigt werden.

Abb. IV.7 Welthandelsanteile der führenden Exportländer in der industriellen Biotechnologie von 2002 bis 2012

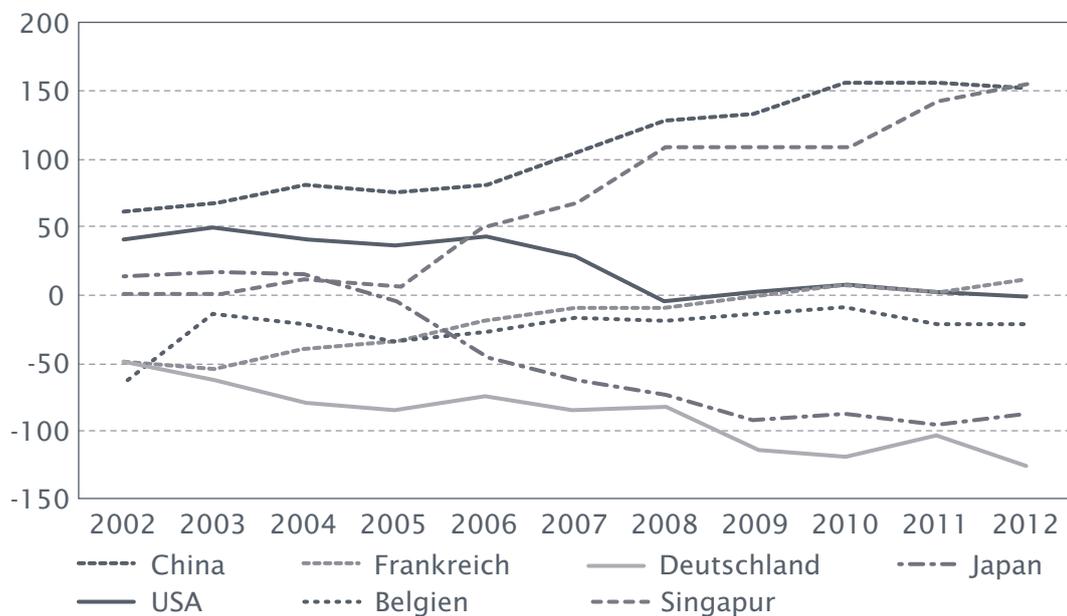


Quelle: <https://webgate.ec.europa.eu/ketsobservatory> (16.4.2015)

Abbildung IV.7 zeigt die Welthandelsanteile der führenden sieben Länder im Bereich der IBT. Deutschland nimmt mit rund 6,5% eine mittlere Position im Jahr 2014 ein. Im Zeitverlauf verringerte sich der Welthandelsanteil Deutschlands vor allem ab 2008, der Rückgang über die gesamte Zeitperiode seit 2002 fällt aber nicht so deutlich aus wie z.B. in den USA oder in Japan. Deutlicher Spitzenreiter und Gewinner im Zeitablauf ist China.

Die Spezialisierung der Länder auf die IBT kann anhand des häufig angewendeten RCA-Indikators (»revealed comparative advantage«) abgebildet werden. Dieser Indikator berücksichtigt auch die Importe und damit die Wettbewerbssituation auf dem Binnenmarkt. Der RCA gibt an, inwieweit die Export-Import-Relation eines Landes bei IBT von der Außenhandelsposition bei Industriewaren insgesamt abweicht. Positive Vorzeichen weisen auf komparative Vorteile und damit auf eine starke internationale Wettbewerbsposition der betrachteten Warengruppe im betrachteten Land hin. Deutschland weist eine klar negative Spezialisierung auf, d.h., die Welthandelsbilanz von Deutschland bei IBT ist relativ schlechter als in der gesamten Industrie (Abb. IV.8). Die Spezialisierung Deutschlands verschlechtert sich dabei kontinuierlich im Zeitverlauf, während sie in China und Singapur deutlich zunimmt. Zusammenfassend hat Deutschland in den vergangenen Jahren, ebenso wie Japan und die USA, beim Welthandel mit (vor allem traditionellen) IBT-Produkten verloren.

Abb. IV.8 Spezialisierung ausgewählter Länder im Außenhandel in der industriellen Biotechnologie von 2002 bis 2012



Ein positiver Wert zeigt eine stärkere Spezialisierung als andere Länder an, ein negativer Wert eine unterdurchschnittliche Spezialisierung.

Quelle: <https://webgate.ec.europa.eu/ketsobservatory/> (16.4.2015)

Produktionsstandorte im internationalen Vergleich

Ein weiterer relevanter Indikator für die Beurteilung der Standortwettbewerbsfähigkeit ist die weltweite Verteilung der Produktionskapazitäten in der IBT.

Produktionsstandorte für traditionelle IBT-Produkte

Bislang liegen für Produkte der industriellen Biotechnologie kaum veröffentlichte Produktionsdaten vor, da sie sich amtlichen Statistiken nicht direkt entnehmen lassen. Im Auftrag der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) hat das Unternehmen ECO SYS für 24 Produkte aus zehn Produktgruppen den weltweiten Markt sowie das Markt- und Produktionsvolumen für die EU und Deutschland abgeschätzt. Dabei wurden vor allem Produkte, die seit Jahrzehnten produziert werden (z.B. Zitronensäure, Milchsäure), erfasst, einige Produktgruppen befinden sich noch in einem eher frühen Kommerzialisierungsstadium (z.B. Propandiol/PHA). Da die letzteren Produkte im Untersuchungszeitraum (bis 2009) kaum eine Rolle spielten, können die Gesamtergebnisse vor allem als Indikator betrachtet werden, wie stark Deutschland als Produzent bei traditionellen IBT-Produkten ist. Die Ergebnisse sind in Tabelle A.3



im Anhang zusammengefasst. Sie führt die Zahlen für die Produktion (global, EU-27, Deutschland), das globale Marktwachstum zwischen 1993 bis 2009 sowie die Außenhandelsbilanz Deutschlands auf. Es zeigt sich folgendes Gesamtbild (ECO SYS 2011):

- › In allen Gruppen hat die Produktion seit 1993 zugenommen. Ein Vergleich der Wachstumsraten im Zeitraum 1993 bis 1999 mit den Wachstumsraten im Zeitraum 2000 bis 2009 zeigt kein eindeutiges Ergebnis: Bei einigen Produkten sind die Wachstumsraten gestiegen (z.B. Milchsäure, Itaconsäure), bei anderen sinken sie (z.B. Erythritol, Isoascorbinsäure), sind aber immer noch im positiven Bereich.
- › Deutschland ist aktuell kein bedeutender Standort für die analysierten Produkte, es werden nur wenige der in die Untersuchung einbezogenen Produkte überhaupt in Deutschland produziert. Für die EU-27 zeigt sich, dass Europa bei einem Teil der Produkte durchaus ein relevanter Produktionsstandort ist, bei vielen Produkten dominiert aber Asien, z.T. die USA. Daher lässt sich nicht generell folgern, dass die Produktion von traditionellen IBT-Produkten in Europa nicht wirtschaftlich ist, die Hauptkonkurrenz liegt aber außerhalb Europas.

Zusammenfassend stimmen die Ergebnisse mit denen der Analyse zur Exportentwicklung (im vorhergehenden Teilkapitel) überein und zeigen, dass Deutschland bei der Produktion traditioneller Produkte der IBT nur eine geringe Rolle spielt.

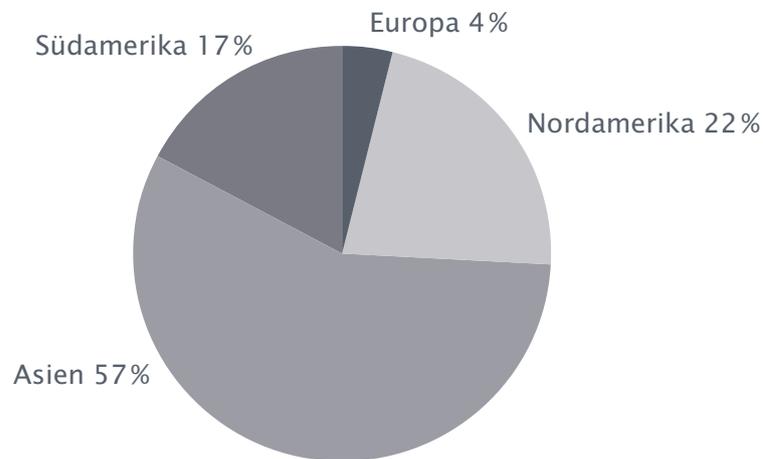
Standorte der operierenden und angekündigten Produktionsstätten für innovative Bulkchemikalien

Die Informationen zur Standortwettbewerbsfähigkeit werden im Folgenden über die traditionellen IBT-Produkte hinaus um innovative biotechnologisch hergestellte Bulkchemikalien ergänzt. Hierfür wurden in Betrieb und in Bau befindliche Anlagen berücksichtigt, in denen Bulkchemikalien aus Biomasse mit biotechnologischen Methoden hergestellt werden (Tab. III.3, Kap. III.1.2).⁷ Sie werden nach ihrem Standort aufgeschlüsselt.

Abbildung IV.9 zeigt die Aufteilung dieser Produktionskapazitäten nach Ländern bzw. Weltregionen für Anlagen mit einer Kapazität von über 10 kt im Jahr, Abbildung IV.10 zeigt den entsprechenden Anteil einzelner Länder bzw. Weltregionen an der Anzahl der Anlagen.

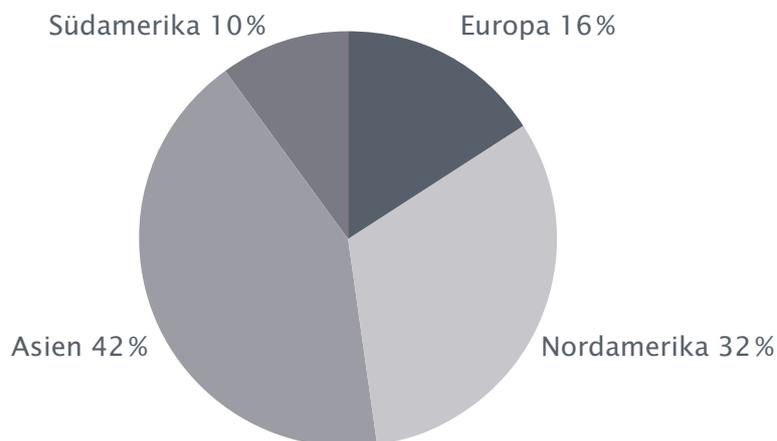
⁷ Deshalb wurden Anlagen nicht berücksichtigt, in denen Bulkchemikalien aus Biomasse ohne erkennbare biotechnologische Prozesse hergestellt werden. Dies sind beispielsweise Anlagen zur Herstellung von 1,2-Propandiol oder Epichlorohydrin aus Biomasse.

Abb. IV.9 Verteilung der Produktionskapazitäten nach Standorten
(total ~ 1.400 kt/Jahr)



Es wurden nur Großanlagen mit einer Kapazität über 10 kt/Jahr berücksichtigt.
Eigene Berechnung, auf Basis von Tabelle III.3 (Kap. III.1.2)

Abb. IV.10 Anteil von Ländern und Weltregionen an der Anzahl von im Bau befindlichen und operativ tätigen Produktionsanlagen
(insgesamt 19 Anlagen)



Es wurden nur Großanlagen mit einer Kapazität über 10 kt/Jahr berücksichtigt.
Eigene Berechnung, auf Basis von Tabelle III.3 (Kap. III.1.2)

Aus den Abbildungen lassen sich folgende Tendenzen ablesen:

- > Sowohl in Europa, Asien und Nordamerika als auch in Südamerika (Brasilien) findet jeweils der kommerzielle Aufbau von IBT-Produktionsanlagen statt. In Deutschland ist bisher keine Großanlage in Betrieb oder aktuell im



Bau. Als Hauptthemmen gelten die hohen Rohstoffkosten und die meist begrenzte Rohstoffverfügbarkeit (BIO-TIC 2014b; Wydra et al. 2010)

- › Europa hat durch einige Anlagen von jeweils deutlich geringerer Größe einen eher kleinen Anteil an den weltweiten Produktionskapazitäten.
- › Asien hat die führende Position bei der Anzahl der Produktionsanlagen und Produktionskapazitäten vor den USA eingenommen.

Allerdings ist die Aussagekraft dieser Indikatoren mit erheblichen Einschränkungen verbunden:

- › Die Datenquellen sind in der Regel Pressemitteilungen der beteiligten Unternehmen; die Daten sind möglicherweise unvollständig. Da die Gesamtzahl gering ist, hat jede Änderung des ausgewerteten Datensatzes, z.B. durch weitere Firmenankündigungen oder veränderte Anlagengröße, eine erhebliche Auswirkung auf die Ergebnisse. So wurden in der jüngeren Vergangenheit einige angekündigte Bauvorhaben von großen Anlagen auf unbekannte Zeit verschoben (z.B. eine Ethylenanlage von Dow Chemical in Brasilien) oder komplett verworfen (z.B. eine PHA-Anlage von ADM und Metabolix in den USA). Es wurden daher nur solche Produktionsanlagen berücksichtigt, die operativ im Betrieb sind oder solche, die im Bau befindlich sind und deren Inbetriebnahme für das Jahr 2015 angekündigt wurde.
- › Es handelt sich hier nur um Bulkchemikalien; die bislang deutlich größeren Märkte für biobasierte Fein- und Spezialchemikalien oder Enzyme sind nicht berücksichtigt. Gerade in den letzteren Kategorien werden die größten Standortvorteile für Deutschland und Europa vermutet, da die Rohstoffverfügbarkeit eine geringere Rolle als bei Bulkchemikalien spielt.

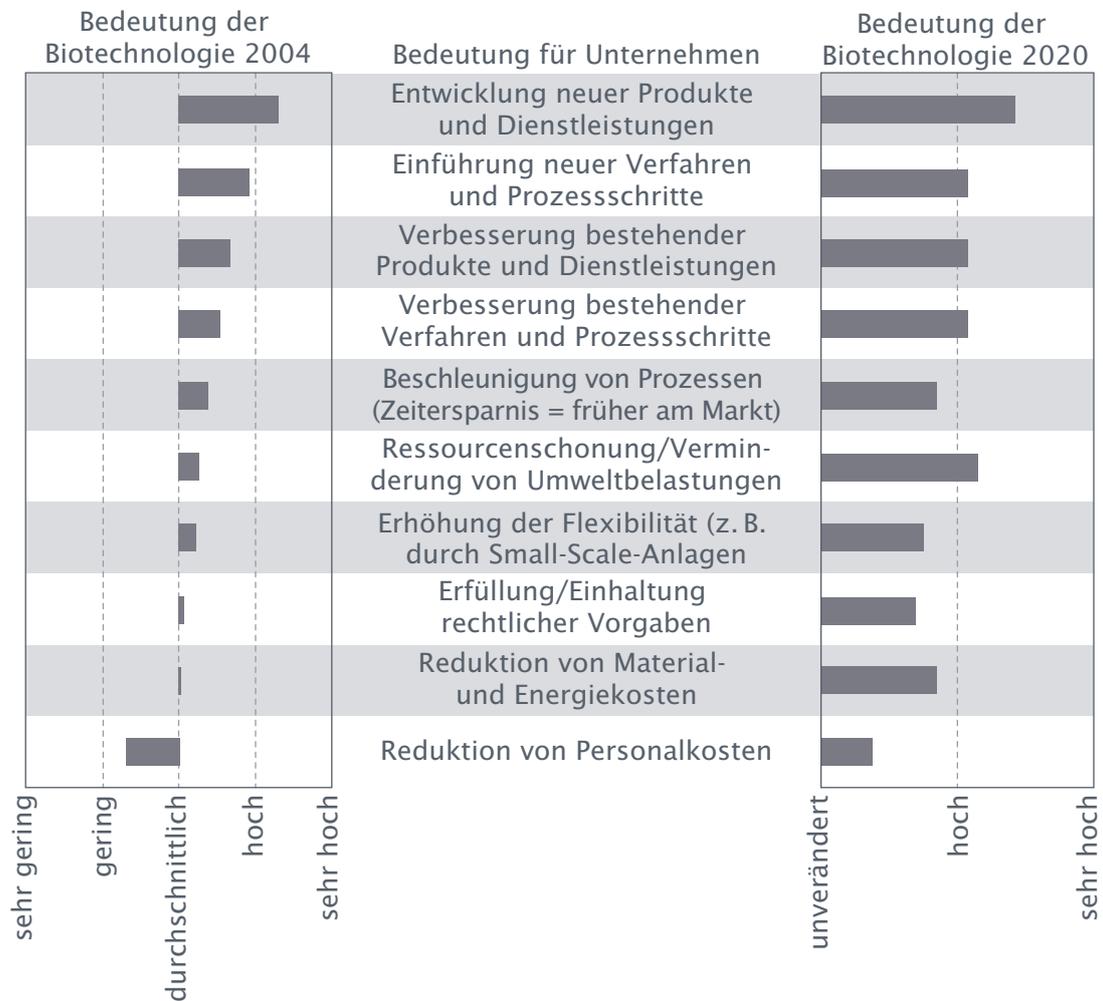
(Kosten-)Wettbewerbsfähigkeit

4.

Für eine breite Anwendung und damit positive volkswirtschaftliche Effekte von IBT-Produkten und Verfahren ist eine ökonomische Vorteilhaftigkeit biotechnischer Verfahren in vielen Märkten erforderlich (Flaschel/Sell 2005; Nusser et al. 2007). Die Vorteile biotechnologischer Produkte und Verfahren können unterschiedlichster Art sein. Sie können beispielsweise in Kosteneinsparungen, neuen oder verbesserten Produktqualitäten oder -funktionalitäten, Ressourcenschonung etc. liegen. Insgesamt kann eine Vielzahl von wirtschaftlichen Vorteilen und Motiven beim Einsatz der Biotechnologie von Relevanz sein (Abb. IV.11). Zudem wird erwartet, dass die mit der Biotechnologie verbundenen Vorteile in Zukunft weiter deutlich zunehmen.



Abb. IV.11 Wirtschaftliche Potenziale der industriellen Biotechnologie aus Sicht von Unternehmen in Deutschland (Stand 2006)



Quelle: Nusser et al. 2007

In Abbildung IV.11 sind die Ergebnisse einer Unternehmensbefragung zu den wirtschaftlichen Potenzialen der industriellen Biotechnologie im Jahr 2006 dargestellt. Damals wurden die Potenziale zur Kosteneinsparung eher gering eingeschätzt. Jedoch wird auch in aktuellen Studien deutlich, dass die Kostenwettbewerbsfähigkeit biotechnologischer Produkte häufig nicht gegeben ist und dies ein zentrales Diffusionshemmnis darstellt. Es gibt zwar einige prominente, häufig zitierte Beispiele – das Vitamin Riboflavin (Vitamin B2), die Antibiotika ACA-7 und Cephalosporin, die Aminosäure Lysin (Hoppenheidt et al. 2005; OECD 2001; Zika et al. 2007), bei denen hohe Kosteneinsparungen sowie häufig eine Reduktion von Abfällen und eingesetzten Ressourcen erzielt werden konnten. In vielen Fällen ist die Synthese bestehender Produkte auf chemischem We-



ge aber so günstig, dass biotechnologische Produktionsverfahren trotzdem nicht wirtschaftlich sind.

Bei der Betrachtung der relativen Kostenposition ist die gesamte Wertschöpfungskette von den Rohstoffkosten über die Anfangs-/Investitionskosten bis hin zu veränderten Verfahrenskosten zu beachten. Die Bedeutung ist für die verschiedenen Produktgruppen der biobasierten Produkte sehr unterschiedlich, da sowohl der Anteil des Rohstoffpreises am Produkt, der Reifegrad einzelner Produktgruppen als auch die Bedeutung des Preiswettbewerbs unterschiedlich ist.

Im Folgenden werden die verfügbaren Informationen zu den einzelnen Kostenpositionen für biotechnologische Produkte im Vergleich zu chemischen Produkten analysiert. Dabei werden schwerpunktmäßig die Rohstoffkosten betrachtet. Diese spielen besonders für Bulkprodukte eine bedeutende Rolle. Bei diesen Produkten werden häufig in erheblichen Mengen nachwachsende Rohstoffe eingesetzt, die einen signifikanten Anteil an den Herstellungskosten haben. Beispielsweise nehmen die Rohstoffkosten bei erdölbasierten Massenpolymeren aktuell mit ungefähr 50 % bei größeren Anlagen einen erheblichen Kostenanteil ein (Müssig/Carus 2007; Wydra 2010). Da sich z. B. Biopolymere und erdölbasierte Polymere bei der Herstellung vor allem in der Rohstoffbasis unterscheiden, ist das Verhältnis der relativen Rohstoffkosten entscheidend für die Vorteilhaftigkeit (Crank et al. 2004).

Zur Analyse, inwiefern eine solche Entwicklung absehbar ist, werden zunächst Trends der Vergangenheit und Prognosen für Öl und für ausgewählte nachwachsende Rohstoffe verglichen. Anschließend werden weitere Einsparpotenziale durch die Substitution zwischen einzelnen nachwachsenden Rohstoffen (z. B. Weizen durch Lignocellulose) und bei der Einsatzmenge für die einzelnen biobasierten Produkte betrachtet. Es ist einschränkend zu sagen, dass hier nur IBT-Produkte und Verfahren betrachtet werden, die auf nachwachsenden Rohstoffen basieren, biotechnologische Produkte auf fossiler Basis werden nicht betrachtet. Gleichzeitig ist die Nutzung nachwachsender Rohstoffe auch in bestimmten Fällen mit chemischen Verfahren möglich und vorteilhaft, die hier von der Betrachtung mit erfasst werden.

Preisverhältnis von Öl und nachwachsenden Rohstoffen

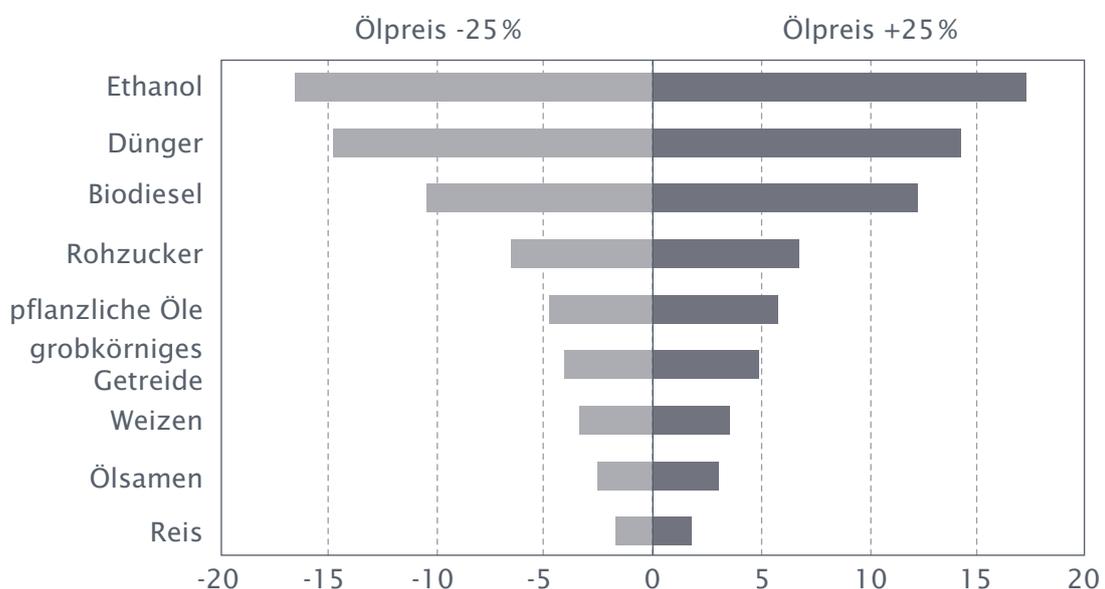
Grundsätzlich müsste der zu erwartende Anstieg der Ölpreise zu relativen Kostenvorteilen für biobasierte Produkte führen. Diese Entwicklung ist in der jüngeren Vergangenheit aber bisher nicht eingetreten. Zwar sind die Ölpreise seit Anfang des Jahrtausends insgesamt deutlich angestiegen, das Gleiche gilt aber auch für die Preise für nachwachsende Rohstoffe.⁸

8 Diese Analyse betrachtet die Preisentwicklungen der Rohstoffe bis Mitte 2014.

Ein Grund hierfür ist der Zusammenhang zwischen Öl- und Agrarrohstoffpreisen auf der Angebots- und Nachfrageseite. So werden auf der Angebotsseite steigende Rohölpreise vor allem durch Düngemittel- und Treibstoffkosten auf Agrarrohstoffpreise übertragen. Auf der Nachfrageseite kann die Substitution von fossilen Treibstoffen durch Biokraftstoffe zu steigender Nachfrage und höheren Preisen für Agrarrohstoffe führen. Es ist aber sehr umstritten und kaum eindeutig nachzuweisen, wie stark der Zusammenhang zwischen der produzierten Menge von Biokraftstoffen und den Preisen von Agrarrohstoffen ist. Denn insgesamt hängen die Agrarpreise von einer großen Vielzahl von Faktoren ab, die im gemeinsamen Zusammenspiel die Preise bestimmen. Die Isolation des Einflusses eines einzelnen Faktors ist äußerst schwierig (OECD/FAO 2011).

Dennoch weist eine Simulation der FAO/OECD im »Agricultural Outlook 2011–2020« einen solchen Zusammenhang auf. Die Studie zeigt bei einer Veränderung der Rohölpreise um 25% unter sonst gleichbleibenden Annahmen gemäß ihres »Baselineszenarios«, dass es insgesamt einen deutlichen Zusammenhang zwischen Ölpreisen und Agrarrohstoff- bzw. -produktpreisen gibt (Abb. IV.12).⁹

Abb. IV.12 Auswirkungen einer Veränderung des Ölpreises auf die Preise von Agrarrohstoffen und Produkten



Quelle: OECD/FAO 2011

⁹ Es ist zu beachten, dass es sich hier um Weltmarktpreise handelt; regional können die Preise durchaus variieren. Die dargestellten Entwicklungen lassen sich aber prinzipiell in allen Weltregionen beobachten.



Vor allem die Preise für Bioethanol, Düngemittel oder Biodiesel verändern sich deutlich in einer Spanne von 10 bis 16 %. Bei den Agrarrohstoffen ist der direkte Zusammenhang geringer und liegt zwischen 2 und 7 %. Diese unterschiedlichen Preisabhängigkeiten ergeben sich daraus, dass die Preise für Biokraftstoffe nicht nur auf der Produktionsseite durch höhere Agrarstoffpreise infolge teureren Dünger- und Treibstoffes vom Ölpreis beeinflusst werden. Vielmehr werden bei fallenden (steigenden) Preisen für Öl die Biokraftstoffe relativ teurer (günstiger) werden und entsprechend mehr (weniger) eingesetzt, bis sich die Preise durch diese Marktbeziehungen wieder stärker angeglichen haben.

Neben dem Einfluss durch die Ölpreise haben die Agrarpreise auf dem Weltmarkt durch weitere Faktoren (u. a. Nachfrageanstieg) seit Ende der 1990er Jahren deutlich zugenommen. Insbesondere ab den Jahren 2004/2005 haben sich die Preise sowie deren Volatilität deutlich erhöht. Dabei waren die Preisschläge bei den Agrarrohstoffen prozentual berechnet sogar teilweise höher als beim Ölpreis. Beispielsweise haben die Weltmarktpreise für Weizen, grobkörnige Getreidesorten (»Coarse Grains«; das sind Mais, Roggen, Gerste, Hirse, Triticale und Mischgetreide) und Zucker zwischen den Jahren 2005 und 2010 um 70 bis 110 % zugenommen, der Ölpreis hingegen nur um rund 45 %.

Erst in den Folgejahren waren die Preisanstiege bei Öl wieder etwas höher als bei Agrarrohstoffen. Die Entwicklungen zwischen den Jahren 2005 und 2010 sind sicherlich besonderen Faktoren (u. a. Wirtschaftskrise, Klima) geschuldet, sie werden sich zukünftig voraussichtlich nicht fortsetzen (OECD/FAO 2011). OECD/FAO (2014) erwarten einen weiteren Ölpreisanstieg zwischen 2014 und 2023 um rund 30 % auf 147 US-Dollar pro Barrel. Die Preise für Agrarrohstoffe werden hingegen voraussichtlich leicht sinken, sofern die Märkte auf die aktuell höheren Preise und die damit verbundenen Möglichkeiten zur Rentabilitätssteigerung reagieren. Aber selbst wenn dieser erwartete Rückgang der Agrarrohstoffpreise eintreffen sollte, würden die Preise für Agrarrohstoffe dennoch weiterhin sehr deutlich über dem Niveau von 2004/2005 liegen. Verglichen mit dem Jahr 2005 würden sich die Preise bis zum Jahr 2023 für grobkörnige Getreidesorten verdoppeln, die prognostizierte Preissteigerung bei Erdöl beträgt das 2,6-Fache gegenüber 2005. Bei Weizen und Zucker wären die Anstiege zwar deutlich geringer, aber immer noch signifikant hoch (Abb. IV.13). Folglich würde im gesamten Zeitraum 2005 bis 2023 nur für einen Teil der Agrarrohstoffe der Rohstoffpreis relativ zum Ölpreis sinken, und dies auch nur in einem begrenzten Ausmaß.

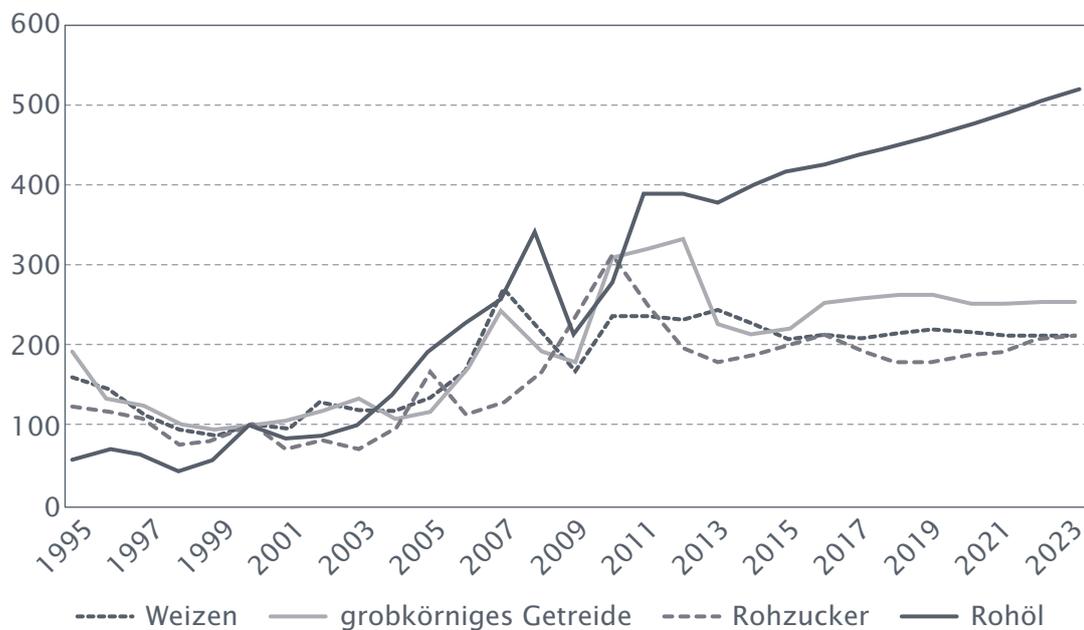
Ein weitere Herausforderung für Unternehmen neben den Preissteigerungen ist die Volatilität der Preise bei nachwachsenden Rohstoffen (Wydra et al. 2010). Viele Unternehmen, die potenziell nachwachsende Rohstoffe für (einige) ihrer Produkte einsetzen, befinden sich in einer besonderen Phase, da ein Wechsel der Rohstoffbasis eine langfristig bindende Entscheidung mit vielen Unabwägbarkeiten bedeutet (u. a. technologische Zuverlässigkeit der neuen

4. (Kosten-)Wettbewerbsfähigkeit



Verfahren, Zahlungsbereitschaft und Akzeptanz auf der Marktseite, Kostenwettbewerbsfähigkeit etc.). Die hohe Preisvolatilität für Biomasse erschwert die Planbarkeit zusätzlich, da zum aktuellen Zeitpunkt häufig nur das Unternehmen selbst von dieser Rohstoffpreissteigerung betroffen wäre, die Konkurrenz aber noch fossile Rohstoffe nutzt.¹⁰ Die ohnehin ungünstige relative Kostenwettbewerbsfähigkeit gegenüber fossilen Produkten würde sich in diesem Falle weiter verschlechtern. Dieses zusätzliche Risiko stellt nach Expertenmeinung aus Unternehmenssicht ein bedeutendes Hemmnis für die Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe dar.

Abb. IV.13 Index für die Entwicklung und Prognose der Weltmarktpreise für wichtige Rohstoffe (2005 = 100)



Quelle: OECD/FAO 2011

Veränderung des Rohstoffeinsatzes für biobasierte Produkte

Neben der Höhe der Marktpreise für nachwachsende Rohstoffe ist die erforderliche Einsatzmenge je Mengeneinheit des Endprodukts entscheidend für die Gesamtrohstoffkosten. In der aktuellen Literatur sind kaum Informationen über die Potenziale zur Effizienzsteigerung bei der Rohstoffausbeute für biobasierte

¹⁰ Zwar ist die Preisvolatilität bei Öl ebenfalls hoch, hier ist eben aber häufig die gesamte Konkurrenz gleichermaßen betroffen wäre, ergibt sich zumindest aus der Konkurrenzsituation hier keine zusätzliche Problematik.



Produkte sowie die damit potenziell verbundenen Kosteneinsparungen verfügbar. In der bisher umfangreichsten Studie zu technologischen und ökonomischen Eigenschaften von biobasierten Bulkchemikalien (Patel et al. 2006) wird deutlich, dass für die meisten Verfahren eine Effizienzsteigerung beim Rohstoffeinsatz erreichbar ist. Das Potenzial unterscheidet sich aber deutlich zwischen den einzelnen untersuchten Chemikalien. Beispielsweise schätzte Wydra (2010) auf Basis von Angaben von Patel et al. (2006) die mögliche Einsparung der gesamten Kosten durch technologischen Fortschritt beim Rohstoffeinsatz für die Biopolymere bzw. Polymerbausteine Propandiol (PDO) und Polymilchsäure (PLA) auf jeweils knapp über 10 % der Gesamtkosten; für Polyhydroxyalkanoate (PHA) ergaben sich keine Änderungen.

Eine andere Möglichkeit zur Senkung der biobasierten Rohstoffkosten besteht in der Möglichkeit der technologischen Substitution von bisher verwendeten Rohstoffen durch Lignocellulose. Verschiedene Modellrechnungen zu Bioethanol zeigen, dass dadurch die Rohstoffkosten erheblich gesenkt werden könnten. In einer Vergleichsrechnung wurde eine Kosteneinsparung von fast 300 Euro/t Ethanol bzw. ca. 25 % der Gesamtkosten errechnet (Reinhardt et al. 2007). Dabei wird angenommen, dass die bislang recht hoch geschätzten Transportkosten, Enzymkosten und Investitionskosten stark gesenkt werden können.

Investitionskosten

Als lange bekanntes, aber weiterhin relevantes Hemmnis gelten die hohe Anfangsinvestitionen oder die Kosten für einen Verfahrensumstieg, da sich biotechnische Verfahren nur begrenzt in chemische Anlagen integrieren lassen (Nusser et al. 2007). Die Investitionskosten für konventionell auf Basis fossiler Rohstoffe produzierte Chemikalien sind häufig bereits abgeschrieben. Außerdem sind die Anlagen für biobasierte Produkte bislang in der Regel kleiner als für erdölbasierte Produkte, die Skaleneffekte sind folglich geringer.

Verfahrenskosten

Die Verfahrenskosten können sich bei biotechnologischen Prozessen je nach Produkt deutlich voneinander unterscheiden. Informationen über die Kostenstrukturen sind in der Regel nicht verfügbar. Einen interessanten Ansatz verfolgen Tufvesson et al. (2011), die näherungsweise durchschnittliche Kosten für verschiedene Prozessparameter bestimmen. Sie analysieren insbesondere die Kosten für die Biokatalyse näher, die stark von der Ausgestaltung des Biokatalysators abhängen (z. B. ganze Zellen vs. freie Enzyme vs. immobilisierte Enzyme).

Tab. IV.3 Erforderliche Produktivität für verschiedene Arten von Prozessen und Produkten, basierend auf typischen Werten für Biokatalysator- und Produktkosten

Produkte	typische Produktkosten (Euro/kg)	maximal tragbarer Kostenbeitrag von Enzymen (Euro/kg)	Biokatalysatorkosten	Bandbreite der notwendigen Produktivität
Pharma	> 100	10	ganze Zellen: 10-350 Euro/kg Trockenmasse freie Enzyme: 1.000-2.500 Euro/kg Enzyme	10-35 kg Produkt/kg Trockenmasse 100-250 kg Produkt/kg freie Enzyme 50-100 kg Produkt/kg immobilisierte Enzyme
Feinchemie	> 15	1,5	immobilisierte Enzyme: 500-1.000 Euro/kg Biokatalysator	70-230 kg Produkt/kg Trockenmasse 670-1.700 kg Produkt/kg freie Enzyme 330-670 kg Produkt/kg immobilisierte Enzyme
Spezialchemie	5	0,25	ganze Zellen: 35-100 Euro/kg Trockenmasse freie Enzyme: 250-1.000 Euro/kg Enzyme	140-400 kg Produkt/kg Trockenmasse 1.000-4.000 kg Produkt/kg freie Enzyme 400-2.000 kg Produkt/kg immobilisierte Enzyme
Bulkchemie	1	0,05	immobilisierte Enzyme: 100-500 Euro/kg Biokatalysator	700-2.000 kg Produkt/kg Trockenmasse 5.000-2.0000 kg Produkt/kg freie Enzyme 2.000-1.0000 kg Produkt/kg immobilisierte Enzyme

Quelle: Tufvesson et al. 2011

Da die Kosten für die Biokatalyse in der Regel recht hoch sind, ist häufig eine hohe Produktivität notwendig, damit der Anteil der Biokatalysatorkosten am Gesamtprodukt in einem engen Rahmen bleibt. In der Regel dürfen die Biokatalysatorkosten für Produkte mit einer hohen Wertschöpfung und einem niedri-



gen Produktionsvolumen wie Pharmazeutika einen deutlich höheren Anteil an den Gesamtkosten einnehmen (~ 10 Euro/kg Endprodukt) als bei Bulkchemikalien (0,05 Euro/kg Endprodukt). Tabelle IV.3 zeigt, welche Produktivitätsziele typischerweise in den verschiedenen Produktkategorien erreicht werden müssen, um die jeweilige Höchstgrenze des Kostenbeitrags der Biokatalysatoren nicht zu überschreiten. Diese Darstellung verdeutlicht, dass sich die Anforderungen an die Biokatalyse bezüglich der Kosten und damit die Relevanz der Kostenwettbewerbsfähigkeit unterscheiden.

Ein wesentliches Problem für viele Anwendungen der industriellen Biotechnologie sind die aktuell noch zu geringen Raum-Zeit-Ausbeuten, da wegen der niedrigen Produktivität/Zeiteinheit unwirtschaftlich große Anlagen bzw. lange Prozessdauer erfordern würden. Daneben ist die Verringerung der Zahl der Prozessschritte – z.B. durch die Integration von Downstream Processing und Produktaufreinigung in kontinuierlichen Prozessen – eine entscheidende Frage. Kontinuierliche Prozesse würden die Produktionskapazität erheblich erhöhen und die Investitionen und laufenden Kosten reduzieren (OECD 2010a).

Volkswirtschaftliche Bedeutung

5.

Der industriellen Biotechnologie wird häufig ein großes volkswirtschaftliches Potenzial zugesprochen. Die Erkenntnisse über Art und Umfang der volkswirtschaftlichen Effekte der industriellen Biotechnologie sind aber bislang eher gering: Es existieren nur wenige Studien, die sich zudem auf sehr verschiedene volkswirtschaftliche Zusammenhänge oder Abgrenzungen der industriellen Biotechnologie beziehen. Im Folgenden werden zunächst die bisherigen Studien bezüglich ihrer Aussagekraft und inhaltlichen Ergebnisse analysiert. Darauf aufbauend werden die zentralen Aussagen zu Art und Umfang der volkswirtschaftlichen Effekte der industriellen Biotechnologie zusammengefasst.

Empirische Ergebnisse bisheriger Studien

Die bisherigen Studien beschäftigen sich in der Regel mit aktuellen und/oder zukünftigen Effekten auf Wertschöpfung und Beschäftigung. Für diese Wirkungsbereiche kann zwischen Brutto- und Nettoeffekten unterschieden werden. *Bruttoeffekte* umfassen die gesamte Wertschöpfung oder Beschäftigung, die in irgendeiner Art und Weise mit der betrachteten Aktivität (hier IBT-Prozesse und -Produkte) verbunden sind. Sie umfassen deutlich mehr als die direkten Beschäftigungszahlen in den IBT-Unternehmen und berücksichtigen auch indirekte Effekte. Diese indirekten Effekte entstehen aus Investitionstätigkeiten (z.B. Bau und Modernisierung von IBT-Produktionsanlagen und



Labors) sowie durch Ausgaben für Vorleistungskäufe (z.B. nachwachsende Rohstoffe, FuE- u. Ingenieurdienstleistungen) in vorgelagerten Zulieferindustrien (Nusser et al. 2007). Teilweise werden sogar Aktivitäten in nachgelagerten Industrien (z.B. chemische Weiterverarbeitung von IBT-Produkten) hinzugezählt. Dies ist im Falle langer Wertschöpfungsketten – wie es beispielsweise bei einigen stofflichen Anwendungen von Biomasse der Fall ist – methodisch problematisch, da die hinzugezählten Aktivitäten kaum kausal auf den eingesetzten Rohstoff oder Konversionsprozess zurückzuführen sind.

Verschiedene Studien zeigen, dass die industrielle Biotechnologie oder die stoffliche Nutzung von Biomasse einen erheblichen Teil der Volkswirtschaft beeinflusst. Ihre Ergebnisse unterscheiden sich aber deutlich, da äußerst unterschiedliche Aktivitäten bzw. Teile von Wertschöpfungsketten hinzugezählt werden.

Zunehmende Verbreitung erlangen in jüngerer Vergangenheit Angaben zur gesamten »Bioökonomie«, die häufig nicht deutlich von der industriellen Biotechnologie abgegrenzt werden. So lag nach Angaben von BECOTEPS (2011) die Beschäftigtenzahl in Europa im Jahr 2009 im Bereich der Bioökonomie bei 21 Mio. Personen, dies wären 9% der gesamten Beschäftigten in Europa. Der Anteil am Bruttoinlandsprodukt wurde sogar auf 17% geschätzt. Es wurden dabei der komplette Lebensmittel-, Papier- und Agrarsektor (inklusive Tierfutter etc.) mit eingeschlossen.¹¹ Damit geht der Fokus aber sehr weit über den Untersuchungsgegenstand dieser Studie hinaus. Auf vergleichsweise ähnlichem Niveau liegen Ergebnisse des Johann Heinrich von Thünen-Instituts bei einer Abschätzung der volkswirtschaftlichen Bedeutung der biobasierten Wirtschaft in Deutschland (Efken et al. 2012). Dort werden alle Aktivitäten von der Primärproduktion über die Verarbeitung und Vermarktung bis zu den Dienstleistungen berücksichtigt. Die Verarbeitung wird dabei vor allem unter Zuhilfenahme der Material- und Wareneingangserhebung abgeschätzt, sodass beispielsweise die Sektoren Chemie und Textil nur anteilig, d. h. nach Anteil des Rohstoffeinsatzes der biobasierten Wirtschaft zugerechnet werden. Den Berechnungen zu Folge sind knapp 5 Mio. Beschäftigte (ca. 12,5% aller Beschäftigten) der biobasierten Wirtschaft zuzuordnen. Die Bruttowertschöpfung beträgt knapp 165 Mrd. Euro, damit liegt der Anteil der biobasierten Wirtschaft bei etwa 7,6% der deutschen Gesamtwirtschaft.

In einem engeren Ansatz zur Bezifferung der Bioökonomie werden nur bestimmte Unterkategorien der relevanten Wirtschaftssektoren (u. a. des Lebensmittel-, Chemie-, Pharma- und Agrarsektors) zur Bioökonomie gezählt (Pellerin/Taylor 2010). Demnach wird der Anteil der Bioökonomie in Deutschland

11 Überraschenderweise wurde nur ein kleiner Teil der Chemieindustrie dazu gezählt.



auf rund 4,3% des Bruttoinlandsprodukts geschätzt, in einigen anderen Ländern (USA, Kanada, Frankreich) liegt der Anteil etwas höher.

In einer Studie von Nusser et al. (2007) wurden die direkten und indirekten Effekte konkreter für die industrielle Biotechnologie erfasst, indem Schätzwerte von Experten für die Anteile der industriellen Biotechnologie für einzelne wichtigen Anwenderbranchen (Chemie, Lebensmittel/Getränke, Pharma) verwendet wurden. Die damit verbundenen direkten und indirekten Beschäftigungseffekte wurden mithilfe von Input-Output-Analysen abgeschätzt. Im Ergebnis betragen die direkten Beschäftigungseffekte in den Anwenderbranchen im Jahr 2004 in Summe 82.800 bis 198.100 Arbeitsplätze, die indirekten Beschäftigungseffekte in Vorleistungssektoren 154.200 bis 362.000. Für das Jahr 2025 wurde eine Steigerung auf einen Beschäftigungskorridor von 154.800 bis 274.700 (direkt) bzw. 298.700 bis 536.300 (indirekt) abgeschätzt (Nusser et al. 2007).

Betrachtungen der *Nettoeffekte* zielen stärker auf die Veränderung der Wertschöpfung und Beschäftigung ab. Diese Effekte berücksichtigen, dass durch eine bestimmte Aktivität in der Regel eine andere Aktivität substituiert wird, deren Effekte dann nicht zur Geltung kommen können (Carus et al. 2010). Beispielsweise werden durch die industrielle Biotechnologie traditionelle chemische Verfahren substituiert, deren Verdrängung bei der Analyse berücksichtigt werden muss. Gleiches gilt für die Effekte auf die Produktivität, Nachfrage oder internationale Wettbewerbsfähigkeit, die sich in der Regel ebenfalls durch die Diffusion von IBT-Produkten und Prozessen in den Sektoren verändern. Eine besondere Schwierigkeit bei der Berechnung der Nettoeffekte liegt dabei in der Auswahl eines geeigneten Referenzsystems, d. h. in der Bestimmung, was ohne den biotechnologischen Fortschritt passieren würde. Häufig wird ein Vergleichsszenario (Business-as-usual-Szenario) für alternative Entwicklungen ohne den technischen Fortschritt oder ohne bestimmte politische Maßnahmen aufgestellt. Folglich wird nicht die Veränderung gegenüber dem heutigen, sondern einem angenommenen zukünftigen Beschäftigungsstand gemessen. Die auf diese Weise berechneten Ergebnisse hängen wesentlich von der Wahl des Vergleichsszenarios ab: So könnte beispielsweise im Vergleichsszenario einerseits davon ausgegangen werden, dass der Agrarsektor bereits ausgelastet ist. Dann würde durch neue, zusätzliche Wertschöpfungsketten für biobasierte Produkte die Agrarproduktion für andere Zwecke (Futtermittel, Lebensmittel, Export, energetische Verwendung) reduziert. Andererseits könnte ein Vergleichsszenario auch plausibel so konstruiert werden, dass aufgrund des möglichen technischen Fortschritts zusätzliche Agrarflächen für Wertschöpfungsketten der industriellen Biotechnologie erschlossen werden können. In diesem Szenario würden sich somit eine zusätzliche künftige Bewirtschaftung und damit verbundene wirtschaftliche Effekte ergeben.



Mehrere Berechnungen der Nettoeffekte liegen für Biokraftstoffe (u. a. Neuwahl et al. 2008; Wydra 2010) und erneuerbare Energien (u. a. Ragwitz et al. 2009; Staiß et al. 2006) vor. Diese Studien kommen meist zu dem Ergebnis, dass die weitere Verbreitung dieser Produkte zu positiven Effekten in Relation zum jeweiligen Vergleichsszenario führt. Zu beachten ist, dass die jeweiligen Vergleichsszenarien meist eine negative Beschäftigungsentwicklung gegenüber dem heutigen Stand annehmen.

Für die industrielle Biotechnologie gibt es bislang kaum Untersuchung zu Nettoeffekten. Wydra (2010) schließt in seiner Analyse neben anderen Biotechnologieanwendungsfeldern die Produktgruppen Biopolymere¹² und biotechnologisch hergestellte Fein- und Spezialchemikalien mit ein. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die wirtschaftlichen Auswirkungen und relevanten Einflussgrößen erheblich zwischen den verschiedenen Produktgruppen unterscheiden. Für Biopolymere ergibt sich hauptsächlich durch die Rohstoffsubstitution ein leicht positiver Beschäftigungseffekt. Für biotechnologisch hergestellte Fein- und Spezialchemikalien wird vor allem aufgrund eines Anstieges der Arbeitsproduktivität und hoher Importquoten für die notwendigen Rohstoffe (Öle, Fette etc.) ein leicht negativer Beschäftigungseffekt erwartet. Insgesamt sind die Nettoeffekte aber sehr gering, da sich die Wertschöpfungsketten von biotechnologischen und traditionellen Chemikalien bei vielen Kostenparametern (u. a. Investitionskosten, Hilfs-/Betriebsmittel, Energie bezogen auf die Mengeneinheit des Produkts) nur sehr begrenzt voneinander unterscheiden.

Diskussion der wirtschaftlichen Effekte der industriellen Biotechnologie

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Erkenntnislage über die volkswirtschaftlichen Effekte der industriellen Biotechnologie zurzeit begrenzt ist. Tendenziell lässt sich aber eine Entwicklung beobachten, die auch für andere Querschnittstechnologien mit verschiedenen Anwendungssektoren gilt: Die gesamtwirtschaftliche Bedeutung solcher Technologien resultiert nur zum Teil aus der Entwicklung eines eigenen Sektors oder einem erhöhten Wachstum existierender Sektoren. Gerade in lang etablierten Branchen wie der Agrarwirtschaft, der Chemie oder der Kunststoffindustrie führt der technologische Fortschritt kaum zu einem Beschäftigungszuwachs. Bedeutsam ist hier allein schon die Aufrechterhaltung des Wachstums. Biotechnologische Innovationen dienen als »Enabler« dafür, dass die Branchen angesichts von Sättigungstendenzen auf der Marktseite und z. T. weit ausgereizter existierender konventioneller Produk-

12 Dabei werden nur solche Biopolymere berücksichtigt, die sowohl biotechnologisch hergestellt werden als auch auf nachwachsenden Rohstoffen basieren.



tionsverfahren auch weiterhin Wachstumspotenziale erschließen können. Gerade bei sehr wissensintensiven Anwendungen trägt der Einsatz der industriellen Biotechnologie zur Wettbewerbsfähigkeit und Sicherung der inländischen Wertschöpfungsschritte bei. Dabei können Wandlungsprozesse in den Sektoren angeregt werden, bei denen einige z. T. neue Unternehmen an Größe und Mitarbeiterzahl zulegen, andere aber verlieren. Im globalen Wettbewerb ist es entscheidend für traditionelle Industrieländer wie Deutschland, bei der Entwicklung und Nutzung von Technologien eine führende Position einzunehmen, um Wertschöpfung und Arbeitsplätze nicht zu gefährden. Ein deutlicher Zuwachs an Wertschöpfung und Beschäftigung durch die industrielle Biotechnologie ist wie bei vielen anderen Technologien eher unwahrscheinlich, da es in vielen Fällen zu einer Substitution existierender Märkte und Wertschöpfungsketten kommen wird und ein weiterer Zugewinn von Weltmarktanteilen kaum möglich erscheint.

Fazit

6.

Zusammenfassend zeigt sich bisher eine kontinuierliche, stetig ansteigende Entwicklung bei der Kommerzialisierung von Produkten und Verfahren in der industriellen Biotechnologie. Marktprognosen der industriellen Biotechnologie sind für viele Produktgruppen bzw. Marktsegmente sehr positiv, es wird in den kommenden Jahren und Jahrzehnten jeweils ein deutlicher Anstieg am Anteil des Gesamtmarkts erwartet. Allerdings waren die Marktprognosen auch für das vergangene Jahrzehnt sehr positiv, sind aber nicht im prognostizierten Maße eingetroffen. Ob dies diesmal anders sein wird, ist schwer vorauszusehen, da die Kommerzialisierung der industriellen Biotechnologie von einer Vielzahl von Treibern und Barrieren beeinflusst wird. Immerhin lässt sich sowohl für die Aktivitäten meist größerer Unternehmen bei Bulkchemikalien als auch bei den dedizierten Unternehmen in der industriellen Biotechnologie aktuell eine positive Entwicklung erkennen. Große Herausforderungen ergeben sich bislang bei der Entwicklung geeigneter Geschäftsmodelle und bei der (Kosten-)Wettbewerbsfähigkeit biotechnologischer Produkte. Gerade für Bulkchemikalien spielen die Rohstoffkosten eine ganz entscheidende Rolle. Aufgrund von engen Angebots- und Nachfragebeziehungen sind die Preise für Agrarrohstoffe und -produkte eng mit dem Ölpreis verbunden. Aufgrund weiterer Einflussfaktoren (u. a. Ernteausfälle) lagen die prozentualen Preisanstiege für Agrarrohstoffe in den letzten zehn Jahren sogar über denen des Öls. Für die kommenden 10 Jahre erscheint ein Anstieg des Ölpreises bei leicht sinkenden Preisen für Agrarprodukte wahrscheinlich (OECD/FAO 2014), dies würde aber die Entwicklungen der letzten Jahre nur moderat überkompensieren. Insgesamt kann – wie vor



allem die Entwicklung des Ölpreises in den Jahren 2014 und 2015 zeigte – nicht davon ausgegangen werden, dass es in absehbarer Zeit durch einen alleinigen starken Anstieg des Ölpreises zu einer erheblichen Verbesserung der relativen Kostenwettbewerbsfähigkeit biobasierter Produkte kommt.

Bezogen auf die internationale Wettbewerbsposition lässt sich festhalten, dass Deutschland im internationalen Vergleich durchaus über eine gute technologische Basis sowie konkurrenzfähige industrielle Akteure in der industriellen Biotechnologie verfügt. Allerdings zeigen sowohl die Produktions- als auch Exportdaten, dass Deutschland als Standort bei traditionellen Produkten, die mit industriellen biotechnologischen Verfahren hergestellt werden, eine begrenzte Bedeutung hat. Auch der aktuelle Aufbau von Produktionsstätten bei biobasierten Bulkchemikalien findet außerhalb Deutschlands statt. Als Hauptgründe gelten die geringe Rohstoffverfügbarkeit und die hohen Rohstoffkosten. Damit Deutschland nicht nur eine Rolle als Technologieführer in der IBT erreicht, sondern auch in der Produktion eine nennenswerte Position einnehmen kann – welche langfristig auch positive Rückwirkung auf die Entwicklung als FuE-Standort hätte –, wäre eine Etablierung bei der Produktion in Bereichen mit geringeren Volumen und anteilmäßigen Rohstoffkosten von zentraler Bedeutung, beispielsweise bei der Weiterverarbeitung zu Fein- und Spezialchemikalien, Kunststoffanwendungen u. a. m. Eine solche Entwicklung würde mit signifikanten positiven wirtschaftlichen Effekten einhergehen. Dabei würden vor allem bestehende Arbeitsplätze in den etablierten Anwenderindustrien der IBT gesichert werden, ein großer Zuwachs an Wachstum und Beschäftigung ist hingegen nicht zu erwarten.





Literatur

- Aehle, W. (2007): Enzymes in industry. Production and applications. Weinheim
- Al-Kaidy, H.; Duwe, A.; Huster, M.; Muffler, K.; Schlegel, C.; Sieker, T.; Stadtmüller, R.; Tippkötter, N.; Ulber, R. (2014): Biotechnologie und Bioverfahrenstechnik – Vom ersten Ullmanns Artikel bis hin zu aktuellen Forschungsthemen. In: Chemie Ingenieur Technik 86(12), S. 2215–2225
- Andexer, J.; Richter, M. (2015): Emerging enzymes for ATP regeneration in biocatalytic processes. In: ChemBioChem 16(3), S. 380–386
- Aschhoff, B.; Crass, D.; Cremers, K.; Grimpe, C.; Rammer, C.; Brandes, F.; Diaz-Lopez, F.; Klein Woolthuis, R.; Mayer, M.; Montalvo, C. (2010): European competitiveness in key enabling technologies. Mannheim/Delft
- Asghari, I.; Mousavi, S.; Amiri, F.; Tavassoli, S. (2013): Bioleaching of spent refinery catalysts: A review. In: Journal of Industrial and Engineering Chemistry 19(4), S. 1069–1081
- Aslesen, H.W. (2008): Prospective innovation challenges in the food and drink sector. Final report, 28.04.2008. o.O.
- Bajpai, P. (2012): Biotechnology for pulp and paper processing. New York u. a. O.
- BASF (SE) (o.J.): Original – der kompostierbare Kunststoff ecoflex®. www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/content/products/biodegradable_plastics/ecoflex (21.4.2016)
- Basketter, D.; Berg, N.; Broekhuizen, C.; Fieldsend, M.; Kirkwood, S.; Kluin, C.; Mathieu, S.; Rodriguez, C. (2012): Enzymes in cleaning products: An overview of toxicological properties and risk assessment/management. In: Regulatory Toxicology and Pharmacology 64(1), S. 117–123
- Basketter, D.; Broekhuizen, C.; Fieldsend, M.; Kirkwood, S.; Mascarenhas, R.; Maurer, K.; Pedersen, C.; Rodriguez, C.; Schiff, H. (2010): Defining occupational and consumer exposure limits for enzyme protein respiratory allergens under REACH. In: Toxicology 268(3), S. 165–170
- Bauer, F.; Hultberg, C. (2013): Is there a future in glycerol as a feedstock in the production of biofuels and biochemicals? In: Biofuels, Bioproducts and Biorefining 7(1), S. 43–51
- bcc Research (2012): Global markets for enzymes in industrial applications. www.bccresearch.com/report/enzymes-industrial-applications-markets-bio030g.html (21.4.2016)
- Becker, J.; Zelder, O.; Häfner, S.; Schröder, H.; Wittmann, C. (2011): From zero to hero – design-based systems metabolic engineering of *Corynebacterium glutamicum* for L-lysine production. In: Metabolic Engineering 13(2), S. 159–168
- BECOTEPS (Bio-Economy Technology Platforms) (2011): The European bioeconomy in 2030. Delivering sustainable growth by addressing the grand societal challenges. BECOTEPS white paper, o. O.
- Beer, C.; Reichstein, M.; Tomelleri, E.; Ciais, P.; Jung, M.; Carvalhais, N.; Rödenbeck, C.; Arain, M.; Baldocchi, D.; Bonan, G.; Bondeau, A.; Cescatti, A. et al. (2010): Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. In: Science 329(5993), S. 834–838
- BfR (Bundesamt für Risikobewertung) (o.J.): Gesundheitliche Bewertung von kosmetischen Mitteln. www.bfr.bund.de/de/gesundheitliche_bewertung_von_kosmetischen_mitteln-242.html (21.4.2016)



- BÖR (Forschungs- und Technologierat Bioökonomie) (2012): Anforderungen an eine Bioinformatik-Infrastruktur in Deutschland zur Durchführung von bioökonomie-relevanter Forschung. Empfehlungen des BioÖkonomieRats. Berlin
- BÖR (2014): Nachhaltige Bereitstellung von biobasierten agrarischen Rohstoffen. Hintergrundpapier, Berlin
- biotechnologie.de (2007–2014): Die deutsche Biotechnologie-Branche. Jährliche Firmenumfrage. Eine Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/Hintergrund/studien-statistiken.html (21.4.2016)
- biotechnologie.de (2014): Die deutsche Biotechnologie-Branche 2013. www.biotechnologie.de/BIO/Navigation/DE/Hintergrund/studien-statistiken,did=163892.html?listBIIId=74636& (21.2.2016)
- BIO-TIC (2014a): Overcoming hurdles for innovation in industrial biotechnology in Europe – BIO-TIC Market Roadmap Draft 2, www.industrialbiotech-europe.eu/new/wp-content/uploads/2014/04/Executive-Summary-of-Market-Roadmap_Draft-2_April-2014.pdf (21.2.2016)
- BIO-TIC (2014b): Overcoming hurdles for innovation in industrial biotechnology in Europe Biobased Chemical Building Blocks – Workshop Report, www.industrialbiotech-europe.eu/new/wp-content/uploads/2015/02/CBBs-workshop-report-website.pdf (21.2.2016)
- BMBF (Bundesministeriums für Bildung und Forschung) (2007): Weiße Biotechnologie. Chancen für neue Produkte und umweltschonende Prozesse. Bonn/Berlin
- BMBF (2010): Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030. Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft. Bonn/Berlin
- BMBF (2014): Wegweiser Bioökonomie. Forschung für biobasiertes und nachhaltiges Wirtschaftswachstum. Berlin
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2014): Nationale Politikstrategie Bioökonomie. Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie. Bonn/Berlin
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2015): BMWi-Branchenfokus Textil und Bekleidung. www.bmwi.de/DE/Themen/Wirtschaft/branchenfokus,did=196528.html (12.2.2016)
- Bode, A.; Hardt, P.; Pöhling, M.; Rauch, W.; Schröder, V.; Tausch, M.W.; Tiedemann, W.; Uppenkamp, M.; Vielfort, A. (2007): Informationsserie Textilchemie. Fonds der Chemischen Industrie (FCI) im Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt a.M.
- Bormann, R.; Fink, P.; Iwer, F.; Schade, W. (2014): Wie Phönix aus der Asche? Zur Zukunft der Automobilindustrie in Deutschland. Diskussionspapier der Arbeitskreise Innovative Verkehrspolitik und Nachhaltige Strukturpolitik der Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn
- Bornscheuer, U.T.; Huisman, G.W.; Kazlauskas, R.J.; Lutz, S.; Moore, J.C.; Robins, K. (2012): Engineering the third wave of biocatalysis. In: *Nature* 485(7397), S.185–194
- Bozell, J.J.; Holladay, J.E.; Johnson, D.; White, J.F. (2007): Top value added chemicals from biomass. Volume II – Results results of screening for potential candidates from biorefinery lignin. Pacific Northwest National Laboratory Report No. PNNL 16983, Richland

- Bozell, J.J. Petersen, G.R. (2010): Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates – the US Department of Energy's »top 10« revisited. In: *Green Chemistry* 12(4), S. 539–554
- Brandt, F.S.; Cazzaniga, A.; Hann, M. (2011): Cosmeceuticals: current trends and market analysis. In: *Seminars in Cutaneous Medicine and Surgery* 30(3), S. 141–143
- Brellochs, A.; Kämpf, K.; Schmolke, A.; Wolff, H. (2001): Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren am Beispiel ausgewählter Grund- und Feinchemikalien. FKZ 298 67 411, UBA-Texte 16/01. Berlin
- Brierley, C.L.; Brierley, J.A. (2013): Progress in bioleaching: part B: applications of microbial processes by the minerals industries. In: *Applied Microbiology and Biotechnology* 97(17), S. 7543–7552
- Broll, H.; Zagon, J. (2006): Entwicklung und Validierung von Nachweisverfahren für genetisch veränderte Lebens- und Futtermittel. In: *Forschungsreport* 2006(1), S. 33–36
- Bujara, M., Panke, S. (2012): In silico assessment of cell-free systems. In: *Biotechnology and Bioengineering* 109(10), S. 2620–2629
- Bundesregierung (2012): Roadmap Bioaffinerien im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Berlin
- Carus, M.; Baltus, W.; Carrez, D.; Kaeb, H.; Ravenstijn, J.; Zepnik, S. (2013): Market study on bio-based polymers in the world. Capacities, production and applications: status quo and trends towards 2020. Kurzfassung, Hürth
- Carus, M.; Piotrowski, S.; Raschka, A. (2010): Studie zur Entwicklung von Förderinstrumenten für die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland. Volumen, Struktur, Substitutionspotenziale, Konkurrenzsituation und Besonderheiten der stofflichen Nutzung sowie eine Entwicklung von Förderinstrumenten. Langfassung, Hürth
- Carus, M.; Raschka, A.; Fehrenbach, H.; Rettenmaier, N.; Dammer, L.; Köppen, S.; Thöne, M.; Dobroschke, S.; Diekmann, L.; Hermann, A.; Hennenberg, K.; Essel, R. et al. (2014): Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse. UBA-Texte 01/2014, Dessau-Roßlau
- Casteleijn, M.G.; Urtti, A.; Sarkhel, S. (2013): Expression without boundaries: Cell-free protein synthesis in pharmaceutical research. In: *International Journal of Pharmaceutics* 440(1), S. 39–47
- Catherine, C.; Lee, K.H.; Oh, S.J.; Kim, D.M. (2013): Cell-free platforms for flexible expression and screening of enzymes. In: *Biotechnology Advances* 31(6), S. 797–803
- CEFIC (The European Chemical Industry Council) (2014): Measuring bio-based raw materials use in the chemical industry. Brüssel
- Cherubini, F.; Jungmeier, G.; Wellisch, M.; Willke, T.; Skiadas, I.; van Ree, R.; de Jong, E. (2009): Toward a common classification approach for biorefinery systems. In: *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 3(5), S. 534–546
- Chmiel, H. (2011): Bioprozesstechnik. Heidelberg
- Ciais, P.; Sabine, C.; Bala, G.; Bopp, L.; Brovkin, V.; Canadell, J.; Chhabra, A.; DeFries, R.; Galloway, J.; Heimann, M.; Jones, C. et al. (2013): Carbon and other biogeochemical cycles. In: *Climate change 2013: The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge/New York, S. 465–571



- Clomburg, J.M.; Gonzalez, R. (2013): Anaerobic fermentation of glycerol: a platform for renewable fuels and chemicals. In: *Trends in Biotechnology* 31(1), S. 20–28
- Cloots, L.; Marchal, K. (2011): Network-based functional modeling of genomics, transcriptomics and metabolism in bacteria. In: *Current Opinion in Microbiology* 14(5), S. 599–607
- Commerzbank (AG) (2014): Technische Textilien. Branchenbericht, Frankfurt a. M.
- de Coninck, H.; Benson, S.M. (2014): Carbon dioxide capture and storage: issues and prospects. In: *Annual Review of Environment and Resources* 39(1), S. 243–270
- Crank, M.; Patel, M.; Marscheider-Weidemann, F.; Schleich, J.; Hüsing, B.; Angerer, G. (2004): Techno-economic feasibility of large-scale production of bio-based polymers in Europe (PRO-BIP). Final report, Sevilla
- Damborsky, J.; Brezovsky, J. (2014): Computational tools for designing and engineering enzymes. In: *Current Opinion in Chemical Biology* 19(1), S. 8–16
- DECHEMA (Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.) (2011): *Biotechnologie von morgen. Herausforderungen und Perspektiven*. Frankfurt a. M.
- Dettmer, A.; Cavalli, E.; Ayub, M.A.Z.; Gutterres, M. (2012): Environmentally friendly hide unhairing: enzymatic hide processing for the replacement of sodium sulfide and deliming. In: *Journal of Cleaner Production* 47, S. 11–18
- Dettmer, A.; Dos Anjos, P.S.; Gutterres, M. (2013): Special review paper: Enzymes in the leather industry. In: *Journal of the American Leather Chemists Association* 108(4), S. 146–158
- Dillon, H.; Pate, R.; Shonsey, E.; Smith, C. (2009): Roundtable discussion: algae production systems: opportunities & challenges. In: *Industrial Biotechnology* 5(4), S. 216–226
- Dobson, R.; Gray, V.; Rumbold, K. (2012): Microbial utilization of crude glycerol for the production of value-added products. In: *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 39(2), S. 217–226
- Dudley, Q.M.; Karim, A.S.; Jewett, M.C. (2015): Cell-free metabolic engineering: biomanufacturing beyond the cell. In: *Biotechnology Journal* 10(1), S. 69–82
- E.ON Hanse (AG) (o.J.): Hamburger Mikroalgenforschungsprojekt. www.eon-hanse.com/pages/eha_de/Engagement/Green_Capital/Mikroalgenprojekt_Hamburg/Mikroalgenprojekt_Hamburg/index.htm (13.7.2012)
- Eckert, R. (2010): *Weißer Biotechnologie als Antriebskraft für wirtschaftlichen Aufschwung. Empirische Analyse der Bestimmungsfaktoren der Entstehung und Entwicklung einer jungen technologieorientierten Branche*. Hamburg
- ECO SYS (GmbH) (2011): *Die Wettbewerbsfähigkeit der Bundesrepublik Deutschland als Standort für die Fermentationsindustrie im internationalen Vergleich*. Schopfheim
- Eduard, W.; Heederik, D.; Duchaine, C.; Green, B.J. (2012): Bioaerosol exposure assessment in the workplace: the past, present and recent advances. In: *Journal of Environmental Monitoring* 14(2), S. 334–339
- Efken, J.; Banse, M.; Rothe, A.; Dieter, M.; Dirksmeyer, W.; Ebeling, M.; Fluck, K.; Hansen, H.; Kreins, P.; Seintsch, B.; Schweinle, J.; Strohm, K. et al. (2012): Volkswirtschaftliche Bedeutung der biobasierten Wirtschaft in Deutschland. In: *Arbeitsberichte aus der vTI-Agrarökonomie* 2012(7), S. 1–54
- Elleuche, S.; Schröder, C.; Sahm, K.; Antranikian, G. (2014): Extremozymes – biocatalysts with unique properties from extremophilic microorganisms. In: *Current Opinion in Biotechnology* 29(1), S. 116–123

- EnBW Energie Baden-Württemberg (AG) (2008): EnBW untersucht neuartige Algenzucht zur CO₂-Bindung. Pressemitteilung, 16.7.2008, Karlsruhe
- Enzing, C.; Ploeg, M.; Barbosa, M.; Sijtsma, L. (2014): Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe. Report EUR 26255 EN, o. O.
- Europäische Kommission (2012): Eine europäische Strategie für Schlüsseltechnologien – Eine Brücke zu Wachstum und Beschäftigung. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. COM(2012) 341 final, Brüssel
- European Bioplastics (o. J.): Market. <http://en.european-bioplastics.org/market/> (25.6.2012)
- European Commission (2012): Innovating for sustainable growth: A bioeconomy for Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2012) 60 final, Brüssel
- Fernando, S.; Adhikari, S.; Chandrapal, C.; Murali, N. (2006): Biorefineries: current status, challenges, and future direction. In: Energy and Fuels 20(4), S. 1727–1737
- Festel Capital (2009): Industry structure and business models for industrial biotechnology. DSTI/STP/BIO(2009)22, Paris
- Festel Capital (2012): Industrial biotechnology – markets and industry structure. In: Journal of Commercial Biotechnology 18(1), S. 11–21
- Field, C.B.; Behrenfeld, M.J.; Randerson, J.T.; Falkowski, P. (1998): Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. In: Science 281(5374), S. 237–240
- Flaschel, E.; Sell, D. (2005): Charme und Chance der Weißen Biotechnologie. In: Chemie Ingenieur Technik 9(77), S. 1298–1312
- FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.) (2014a): Basisdaten biobasierte Produkte. Anbau, Rohstoffe, Produkte. Gülzow-Prüzen
- FNR (2014b): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2014. Festbrennstoffe, Biokraftstoffe, Biogas. Gülzow-Prüzen
- FNR (2014c): Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe Band 34. Gülzow-Prüzen
- FONA (Forschung für nachhaltige Entwicklung), BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2008): RWE startet CO₂-Konversions-Pilotanlage auf Basis einer von der Jacobs University optimierten Meeressalgentechnologie. www.fona.de/de/13063 (16.2.2016)
- Frasch, H.J.; Medema, M.H.; Takano, E.; Breitling, R. (2013): Design-based re-engineering of biosynthetic gene clusters: plug-and-play in practice. In: Current Opinion in Biotechnology 24(6), S. 1144–1150
- Frauenstein, J.; Mahrle, S. (2009): Neues von der Jagd nach dem Boden – Stationäre Bodenbehandlungsanlagen in Deutschland. In: Altlasten Spektrum 2009(2), S. 85–98
- Frost & Sullivan (Limited) (2003): Advances in biotechnology for the manufacture of chemicals. Parts I and II, London
- Frost & Sullivan (2010): European market for enzymes in food applications. M55B-88, London
- Frost & Sullivan (2011a): European bioplastics packaging market. M662-01, London



- Frost & Sullivan (2011b): Plastics advisor alert. Artificial microvascular systems for self-healing materials; biodegradable plastic from microalgae; compostable single-use bags for packaging industry. Plastics Advisor TechVision Opportunity Engine, D824-00-16, 28.10.2011, London
- Frost & Sullivan (2011c): White Biotechnology. N8E3-39, London
- Frost & Sullivan (2013): Emerging Trends in bio-chemicals. D4C3-TI, London
- Galimberti, A.; De Mattia, F.; Losa, A.; Bruni, I.; Federici, S.; Casiraghi, M.; Martellos, S.; Labra, M. (2013): DNA barcoding as a new tool for food traceability. In: *Food Research International* 50(1), S. 55–63
- Gaskell, G.; Stares, S.; Allansdottir, A.; Allum, N.; Castro, P.; Esmer, Y.; Fischler, C.; Jackson, J.; Kronberger, N.; Hampel, J.; Mejlgaard, N.; Quintanilha, A. et al. (2010): Europeans and biotechnology in 2010. Winds of change? A report to the European Commission's Directorate-General for Research. EUR 24537 EN, o. O.
- Gehrke, B.; Schasse, U.; Ostertag, K. (2014): Wirtschaftsfaktor Umweltschutz. Produktion-Außenhandel-Forschung-Patente: Die Leistungen der Umweltschutzwirtschaft in Deutschland. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Umwelt, Innovation, Beschäftigung 01/2014
- Gibson, D.G.; Glass, J.I.; Lartigue, C.; Noskov, V.N.; Chuang, R.Y.; Algire, M.A.; Benders, G.A.; Montague, M.G.; Ma, L.; Moodie, M.M.; Merryman, C.; Vashee, S. et al. (2010): Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. In: *Science* 329(5987), S. 52–56
- Gong, Y.; Hu, H.; Gao, Y.; Xu, X.; Gao, H. (2011): Microalgae as platforms for production of recombinant proteins and valuable compounds: progress and prospects. In: *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 38(12), S. 1879–1890
- Grimm, V.; Braun, M.; Teichert, O.; Zweck, A. (2011): Biomasse – Rohstoff der Zukunft für die chemische Industrie. Übersichtsstudie. Zukünftige Technologien (ZTC-Reihe) Nr. 90, Düsseldorf
- Guebitz, G.M.; Cavaco-Paulo, A. (2008): Enzymes go big: surface hydrolysis and functionalisation of synthetic polymers. In: *Trends in Biotechnology* 26(1), S. 32–38
- Guedes, A.C.; Amaro, H.M.; Malcata, F.X. (2011): Microalgae as sources of high added-value compounds – a brief review of recent work. In: *Biotechnology Progress* 27(3), S. 597–613
- Harris, D.C.; Jewett, M.C. (2012): Cell-free biology: exploiting the interface between synthetic biology and synthetic chemistry. In: *Current Opinion in Biotechnology* 23(5), S. 672–678
- Hede, P.D.O. (2014): A beginner's guide to enzymes in detergents. In: *International News on Fats, Oils and Related Materials* 25(7), S. 471–475
- Hennebel, T.; Boon, N.; Maes, S.; Lenz, M. (2015): Biotechnologies for critical raw material recovery from primary and secondary sources: R&D priorities and future perspectives. In: *New Biotechnology* 32(1), S. 121–127
- Hirth, T. (2010): Mit nachwachsenden Rohstoffen dem Rohstoffwandel begegnen. Beitrag zum BMELV-Projekttag ›Stoffliche Biomassenutzung‹, 15.12.2010, Berlin
- Ho, S.H.; Chen, C.Y.; Lee, D.J.; Chang, J.S. (2011): Perspectives on microalgal CO₂-emission mitigation systems – a review. In: *Biotechnology Advances* 29(2), S. 189–198
- Hodgman, C.E.; Jewett, M.C. (2012): Cell-free synthetic biology: thinking outside the cell. In: *Metabolic Engineering* 14(3), S. 261–269

- Hoesl, M.G.; Budisa, N. (2011): In vivo incorporation of multiple noncanonical amino acids into proteins. In: *Angewandte Chemie – International Edition* 50(13), S. 2896–2902
- Hoesl, M.G.; Budisa, N. (2012): Recent advances in genetic code engineering in *Escherichia coli*. In: *Current Opinion in Biotechnology* 23(5), S. 751–757
- Hoppenheidt, K.; Mücke, W.; Peche, R.; Tronecker, D.; Roth, U.; Würdinger, E.; Hottenroth, S.; Rommel, W. (2005): Entlastungseffekte für die Umwelt durch Substitution konventioneller chemischtechnischer Prozesse und Produkte durch biotechnische Verfahren. UBA-Texte 07/05, Berlin
- Hortsch, R.; Weuster-Botz, D. (2010): Milliliter-scale stirred tank reactors for the cultivation of microorganisms. In: *Advances in Applied Microbiology* 73(C), S. 61–82
- Hüsing, B.; Angerer, G.; Gaisser, S.; Marscheider-Weidemann, F. (2003): Biotechnologische Herstellung von Wertstoffen unter besonderer Berücksichtigung von Energieträgern und Biopolymeren aus Reststoffen. UBA-Texte 64/03, Berlin
- Hüsing, B.; Gießler, S.; Jaeckel, G. (1998): Stand der Möglichkeiten von prozessintegrierten biotechnischen Präventivtechniken zur Vermeidung oder zur Verminderung von Umweltbelastungen. UBA-Texte 68/98, Berlin
- IEA Bioenergy Task 42 (Co-production of fuels, chemicals, power and materials from biomass) (2013): Integrated Countries Report 2010–2012. Copenhagen
- IfBB (Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe der Hochschule Hannover) (2014): Marktzahlen Biokunststoffe. ifbb.wp.hs-hannover.de/downloads/index.php (10.11.2014)
- IfBB (2015): Biopolymerplattform – das Informationsportal für Biokunststoffe des IfBB. www.downloads.ifbb-hannover.de (23.2.2015)
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2005): Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge
- IKW (Industrieverband Körperpflege- und Waschmittel e.V.) (2015): Entwicklung der Märkte Schönheitspflegemittel und Haushaltspflegemittel in Deutschland zu Endverbraucherpreisen. Pressemitteilung, Stand 1.12.2015, Frankfurt a. M.
- Jäger, G.; Büchs, J. (2012): Biocatalytic conversion of lignocellulose to platform chemicals. In: *Biotechnology Journal* 7(9), S. 1122–1136
- James, C. (2013): Global status of commercialized biotech/GM crops: 2013. International Service for Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA) Brief No. 46, Ithaca
- Jia, D.; Yang, Y.; Peng, Z.; Zhang, D.; Li, J.; Liu, L.; Du, G.; Chen, J. (2014): High efficiency preparation and characterization of intact poly(vinyl alcohol) dehydrogenase from *Sphingopyxis* sp.113P3 in *Escherichia coli* by inclusion bodies renaturation. In: *Applied Biochemistry and Biotechnology* 172(5), S. 2540–2551
- Johnson, D.B. (2014): Biomining-biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. In: *Current Opinion in Biotechnology* 30, S. 24–31
- Juwarkar, A.; Singh, S.; Mudhoo, A.Z. (2010): A comprehensive overview of elements in bioremediation. In: *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 9(3), S. 215–288
- Juwarkar, A.A.; Misra, R.R.; Sharma, J.K. (2014): Recent trends in bioremediation. In: Parmar, N.; Singh, A. (Hg.). *Geomicrobiology and Biogeochemistry*. Berlin/Heidelberg, S. 81–100
- Kaltwasser, B.; Gabrielczyk, T. (2011): Algen: »Wir sparen uns einfach den Biomasse-Schritt«. In: *Transkript* 17(6), S. 60–61



- Kara, S.; Schrittwieser, J.H.; Hollmann, F.; Ansorge-Schumacher, M.B. (2014): Recent trends and novel concepts in cofactor-dependent biotransformations. In: *Applied Microbiology and Biotechnology* 98(4), S. 1517–1529
- Kasiri, M.B.; Safapour, S. (2014): Natural dyes and antimicrobials for green treatment of textiles. In: *Environmental Chemistry Letters* 12(1), S. 1–13
- ki Kunststoff Information (2011): Bio-Kunststoff-Verpackungen. Pira-Studie prognostiziert bis 2020 weltweit deutliches Marktwachstum / Nachfrageschub vor allem bei Thermoplasten auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen / Chemiekonzerne drängen massiv in den Markt. www.kiweb.de/Default.aspx?pageid=399&docid=218246 (19.2.2016)
- ki Kunststoff Information (2012): Biokunststoffe: Weltweiter Verbrauch soll sich von 2010 bis 2015 mehr als verdreifachen / Neue Studie von Freedonia. www.kiweb.de/Default.aspx?pageid=398&docid=221071 (19.2.2016)
- Kurian, J.V. (2005): A new polymer platform for the future – Sorona from corn derived 1,3-propanediol. In: *Journal of Polymers and the Environment* 13(2), S. 159–167
- Kwon, Y.C.; Song, J.K.; Kim, D.M. (2014): Cloning-independent expression and screening of enzymes using cell-free protein synthesis systems. In: *Methods in Molecular Biology* 1118, S. 97–108
- Lanza, A.M.; Crook, N.C.; Alper, H.S. (2012): Innovation at the intersection of synthetic and systems biology. In: *Current Opinion in Biotechnology* 23(5), S. 712–717
- Larkum, A.W.D.; Ross, I.L.; Kruse, O.; Hankamer, B. (2012): Selection, breeding and engineering of microalgae for bioenergy and biofuel production. In: *Trends in Biotechnology* 30(4), S. 198–205
- Leprince, A.; van Passel, M.W.; Martins dos Santos, V.A. (2012): Streamlining genomes: toward the generation of simplified and stabilized microbial systems. In: *Current Opinion in Biotechnology* 23(5), S. 651–658
- Ling, H.; Teo, W.; Chen, B.; Leong, S.S.J.; Chang, M.W. (2014): Microbial tolerance engineering toward biochemical production: from lignocellulose to products. In: *Current Opinion in Biotechnology* 29(October), S. 99–106
- Lively, R.P.; Sharma, P.; McCool, B.A.; Beaudry-Losique, J.; Luo, D.; Thomas, V.M.; Realf, M.; Chance, R.R. (2015): Anthropogenic CO₂ as a feedstock for the production of algal-based biofuels. In: *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 9(1), S. 72–81
- Majone, M.; Verdini, R.; Aulenta, F.; Rossetti, S.; Tandoi, V.; Kalogerakis, N.; Agathos, S.; Puig, S.; Zanaroli, G.; Fava, F. (2015): In situ groundwater and sediment bioremediation: barriers and perspectives at European contaminated sites. In: *New Biotechnology* 32(1), S. 133–146
- Mampel, J.; Buescher, J.M.; Meurer, G.; Eck, J. (2013): Coping with complexity in metabolic engineering. In: *Trends in Biotechnology* 31(1), S. 52–60
- Mandell, D.J.; Lajoie, M.J.; Mee, M.T.; Takeuchi, R.; Kuznetsov, G.; Norville, J.E.; Gregg, C.J.; Stoddard, B.L.; Church, G.M. (2015): Biocontainment of genetically modified organisms by synthetic protein design. In: *Nature* 518(7537), S. 55–60
- Marscheider-Weidemann, F.; Hüsing, B. (2004): Abfallvermeidung bei Produktionen für organische Spezialchemikalien durch den Einsatz hochspezifischer Katalysatoren. UBA-Texte 21/04, Berlin
- Mascarelli, A.L. (2009): Gold rush for algae. In: *Nature* 461(7263), S. 460–461
- McAuliffe, J.C. (2012): Industrial enzymes and biocatalysis. In: Kent, J.A. (Hg.): *Handbook of industrial chemistry and biotechnology*. New York u. a. O., S. 1183–1227

- McKinsey (2003) Industrial biotech – new value-creation opportunities. Presentation von R. Bachmann at the BioConference, New York, zitiert in EuropaBio (2003): White Biotechnology: Gateway to a More Sustainable Future. Brüssel, www.euro-pabio.org/industrial-biotech/publications/white-biotechnology-gateway-more-sustainable-future (23.2.2016)
- McKinsey (2009): White Biotechnology. Press briefing, February 2009. www.dsm.com/content/dam/dsm/cworld/en_US/documents/white-biotech-mckinsey-feb-2009.pdf (23.2.2016)
- Menrad, K. (2004): Innovations in the food industry in Germany. In: *Research Policy* 33(6–7), S. 845–878
- Miksch, K.; Cema, G.; Corvini, P.F.X.; Felis, E.; Sochacki, A.; Surmacz-Górska, J.; Wiszniowski, J.; Zabczynski, S. (2015): R&D priorities in the field of sustainable remediation and purification of agro-industrial and municipal wastewater. In: *New Biotechnology* 32(1), S. 128–132
- Milledge, J.J. (2011): Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. In: *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 10(1), S. 31–41
- Mishra, D.; Rhee, Y.H. (2014): Microbial leaching of metals from solid industrial wastes. In: *Journal of Microbiology* 52(1), S. 1–7
- Müssig, J.; Carus, M. (2007): Bio-Polymerwerkstoffe sowie holz- und naturfaserverstärkte Kunststoffe. In: *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.(FNR) (Hg.): Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe Teil II. Gülzow*, S. 7–216
- Nakamura, C.E.; Whited, G.M. (2003): Metabolic engineering for the microbial production of 1,3-propanediol. In: *Current Opinion in Biotechnology* 14(5), S. 454–459
- Neuwahl, F.; Löschel, A.; Mongelli, I.; Delgado, L. (2008): Employment impacts of EU biofuels policy: Combining bottom-up technology information and sectoral market simulations in an input-output framework. In: *Ecological Economics* 68(1–2), S. 447–460
- Nielsen, J.; Keasling, J.D. (2011): Synergies between synthetic biology and metabolic engineering. In: *Nature Biotechnology* 29(8), S. 693–695
- Nierstrasz, V.A.; Cavaco-Paulo, A. (Hg.) (2010): *Advance in textile biotechnology*. Oxford u. a. O.
- Novozymes (A/S) (2015): Roadshow presentation FY2014. 20.1.2015, Kopenhagen, www.novozymes.com/en/investor/events-presentations/ (23.2.2016)
- Novozymes (A/S) (2012): Novozymes. Deutsche Bank Global Consumer Conference. 19.6.2012, Paris, www.novozymes.com/en/investor/events-presentations/Documents/2012_06_19_BDLo_Deutsche_Bank_Consumer_Paris.pdf (23.2.2016)
- Nusser, M.; Hüsing, B.; Wydra, S. (2007): *Potenzialanalyse der industriellen, weißen Biotechnologie*. Karlsruhe
- OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development) (2001): *The application of biotechnology to industrial sustainability*. Paris
- OECD (2005): *A framework for biotechnology statistics*. Paris
- OECD (2009): *The bioeconomy to 2030: designing a policy agenda*. Paris
- OECD (2010a): Discussion paper – session III »Financing and investment models in industrial biotechnology – research methodology and first resultsV. OECD workshop on »Outlook on industrial biotechnology«. DSTI/STP/Bio(2009)23, 13.–15.1.2010, Wien



- OECD (2010b): Discussion paper – session II »Industry structure and business models for industrial biotechnology«. OECD workshop on »Outlook on industrial biotechnology«. DSTI/STP/Bio(2009)22, 13.–15.1.2010, Wien
- OECD (2011): Future prospects for industrial biotechnology. Paris
- OECD (2014): Key biotechnology indicators. www.oecd.org/sti/biotech/keybiotechnologyindicators.htm (23.2.2016)
- OECD, FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2011): OECD-FAO agricultural outlook 2011–2020. Paris
- OECD, FAO (2014): OECD-FAO agricultural outlook 2014–2023. Paris
- Österlund, T.; Nookaew, I.; Nielsen, J. (2012): Fifteen years of large scale metabolic modeling of yeast: Developments and impacts. In: *Biotechnology Advances* 30(5), S. 979–988
- Patel, M.; Crank, M.; Dornburg, V.; Hermann, B.; Roes, L.; Hüsing, B.; Overbeek, L.; Terragni, F.; Recchia, E. (2006): Medium and long-term opportunities and risks of the biotechnological production of bulk chemicals from renewable resources – the potential of white biotechnology. Utrecht
- Paul, R.; Genescà, E. (2013): The use of enzymatic techniques in the finishing of technical textiles. In: Gulrajani, M.L. (Hg.): *Advances in the dyeing and finishing of technical textiles*. Oxford u. a. O., S. 177–198
- Pellerin, W.; Taylor, D.W. (2010): Measuring the biobased economy: a Canadian perspective. In: *Industrial Biotechnology* 4(4), S. 363–366
- Pflaum, H.; Kabasci, S.; Merrettig-Bruns, U.; Rettweiler, M.; Sayder, B.; Schnell, U.; Nusser, M.; Hartig, J.; Hüsing, B.; Selt, J.; Wydra, S. (2008): Potenzialstudie »Anwendungspotenziale der Bioverfahrenstechnik (weiße Biotechnologie) in Nordrhein-Westfalen«. Karlsruhe/Oberhausen
- Piel, J. (2011): Approaches to capturing and designing biologically active small molecules produced by uncultured microbes. In: *Annual Review of Microbiology* 65(1), S. 431–453
- Plastics Europe (Association of Plastics Manufacturers) (2015): *Plastics – the facts 2014/2015. An analysis of European plastics production, demand and waste data*. Brüssel, Wemmel
- PÖYRY (Management Consulting) (2010): Report on the assessment of the bio-based products market potential for innovation. Final report, 30.9.2010, www.biochemproject.eu/download/innova/reports/Assessment%20of%20the%20Bio-Based%20Products%20Market%20Potential%20for%20Innovation.pdf (23.2.2016)
- Radhakrishnan, S. (2014): Application of biotechnology in the processing of textile fabrics. In: Muthu, S.S. (Hg.): *Roadmap to sustainable textiles and clothing*. Singapur, S. 277–325
- Ragwitz, M.; Schade, W.; Breitschopf, B.; Walz, R.; Helfrich, N.; Rathmann, M.; Resch, G.; Panzer, C.; Faber, T.; Haas, R.; Konstantinaviciute, I.; Zagamé, P. et al. (2009): *EmployRES. The impact of renewable energy policy on economic growth and employment in the European Union. Final report. Contract no.: TREN/D1/474/2006*. Brüssel
- Rähse, W. (2012): Enzyme für Waschmittel. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84(12), S. 2152–2163
- Rajagopal, R. (2012): Bio-based chemicals: In need of innovative strategies. In: *Chemical Weekly*, 28.2.2012, S. 195–202
- Rayu, S.; Karpouzas, D.; Singh, B.K. (2012): Emerging technologies in bioremediation: constraints and opportunities. In: *Biodegradation* 23(6), S. 917–926

- Reinhardt, G.; Detzel, A.; Gärtner, S.; Rettenmaier, N.; Krüger, M. (2007): *Nachwachsende Rohstoffe für die chemische Industrie: Optionen und Potenziale für die Zukunft*. Heidelberg/Frankfurt a. M.
- Reisch, M.S. (2011): Super natural cosmetic potions. In: *Chemical and Engineering News* 89(29), S. 21–22
- Renner, I.; Klöpffer, W. (2005): *Untersuchung der Anpassung von Ökobilanzen an spezifische Erfordernisse biotechnischer Prozesse und Produkte*. UBA-Texte 02/05, Berlin
- Rhein, H.-B.; Katzer, S.; Hitzmann, B.; Schnitzmeier, D.; Ulber, R. (2002): *Ermittlung von Substitutionspotentialen von chemischen Verfahrenstechniken durch biotechnische Verfahren zur Risikovorsorge*. UBA-Texte 29/02, Berlin
- Rinaldi, A. (2008): Healing beauty? More biotechnology cosmetic products that claim drug-like properties reach the market. In: *Embo Reports* 9(11), S. 1073–1077
- Ros, J.; Olivier, J.; Notenboom, J.; Croezen, H.J.; Bergsma, G.C. (2012): *Sustainability of biomass in a bio-based economy. A quick-scan analysis of the biomass demand of a bio-based economy in 2030 compared to the sustainable supply*. PBL (Netherlands Environmental Assessment Agency) note, Den Haag
- Rosegrant, M.W.; Msangi, S. (2014): Consensus and contention in the food-versus-fuel debate. In: *Annual Review of Environment and Resources* 39(1), S. 271–294
- Rosello Sastre, R.; Posten, C. (2010): Die vielfältige Anwendung von Mikroalgen als nachwachsende Rohstoffe. In: *Chemie Ingenieur Technik* 82(11), S. 1925–1939
- Rossi, F.; Olguín, E.J.; Diels, L.; De Philippis, R. (2015): Microbial fixation of CO₂ in water bodies and in drylands to combat climate change, soil loss and desertification. In: *New Biotechnology* 32(1), S. 109–120
- Rovner, A.J.; Haimovich, A.D.; Katz, S.R.; Li, Z.; Grome, M.W.; Gassaway, B.M.; Amiram, M.; Patel, J.R.; Gallagher, R.R.; Rinehart, J.; Isaacs, F.J. (2015): Recoded organisms engineered to depend on synthetic amino acids. In: *Nature* 518(7537), S. 89–93
- Rupp-Dahlem (2011): How to speed-up the time to market for new biobased products. 7th International Conference on Renewable Resources and Biorefineries, 8.6.2011, Brügge, www.rrbconference.com/bestanden/rrb7/04.pdf (12.3.2012)
- Rusu, D.; Boyer, S.A.E.; Lacrampe, M.F.; Krawczak, P. (2011): Bioplastics and vegetal fiber reinforced bioplastics for automotive applications. In: Pilla, S. (Hg.): *Handbook of bioplastics and biocomposites engineering applications*. Hoboken, S. 397–449
- RWE (Power AG) (2008): *Das RWE-Algenprojekt in Bergheim-Niederaussem. Produktion von Mikroalgen unter Nutzung von Kraftwerksrauchgasen zur CO₂-Einbindung*. Essen/Köln
- Sanghvi, A.M.; Lo, Y.M. (2010): Present and potential industrial applications of macro- and microalgae. In: *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture* 2(3), S. 187–194
- Sarlo, K.; Kirchner, D.B.; Troyano, E.; Smith, L.A.; Carr, G.J.; Rodriguez, C. (2010): Assessing the risk of type 1 allergy to enzymes present in laundry and cleaning products: evidence from the clinical data. In: *Toxicology* 271(3), S. 87–93
- Savile, C.K.; Lalonde, J.J. (2011): Biotechnology for the acceleration of carbon dioxide capture and sequestration. In: *Current Opinion in Biotechnology* 22(6), S. 818–823



- Schade, W.; Zanker, C.; Kühn, A.; Hettesheimer, T. (2014): Sieben Herausforderungen für die deutsche Automobilindustrie. Strategische Antworten im Spannungsfeld von Globalisierung, Produkt- und Dienstleistungsinnovationen bis 2030. Studien des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag 40, Berlin
- Schauzu, M.; Pötting, A.; Rubin, D.; Lampen, A. (2012): Allergenitätsbewertung von Lebensmitteln aus gentechnisch veränderten Pflanzen. In: Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 55(3), S. 402–407
- Schippers, A. (2009): Biomining zur Metallextraktion aus Erzen und Abfällen. In: Advanced Mining Solutions – AMS Online 1, S. 28–34
- Schmidt, C. (2011): FDA approves first cell therapy for wrinkle-free visage. In: Nature Biotechnology 29(8), S. 674–675
- Schoffelen, S.; Van Hest, J.C.M. (2012): Multi-enzyme systems: bringing enzymes together in vitro. In: Soft Matter 8(6), S. 1736–1746
- Schurr, U. (2011): CO₂-Nutzung durch biologische Prozesse. Konferenz »CO₂-Nutzung – die biologische Perspektive«, 8.6.2011, Berlin
- Schweigert, M.K.; Mackenzie, D.P.; Sarlo, K. (2000): Occupational asthma and allergy associated with the use of enzymes in the detergent industry – a review of the epidemiology, toxicology and methods of prevention. In: Clinical and Experimental Allergy 30(11), S. 1511–1518
- Sharon, I.; Banfield, J.F. (2013): Genomes from metagenomics. In: Science 342(6162), S. 1057–1058
- Shen, L.; Haufe, J.; Patel, M.K. (2009): Product overview and market projection of emerging bio-based plastics. Pro-BIP 2009. Final report, Utrecht
- Silva, C.; Cavaco-Paulo, A.M.; Fu, J.J. (2015): Enzymatic biofinishes for synthetic textiles. In: Paul, R. (Hg.): Functional finishes for textiles. Improving comfort, performance and protection. Woodhead Publishing Series in Textiles 156, Amsterdam u. a. O., S. 153–191
- Soetaert, W.; Vandamme, E.J. (Hg.) (2010): Industrial biotechnology. Sustainable growth and economic success. Weinheim
- Specht, E.; Miyake-Stoner, S.; Mayfield, S. (2010): Micro-algae come of age as a platform for recombinant protein production. In: Biotechnology Letters 32(10), S. 1373–1383
- Spielmann, H.; Kral, V.; Schäfer-Korting, M.; Seidle, T.; McIvor, E.; Schoeters, G.; Witters, H. (2012): Alternative testing strategies. Progress report 2012 and AXLR8-3 workshop report on a »roadmap to next generation safety testing under Horizon 2020«. Berlin
- Spirin, A.S.; Swartz, J.R. (Hg.) (2008): Cell-free protein synthesis. Methods and protocols. Weinheim
- Staffas, L.; Gustavsson, M.; McCormick, K. (2013): Strategies and policies for the bioeconomy and bio-based economy: an analysis of official national approaches. In: Sustainability 5(6), S. 2751–2769
- Staiß, F.; Nitsch, J.; Lehr, U.; Edler, D.; Lutz, C. (2006): Erneuerbare Energien: Arbeitsplatzeffekte. Wirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt unter besonderer Berücksichtigung des Außenhandels. Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Darmstadt.
- Star-COLIBRI (Strategic Targets for 2020 – Collaboration Initiative on Biorefineries) (2011a): European biorefinery joint strategic research roadmap. o. O.
- Star-COLIBRI (2011b): Joint European biorefinery vision for 2030. o. O.

- Statistisches Bundesamt (2008a): Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken (GP 2009). Abteilung 29, Kraftwagen und Kraftwagenteile. Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2008b): Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ 2008). Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2014a): Beschäftigte, Umsatz und Investitionen der Unternehmen und Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Produzierendes Gewerbe, Fachserie 4 Reihe 4.2.1 – 2013, Wiesbaden
- Statistisches Bundesamt (2014b): Wasserwirtschaft: Klärschlamm Entsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung 2012. www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammmverwertungsart.html (23.2.2016)
- Statistisches Bundesamt (2015): Beschäftigte und Umsatz der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe in Deutschland. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> (25.2.2015)
- Stengel, D.B.; Connan, S.; Popper, Z.A. (2011): Algal chemodiversity and bioactivity: sources of natural variability and implications for commercial application. In: *Bio-technology Advances* 29(5), S. 483–501
- Strategiekreis Bioökonomie (2013): Bioökonomie im System aufstellen. Konzept für eine baden-württembergische Forschungsstrategie »Bioökonomie«. Stuttgart
- Strube, J.; Grote, F.; Josch, J.P.; Ditz, R. (2011): Process development and design of downstream processes. In: *Chemie Ingenieur Technik* 83(7), S. 1044–1065
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (1996): Stand und Perspektiven der Katalysatoren- und Enzymtechnik (Autor: Sauter, A.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 46, Bonn
- TAB (2012): Technische Optionen zum Management des CO₂-Kreislaufs (Autoren: Caviezel, C.; Grünwald, R.). TAB-Hintergrundpapier Nr. 18, Berlin
- TAB (2015): Synthetische Biologie – die nächste Stufe der Bio- und Gentechnologie (Autoren: Sauter, A.; Albrecht, S.; van Doren, D.; König, H.; Reiß, T.; Trojok, R.; unter Mitarbeit von Elsbach, S.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 164, Berlin
- TAB (2016): Weiße Biotechnologie – Innovationsanalyse Teil II. Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie: Umwelt- und Nachhaltigkeitspotenziale (Autoren: Schiller, J.; Aicher, C.; Feresin, E.; unter Mitarbeit von Klauer, B.; Hansjürgens, B.; Sauter, A.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 169, Berlin
- Takasuka, T.E.; Walker, J.A.; Bergeman, L.F.; Meulen, K.A.V.; Makino, S.I.; Elsen, N.L.; Fox, B.G. (2014): Cell-free translation of biofuel enzymes. In: *Methods in Molecular Biology* 1118, S. 71–95
- Thanikaivelan, P.; Rao, J.R.; Nair, B.U.; Ramasami, T. (2005): Recent trends in leather making: processes, problems, and pathways. In: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 35(1), S. 37–79
- Thrän, D.; Gawor, M. (2013): Biomass provision and use, sustainability aspects. In: *Renewable Energy Systems*. New York, S. 522–552
- Thrän, D.; Seidensticker, A.; Zeddies, J.; Offermann, R. (2010): Global biomass potentials – resources, drivers and scenario results. In: *Energy for Sustainable Development* 14, S. 200–205
- Timmer, M.P.; Erumban, A. A.; Los, B.; Stehrer, R.; de Vries, G.J. (2014). Slicing up global value chains. In: *The Journal of Economic Perspectives* 28 (2), S. 99–118



- TNS Emnid (TNS Deutschland GmbH) (2014): Einkaufs- und Ernährungsverhalten in Deutschland. TNS-Emnid-Umfrage des BMEL. Bonn/Berlin
- TNS Opinion & Social (2010): Biotechnology. Special Eurobarometer 341, Wave 73.1. Brüssel
- Tracewell, C.A.; Arnold, F.H. (2009): Directed enzyme evolution: climbing fitness peaks one amino acid at a time. In: *Current Opinion in Chemical Biology* 13(1), S. 3–9
- Tufvesson, P.; Lima-Ramos, J.; Nordblad, M.; Woodley, J.M. (2011): Guidelines and cost analysis for catalyst production in biocatalytic processes. In: *Organic Process Research and Development* 15(1), S. 266–274
- Ulber, R.; Sell, D.; Hirth, T. (2011): Renewable raw materials. New feedstocks for the chemical industry. Weinheim
- Umweltbundesamt (2014): Wasserwirtschaft in Deutschland – Teil 1: Grundlagen. Bonn
- USDA (United States Department of Agriculture) (2008): U.S. biobased products. Market potential and projections through 2025. Washington, D. C.
- Vattenfall (Europe AG) (2010): Anlage zur Algenzucht in Betrieb genommen. Pressemitteilung, 22.7.2010, www.vattenfall.de/de/pressemitteilungen-detailseite.htm?newsid=C1F4077CD2CB4C2D8C90CBD6423E9087 (26.2.2016)
- VCI (Verband der chemischen Industrie e.V.)(2015): Branchenporträt der deutschen chemisch-pharmazeutischen Industrie 2014. Frankfurt a. M.
- VCI, DECHEMA (Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.) (2009): Positionspapier. Verwertung und Speicherung von CO₂. Frankfurt a. M.
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure e.V.) (2014): Klassifikation und Gütekriterien von Bioraffinerien. VDI-Richtlinie VDI 6310, Berlin
- VDL (Verband der Deutschen Lederindustrie e.V.) (o.J.): Verband der Deutschen Lederindustrie. www.vdl-web.de/ (1.3.2016)
- VdP (Verband Deutscher Papierfabrikanten e.V.) (2014a): Papier Kompass 2014. Bonn
- VdP (2014b): Papier machen. Informationen zu Rohstoffen und Papierherstellung. Bonn
- Waegeman, H.; Soetaert, W. (2011): Increasing recombinant protein production in *Escherichia coli* through metabolic and genetic engineering. In: *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 38(12), S. 1891–1910
- Wallace, S.; Balskus, E.P. (2014): Opportunities for merging chemical and biological synthesis. In: *Current Opinion in Biotechnology* 30, S. 1–8
- Wehrschütz-Sigl, E.; Hasmann, A.; Guebitz, G.M. (2010): Smart textiles and biomaterials containing enzymes or enzyme substrates. In: Nierstrasz, V.A.; Cavaco-Paulo, A. (Hg.): *Advances in textile biotechnology*. Oxford u. a. O., S. 56–74
- Werpy, T.; Petersen, G. (2004): Top value added chemicals from biomass. Volume I: Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas. Golden
- Weuster-Botz, D.; Hekmat, D.; Puskeiler, R.; Franco-Lara, E. (2007): Enabling technologies: fermentation and downstream processing. In: Ulber, R.; Sell, D. (Hg.): *White biotechnology*. Berlin, Heidelberg, New York, S. 205–247
- Wydra, S. (2010): Produktions- und Beschäftigungseffekte neuer Technologien – Am Beispiel der Biotechnologie. Hohenheimer Volkswirtschaftliche Schriften Nr. 62, Frankfurt a. M.

- Wydra, S.; Hüsing, B.; Kukk, P. (2010): Analyse des Handlungsbedarfs für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aus der Leitmarktinitiative (LMI) der EU-Kommission für biobasierte Produkte außerhalb des Energiesektors. Karlsruhe
- Zanghellini, A. (2014): de novo computational enzyme design. In: *Current Opinion in Biotechnology* 29(October), S. 132–138
- Zawada, J.F.; Yin, G.; Steiner, A.R.; Yang, J.H.; Naresh, A.; Roy, S.M.; Gold, D.S.; Heinsohn, H.G.; Murray, C.J. (2011): Microscale to manufacturing scale-up of cell-free cytokine production – a new approach for shortening protein production development timelines. In: *Biotechnology and Bioengineering* 108(7), S.1570–1578
- Zika, E.; Paptryfon, I.; Wolf, O.; Gomez-Barbero, M.; Stein, A.J.; Bock, A.-K. (2007): Consequences, opportunities and challenges of modern biotechnology for Europe (Bio4EU). Synthesis Report. Report EUR 22728 EN, Luxembourg

Anhang

Abbildungsverzeichnis		1.
Abb. II.1	Konzept einer Bioraffinerie	65
Abb. III.1	Biokunststoffe	84
Abb. IV.1	Unternehmenstypen in biobasierter Chemie/ biobasierten Materialien	135
Abb. IV.2	Anteil an den weltweiten Patenten in der industriellen Biotechnologie von 2000 bis 2011, nach Region der Anmelder	141
Abb. IV.3	Anteil an den weltweiten Patenten in der industriellen Biotechnologie von 2000 bis 2011, nach Land der Anmelder	142
Abb. IV.4	Signifikanz bei Patenten in der industriellen Biotech- nologie von 2001 bis 2011, nach Land der Anmelder	142
Abb. IV.5	Spezialisierung bei Patenten in der industriellen Biotechnologie von 2001 bis 2011, nach Land der Anmelder	143
Abb. IV.6	Anzahl der dedizierten industriellen Biotechnologieun- ternehmen sowie ihrer FuE-Ausgaben in ausgewählten Ländern	144
Abb. IV.7	Welthandelsanteile der führenden Exportländer in der industriellen Biotechnologie von 2002 bis 2012	146
Abb. IV.8	Spezialisierung ausgewählter Länder im Außenhandel in der industriellen Biotechnologie von 2002 bis 2012	147
Abb. IV.9	Verteilung der Produktionskapazitäten nach Standor- ten (total ~ 1.400 kt/Jahr)	149
Abb. IV.10	Anteil von Ländern und Weltregionen an der Anzahl von im Bau befindlichen und operativ tätigen Produk- tionsanlagen (insgesamt 19 Anlagen)	149
Abb. IV.11	Wirtschaftliche Potenziale der industriellen Biotechno- logie aus Sicht von Unternehmen in Deutschland (Stand 2006)	151
		181



Abb. IV.12	Auswirkungen einer Veränderungen des Ölpreises auf die Preise von Agrarrohstoffen und Produkten	153
Abb. IV.13	Index für die Entwicklung und Prognose der Weltmarktpreise für wichtige Rohstoffe (2005 = 100)	155

Tabellenverzeichnis **2.**

Tab. II.1	Einflussfaktoren auf Biomassepotenziale	33
Tab. II.2	Nachhaltigkeitsaspekte der Nutzung von Biomasse für industrielle Zwecke	35
Tab. II.3	Anbau von Nutzpflanzen für energetische und stoffliche Nutzung in Deutschland 2014	36
Tab. II.4	Einsatzmengen von Agrarrohstoffen für die industrielle stoffliche Nutzung in Deutschland 2011	37
Tab. II.5	Mikroalgenphotobioreaktoren zur Abtrennung von CO ₂ aus Kraftwerksabluft	45
Tab. II.6	Natürlich vorkommende Biodiversität an Mikroorganismen und Enzymen und ihre Nutzung in industriellen Prozessen	53
Tab. II.7	Allgemeiner Entwicklungsstand von verschiedenen Bioraffineriekonzepten	66
Tab. II.8	Entwicklungsstand von verschiedenen Bioraffineriekonzepten, aufgeschlüsselt nach Prozessstufen	68
Tab. III.1	Weltmarktanteile der Anwendungsbereiche industrieller Enzyme 2014	74
Tab. III.2	Potenzial zukünftiger biobasierter Bulk- und Plattformchemikalien	79
Tab. III.3	Produktionsanlagen für biotechnisch aus Biomasse hergestellte Bulkchemikalien (Stand 2/2015)	81
Tab. III.4	Übersicht über das Gesamtgebiet der Biokunststoffe	85
Tab. III.5	Globale Produktionskapazitäten für Biokunststoffe 2013 und 2018 (Prognose)	87

2. Tabellenverzeichnis



Tab. III.6	Globale Produktionskapazitäten für Biokunststoffe 2013 und 2018 (Prognose), aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen der Biokunststoffe	89
Tab. III.7	Produktionskapazitäten für Biokunststoffe in Deutschland (2011)	90
Tab. III.8	Marktgrößen für Biokunststoffe in Deutschland (2011)	90
Tab. III.9	Entwicklung des Anteils enzymhaltiger Haushaltswasch- und -reinigungsmittel an allen Haushaltswasch- und -reinigungsmitteln in verschiedenen Weltregionen 2000 und 2010	97
Tab. III.10	Einsatzbereiche und Wirkungen von Enzymen in der Lebensmittel- und Getränkeproduktion	101
Tab. III.11	Entwicklungsstand biotechnischer Verfahren in der Textilindustrie	107
Tab. III.12	Entwicklungsstand biotechnischer Verfahren in der Zellstoff- und Papierindustrie	112
Tab. III.13	Mengen und Märkte biobasierter Produktgruppen in der deutschen Automobilindustrie 2011	124
Tab. IV.1	Marktabschätzungen für die industrielle Biotechnologie (Umsatz absolut in Mrd. Euro oder Mrd. US-Dollar und in % des jeweiligen Gesamtmarkts)	129
Tab. IV.2	Kennzahlen zur Biotechnologiebranche in Deutschland	137
Tab. IV.3	Erforderliche Produktivität für verschiedene Arten von Prozessen und Produkten, basierend auf typischen Werten für Biokatalysator- und Produktkosten	157
Tab. A.1	Ausgewählte Bioraffinerien in Deutschland und Europa	184
Tab. A.2	Bioraffineriekonzepte – Vor- und Nachteile aus Sicht Deutschlands	186
Tab. A.3	Produktion, Außenhandel und Wachstum von Fermentationsprodukten global, in der EU und in Deutschland, 2009	189

Ergänzende Tabellen

3.

Tab. A.1 Ausgewählte Bioraffinerien in Deutschland und Europa

Name/ Betreiber	Standort	Typ Rohstoff	Produkte (Produktion/ Jahr)	Entwicklungs- stand
Borregaard	Sarpsborg (Norwegen)	Lignocellulose/ Fichtenholz	Spezialcellu- lose, Lignin- produkte, Vanillin, Ethanol	kommerzieller Betrieb; weitere Pro- duktionsanla- gen in Brasi- lien, Deutsch- land, Spanien, Großbritan- nien, USA, weltweit 1.200 Arbeitsplätze
Südchemie	Straubing (Deutschland, Bayern)	Lignocellulose/ Stroh	Ethanol (2 kt/Jahr)	Demonstra- tionsanlage im Bau
chemisch- biotechnolo- gisches Pro- zesszentrum (CBP)	Leuna (Deutschland, Sachsen- Anhalt)	Lignocellulose/ Laubholz (Buche/Pappel)	fermentierbare Zucker	Etablierung einer Pilotan- lage, öffentlich geförderter Forschungs- verbund, Kapa- zität ca. 1 t Holz/Woche
Südzucker/ CropEnergies	Zeitz (Deutschland, Sachsen- Anhalt)	Zucker-/Stärke- bioraffinerie Getreide, Zu- ckerrüben	Ethanol (280 kt/Jahr)	Pilotanlage
Biowert	Brensbach (Deutschland, Hessen)	grüne Bio- raffinerie Grassilage	?	Pilotanlage
biopos	Selbeland (Deutschland, Brandenburg)	grüne Bior- affinerie Gras	?	Pilotanlage
KIT	Karlsruhe (Deutschland, Baden- Württemberg)	Synthesegas- bioraffinerie Stroh	Biokraftstoffe	Pilotanlage, Module noch im Aufbau

3. Ergänzende Tabellen



Name/ Betreiber	Standort	Typ Rohstoff	Produkte (Produktion/ Jahr)	Entwicklungs- stand
Ensus	Wilton on Teesside (Großbritan- nien)	Trockenmahlung Weizen	Bioethanol (> 400 Mio. l) Tierfutter (350.000 t) Abgetrenntes Kohlendioxid (300.000 t)	seit 2009 in Betrieb, > 1 Mio. t Weizen/Jahr
Roquette Frères	Lestrem (Frankreich)	Stärke	Stärke, Stärke- derivate und -modifikate, Chemikalien, Fermentations- produkte	
	Güssing (Österreich)	Synthesegas Holz	Strom, Wärme, Nutzung von Synthesegas zur Herstellung von Alkoholen, Wasserstoff, Kohlenwasser- stoffe, Methan	
Demonstra- tionsanlage grüne Bio- raffinerie	Utzenaich (Österreich)	grüne Bior affinerie Grassaft	Aminosäuren, Milchsäure	Inbetrieb- nahme 2009, Pilotbetrieb und Prozess- optimierung

Quelle: Bundesregierung 2012; IEA Bioenergy Task 42 2013



Tab. A.2 Bioraffineriekonzepte – Vor- und Nachteile aus Sicht Deutschlands

Plattform/ Raffinerie- typ	Rohstoffe	Produkte	Vorteile	Nachteile
Zucker- bioraffi- nerie	Zucker- rüben, Zuckerrohr	Haushaltszucker, Fermentations- rohstoff, Kristall- zucker als Aus- gangsstoff für chemische Syn- thesen	bereits bestehen- de Strukturen, Technologie weit entwickelt, Roh- stoffe in Deutsch- land und Europa verfügbar	bislang unzureich- ende Produktdiversi- fizierung, Verknüp- fung der Zucker-/ Stärkeindustrie mit der chemischen In- dustrie unzureichend, Konkurrenz mit Nah- rungs-/Futtermittel bereich, deutsche Zucker-/Stärkeindus- trie in global rele- vanten Standorten (Brasilien, USA, Südostasien) schwach positioniert
Stärkebio- raffinerie	Kartoffeln, Weizen, Mais	native Stärke und Stärkederivate, Stärkeverzucker- ungsprodukte, Zucker als Fer- mentationsroh- stoff		
Pflanzen- ölbioraf- finerie	Ölsaaten und -früchte	natives Pflan- zenöl, Verwen- dung als Kraft- stoff, Rohstoff für Oleochemie, Fettsäuren als Ausgangsstoff für chemische und pharmazeutische Erzeugnisse, Gly- cerin als Fermentations- rohstoff	bereits bestehen- de Strukturen der Pflanzenöl- produktion, deutsche Pflan- zenölindustrie ist global aufge- stellt, starke FuE zur Konversion von Pflanzenölen in Deutschland, Erfahrungen zur chemischen und biotechnologi- schen Konver- sion vorhanden	Rohstoffkette für kurzkettige Fettsäu- ren in Deutschland und Europa nicht vorhanden, Risiko der Verlagerung der Herstellung in roh- stoffnahe Länder, integrierte Produk- tion von biobasier- ten Produkten ne- ben Bioenergie un- terentwickelt, wirt- schaftliche Verwer- tung von Glycerin unterentwickelt, zunehmender Be- darf an Pflanzen- ölen für den Nah- rungsmittelbereich, Erschließung alter- nativer Rohstoff- quellen (Algenlipi- de) noch nicht marktreif

3. Ergänzende Tabellen



Plattform/ Raffinerie- typ	Rohstoffe	Produkte	Vorteile	Nachteile
marine Bioraffi- nerie	Mikroalgen	Algenöle als Rohstoff für chemische Syn- thesen	höhere Photosyn- theseleistung als Landpflanzen, keine Flächen- konkurrenz um Anbauflächen, starke FuE in Deutschland, verspricht Wert- schöpfung durch neue Produkte mit neuen Funk- tionalitäten und Nutzungsoptio- nen	klimatische Bedin- gungen für Mikro- algenzucht unge- eignet, Technologie noch nicht markt- reif, Produktent- wicklung und -ver- edlung unterentwi- ckelt, derzeit noch hoher Arbeitsauf- wand und kostenin- tensiv
Lignocel- lulosebio- raffinerie (fermen- tierbare Kohlenhy- drate)	Agrarrest- stoff (Ge- treide- und Maisstroh), Holz	Cellulose, Hemi- cellulosen und Lignin als Aus- gangsstoff für die Sekundärraf- fination	Rohstoffe sowie nicht genutztes Potenzial in Deutschland und Europa vorhan- den, keine un- mittelbare Kon- kurrenz mit der Nahrungs- und Futtermittelpro- duktion, Zell- stoffindustrie in Deutschland gut entwickelt, LCF verspricht Ver- besserung der Wettbewerbsfä- higkeit beste- hender Standor- te, starke FuE in Deutschland, gleichzeitig star- ke Konkurrenz im Ausland (USA, Skandinavien)	Wertschöpfung aus Ligninverwertung noch unterentwi- ckelt, Verwertung von Pentosen und Hemicellulosen technisch nicht ausgereift, De- monstration im In- dustriemaßstab steht noch aus, Verknüpfung mit chemischer Indust- rie unterentwickelt, konkurrierende Nutzungsoptionen für Lignocellulose- haltige Biomasse

Plattform/ Raffinerie- typ	Rohstoffe	Produkte	Vorteile	Nachteile
grüne Bioraffi- nerie	feuchte Biomasse (grün oder siliert), z. B. Gräser, Klee, Luzerne	Presssaft und cellulosische Fa- ser, Gewinnung von Wertstoffen aus dem Press- saft (Milchsäure, Essigsäure, Pro- teine, Aminosäu- ren), Kopplung mit Biogasanla- ge, Grasfasern als Futtermittel oder Verwertung der Cellulose als Rohmaterial	Deutschland weltweit führen- de Forschung im Bereich Biogas, Erhalt von Kultur- landschaften, Weiterentwick- lung bestehender Standorte von Biogasanlagen durch Diversifi- zierung möglich	Konzept von der Verfügbarkeit von Grünland abhängig saisonaler Betrieb Wirtschaftlichkeit nur in Kombination mit Biogasanlage gegeben bisher unzu- reichendes Quali- tätsniveau der Pro- dukte, unzu- reichende Wert- schöpfung
Synthese- gasbio- raffinerie	agrарische Reststoffe (Stroh) und Holz	Synthesegas, fle- xibler Rohstoff für die Herstel- lung von Kraft- stoffen und chemischen Synthesen	starke FuE in Deutschland, Er- fahrungen aus Kohlevergasung, außerdem Erfah- rungen zur chemi- schen Konversion von Synthesegas, gleichzeitig starke Konkurrenz im Ausland (USA, Österreich), Roh- stoffe in Deutsch- land vorhanden, keine unmittelba- re Rohstoffkon- kurrenz zur Nah- rungs- und Fut- termittelproduk- tion	hoher Rohstoffbedarf gleiche Rohstoffbasis wie Lignocellulose- Bioraffinerie, hoher Investitionsbedarf für Anlagen, Integration noch nicht ausge- reicht, Demonstrati- on im Industriemaß- stab steht noch aus, potenzielle Produkt- vielfalt noch nicht ausgeschöpft, bio- technologische Konversion von Synthesegas unter- entwickelt

Quelle: basierend auf Bundesregierung 2012

3. Ergänzende Tabellen



Tab. A.3 Produktion, Außenhandel und Wachstum von Fermentationsprodukten global, in der EU und in Deutschland, 2009

Kategorie	Produkt	Produktion (1.000 t)			Marktwachstum (%/Jahr)			Saldo Import (-) Export (+)	
		global 2009	EU 2009	D 2009	global 1993-1999	global 2000-2009	global 2010-2015	EU 2009	D 2009
Hefen	alle Typen	1.902	742	195	2,0	3,3	3-5	± 0	-18
Bio-ethanol	Bio-ethanol	70.000	5.600	500	0,6	10,8	8-12	-1.000	-800
Aminosäuren	Lysin	1.300	91	0	9,3	12,2	10-12	-259	-58
	Threonin	200	76	0	36,9	21,8	12-15	+2	-9
	Tryp-topphan	3	3	0	12,2	12,7	12-15	+1,3	-0,2
	MNG	2.000	60	0	3,2	4,8	3-5	+6	-6
	Cystein	1	1	0	-	22,3	20-25	+0,7	-0,2
	organische Säuren	Zitronensäure	1.500	315	0	6,2	4,8	3-5	-225
Itakonsäure		52	0	0	5,1	10,0	8-12	-15	-2
Glukonsäure		120	70	0	1,5	4,1	3-5	+7	-6
Milchsäure		550	50	5	4,3	12,3	12-15	-24	-8
Isoaskorbinsäure		20	9	0	11,4	1,6	3-5	-5	-2
Vitamine		Riboflavin	7	3	3	2,2	7,7	3-5	+1
	B12	0,03	0,02	0	2,1	7,1	3-5	+0,011	-0,015
	C	130	26	0(1559)	8,9	4,7	3-5	-9	-3,4
Polysaccharide	Xanthan	95	27	0	10,8	9,0	8-10	+4,4	-6 (+15)
	Gellan, Curdlan, Welan	5	0	0	12,9	3,2	3-5	-0,7	-0,09
Carotinoide	β-Carotin, Astaxanthin	0,03	0,1	0	25,8	20,7	8-10	-0,01	-0,004



Kategorie	Produkt	Produktion (1.000 t)			Marktwachstum (%/Jahr)			Saldo Import (-) Export (+)	
		global 2009	EU 2009	D 2009	global 1993-1999	global 2000-2009	global 2010-2015	EU 2009	D 2009
Anti-biotika	Penizillin, Cephalosporin, Streptomyces	140	18	3	5,4	9,8	8-10	-7	-1
Enzyme	alle Typen	6	2,5	0,5	7,4	6,2	6-8	-0,5	-0,1
Hormone	Insulin	0,00011	0,000098	0,000025	2,2	5,9	4-6	±0	±0
Zuckeralkohol	Erythritol	29	4	2	36,9	4,9	3-5	-1,2	+2,0
bio-basierte Polymere	Propandiol, PHA	55	0	0	-	-	?	±0	±0

Quelle: ECO SYS GmbH 2011

Glossar

4.

aerob – Sauerstoff zum Leben brauchend (von Organismen). Lebewesen, die für ihren Stoffwechsel Sauerstoff verwenden, werden als aerob bzw. Aerobier bezeichnet. Unter aeroben Bedingungen (z.B. in einem biotechnologischen Produktionsprozess) versteht man, dass eine ausreichend hohe Sauerstoffkonzentration für die entsprechenden Stoffwechselfvorgänge vorhanden ist.

Akkumulation – Anreicherung, Anhäufung.

Algen – im Wasser lebende Lebewesen, die Photosynthese betreiben. Es existieren mehrzellige Algen (Makroalgen) sowie ein- bis einzellige, mikroskopische Algen (Mikroalgen).

Aminosäuren – eine Klasse organischer Moleküle, deren Grundgerüst eine Carboxylgruppe (-COOH) und eine Aminogruppe (-NH₂) sowie unterschiedliche Seitenketten umfasst. Aminosäuren sind die Bausteine von Proteinen. Natürlich vorkommende Proteine sind in der Regel aus 20 verschiedenen Aminosäuren aufgebaut. Die Eigenschaften der Proteine werden wesentlich durch ihre Aminosäurezusammensetzung bestimmt. Aminosäuren haben eine fundamentale Bedeutung in der menschlichen Ernährung. Die wichtigsten kommerziellen Anwendungen von Aminosäuren finden sich im Nahrungs- und Futtermittelbereich und in der Herstellung von Arzneimitteln.

- anaerob – ohne Sauerstoff lebend. Anaerobe Organismen (Anaerobier) verwenden für ihren Stoffwechsel keinen Sauerstoff. Neben Organismen, für die Sauerstoff toxisch ist, gibt es auch fakultativ anaerobe Organismen, die sowohl unter aeroben als auch anaeroben Bedingungen leben können, beispielsweise die Back- und Brauhefe *Saccharomyces cerevisiae*.
- Antibiotikum – eine Substanz, die von Mikroorganismen produziert wird und das Wachstum anderer Mikroorganismen hemmt. Antibiotika werden heute großtechnisch hergestellt und finden breite Anwendung bei der Behandlung von bakteriellen Infektionskrankheiten. Bei der Mehrzahl der heute verwendeten Antibiotika handelt es sich allerdings um chemische Derivate natürlicher Antibiotika.
- Archaea – einzellige Organismen, bilden neben Bakterien und Eukaryoten eine eigene systematische Einheit und die dritte Domäne der zellulären Lebewesen. Früher auch Archaeobakterien oder Urbakterien genannt.
- autotroph – Bezeichnung für die Art der Kohlenstoffquelle, die ein Organismus nutzt. Autotrophe Organismen können ihre Zellmasse aus CO₂ aufbauen und sind nicht auf die externe Zufuhr von organischen Kohlenstoffverbindungen angewiesen. Pflanzen, Algen und einige Bakterien sind autotroph, siehe auch heterotroph.
- Bakterien – einzellige Organismen, die keinen Zellkern besitzen (sog. Prokaryoten).
- biobasiert – ausgehend von Biomasse hergestellt. Die Bezeichnung biobasiert erlaubt keine Rückschlüsse auf das Herstellungsverfahren, z. B. ob der Prozess biotechnologische Verfahrensschritte umfasst.
- Biodiesel – Diesel, der aus nachwachsenden Rohstoffen (z. B. Rapsöl) produziert wird.
- Biokatalysator – ein biologisches Molekül, das eine chemische Reaktion beschleunigt. Als Biokatalysatoren werden Enzyme bezeichnet als auch ganze Mikroorganismen, die als Biokatalysatoren für komplexe Stoffumwandlungen aufgefasst werden können.
- Biokatalyse – industrielle Anwendung von Enzymen und Mikroorganismen, um chemische Reaktionen zu beschleunigen.
- Biokraftstoff – Kraftstoff, der aus Biomasse hergestellt wurde.
- Biomasse – unter Biomasse versteht man Stoffe biologischen Ursprungs, d. h. die von Lebewesen stammen. Hierzu zählen üblicherweise lebende und tote Mikroorganismen und Pilze, Pflanzen (darunter Bäume, landwirtschaftliche Nutzpflanzen, Algen) und Tiere. Außerdem werden Reststoffe biologischen Ursprungs zur Biomasse gezählt: dies sind beispielsweise Reststoffe aus der Forstwirtschaft und Pflanzenproduktion (z. B. Rinden, Stroh, Kraut und Stängel), aus der Tierproduktion (z. B. Gülle, Mist), Reststoffe aus der Lebensmittel- und Getränkeherstellung (z. B. Melasse, Trester, Schlempe), Belebtschlamm aus der biologischen Abwasserreinigung und die organische Fraktion des Hausmülls. Biomasse ist ein komplexes Substanzgemisch. Sie besteht durchschnittlich zu 75 % aus Kohlenhydraten (vor allem Stärke, Cellulose, Chitin und Saccharose), zu 20 % aus Lignin und zu ca. 5 % aus Fetten und Ölen, Proteinen und verschiedenen anderen Inhaltsstoffen. Die Gehalte variieren sowohl in qualitativer als auch quantitativer Hinsicht je nach Organismus, der die jeweilige Biomasse liefert, in weiten Grenzen.
- Bio-PA – biobasiertes Polyamid.
- Bio-PC – biobasiertes Polycarbonat.
- Bio-PE – biobasiertes Polyethylen.
- Bio-PET 30 – Polyethylenterephthalat, zu 30 % biobasiert.
- Biopolymere – Kunststoffe (Polymere), die ganz oder teilweise aus Biomasse hergestellt werden.



- Bio-PP – biobasiertes Polypropylen.
- Bio-PUR – biobasiertes Polyurethan.
- Bio-PVC – biobasiertes Polyvinylchlorid.
- Bioraffinerie – technische Verarbeitungsanlage, in der Biomasse möglichst vollständig in verschiedene Produkte umgewandelt wird, z.B. in Chemikalien, Kraft- und Kunststoffe.
- Bioreaktion – eine biochemische Stoffumwandlung, die durch Organismen oder isolierte Enzyme katalysiert werden kann.
- Bioreaktor – auch als Fermenter bezeichnet. Technische Umgebung, in der eine Bioreaktion stattfindet. In der industriellen Biotechnologie kommen Bioreaktoren vom Mikrolitermaßstab bis hin zu einem Volumen von 100 m oder größer zum Einsatz. Je nach Produktionssystem unterscheiden sich Bioreaktoren grundlegend voneinander. Für die Fermentation von Mikroorganismen kommen typischerweise Rührkesselreaktoren zum Einsatz, bei denen viele Prozessparameter (pH, Temperatur, Begasung etc.) reguliert werden können.
- Biotechnologie – die Anwendung von Wissenschaft und Technologie auf lebende Organismen sowie auf deren Bestandteile, Produkte und Modelle mit dem Ziel, lebende und nicht lebende Materialien für die Produktion von Wissen, Waren und Dienstleistungen zu verändern.
- Bio-TPE – biobasiertes thermoplastisches Elastomer.
- Bioverfahrenstechnik – auch Bioprozesstechnik. Interdisziplinäres Themengebiet, das sich mit den verfahrenstechnischen Abläufen eines biotechnologischen Produktionsprozesses sowie seiner Optimierung befasst.
- Bulkchemikalien – Chemikalien, deren Jahresproduktion 20.000 t im Jahr übersteigt.
- C – Kohlenstoff.
- Cellulose – pflanzliches Polysaccharid, das sich aus Glucose-Bausteinen zusammensetzt. Cellulose ist der Hauptbestandteil von pflanzlichen Zellwänden. Cellulose kommt als nachwachsender Rohstoff eine wichtige Bedeutung zu, z.B. für die Herstellung von Papier oder Biokunststoffen.
- Chiralität – eine chemische Substanz wird als chiral bezeichnet, wenn sie in Strukturvarianten existiert, die sich wie Bild- und Spiegelbild zueinander verhalten und nicht durch Drehung in Deckung gebracht werden können; die Bild- und Spiegelbildmoleküle werden als Enantiomere bezeichnet. Während bei chemischen Synthesen in der Regel ein Gemisch aus beiden chiralen Formen (Racemat) entsteht, zeichnen sich biotechnologische Verfahren häufig dadurch aus, dass eines der beiden möglichen Enantiomere gebildet wird (sogenannte Stereospezifität der Reaktion). Häufig ist auch nur eins der Enantiomere biologisch aktiv, d.h. entfaltet in Organismen bestimmte Wirkungen.
- CO₂ – Kohlendioxid.
- C-Quelle – auch Kohlenstoffquelle. Bezeichnet die Kohlenstoffverbindungen, die ein Organismus aufnehmen muss, um daraus Zellmasse aufzubauen.
- DNA/DNS – deoxyribonucleic acid/Desoxyribonukleinsäure. Molekül, aus dem die Erbsubstanz der meisten Lebewesen besteht. Die DNA ist ein Polymer aus vier verschiedenen Bausteinen (Nukleotiden). Die genetische Information ist in der Abfolge dieser vier Bausteine kodiert. Mit Hilfe der Gentechnik können gezielte Änderungen am DNA-Molekül und damit an der codierten genetischen Information vorgenommen werden.



- Downstream Processing – umfasst im (biotechnologischen) Produktionsprozess die Verfahrensschritte nach der Produktsynthese. Dazu gehören beispielsweise die Abtrennung des Produkts aus dem Medium, Aufreinigung und Aufkonzentrierung.
- Drop-in – eine Chemikalie, die bislang aus fossilen Rohstoffen hergestellt wird, wird durch eine identische Chemikalie ersetzt, die biotechnisch bzw. aus Biomasse hergestellt wird. Beispiel: Ethylen wird aus Bioethanol statt durch Dampfreformierung von Naphtha hergestellt.
- Enantiomere – auch Stereoisomere genannt. Enantiomere haben die gleiche chemische Summenformel, unterscheiden sich aber in ihrer räumlichen Struktur. Sie sind wie Bild und Spiegelbild (siehe Chiralität).
- Enzym – ein biologisches Molekül, in der Regel ein Protein, das chemische Reaktionen initiiert bzw. deren Geschwindigkeit erhöht, d.h. katalysiert (vgl. Biokatalysator).
- Eukaryoten – Organismen lassen sich generell in Eukaryoten, d.h. Organismen, die einen Zellkern haben und deren Zellraum in Kompartimente unterteilt ist, und Prokaryoten, die keinen Zellkern besitzen, unterteilen. Tiere, Pflanzen und Pilze zählen zu den Eukaryoten, Bakterien und Archaea dagegen zu den Prokaryoten. Zellaufbau und Stoffwechsel von Pro- und Eukaryoten weisen wesentliche Unterschiede auf.
- Expression – biologischer Vorgang, bei dem die Bauanleitung für ein Protein (Gen) in der Erbsubstanz abgelesen und das entsprechende Protein synthetisiert wird.
- Feinchemikalien – hochwertige Chemikalien wie etwa Arzneimittel, Kosmetika und Lebensmittelzusatzstoffe. Meist nur durch aufwendige, anspruchsvolle Synthese herstellbar. Werden in der Regel nach ihrem Einsatzbereich klassifiziert (siehe auch Spezialchemikalien).
- Fermentation – technisches Verfahren, in dem die Stoffwechselleistungen von Mikroorganismen, wie etwa Bakterien, Hefen und Pilze, genutzt werden, um Substrate, wie z.B. Biomasse, Zucker oder Öle in die gewünschten Moleküle oder Produkte umzuwandeln.
- Fructose – Fruchtzucker, ein Monosaccharid, kommt vor allem in Früchten vor. Glucose und Fructose haben die gleiche Summenformel ($C_6H_{12}O_6$) und lassen sich enzymatisch ineinander überführen. Fructose besitzt eine höhere Süßkraft als Glucose oder Saccharose. Glucose-Fructose-Sirup, der aus der Umzuckerung von Glucose gewonnen wird, wird in der Nahrungsmittel- und Getränkeherstellung in großem Umfang als Süßungsmittel eingesetzt.
- FuE – Forschung und Entwicklung.
- Gärung – mikrobielle Umwandlung organischer Stoffe unter anaeroben Bedingungen (d.h. ohne Einbeziehung von Sauerstoff).
- Gen – ein funktioneller Abschnitt auf der DNA, in dem die Information zur Herstellung eines Proteins codiert ist. Wird ein Gen abgelesen (exprimiert), wird eine Kopie des Gens erstellt (die mRNA oder das Transkript), von der aus schließlich das codierte Protein synthetisiert wird.
- genetischer Code – Die Übersetzung der DNA-Sequenz in eine Proteinsequenz basiert auf dem genetischen Code. Dabei codiert ein Abschnitt aus drei Nukleotiden (Codon) eine Aminosäure. Der genetische Code ist für alle bekannten Organismen gleich, wodurch die funktionelle Übertragung von DNA-Fragmenten zwischen Organismen möglich ist.
- Genom – Gesamtheit der DNA eines Organismus.



- Genomik – Forschungsfeld, das die Genome von Organismen untersucht. In erster Linie bezieht sich die Genomik auf die Sequenzaufklärung des gesamten Genoms, darüber hinaus aber auch auf die Aufklärung von Genfunktionen, Regulationsmechanismen und die Wechselwirkungen der Gene untereinander.
- Gentechnik – Teilgebiet der Biotechnologie. Verfahren zu gezielten Veränderungen des Erbguts.
- Glucose – Traubenzucker, ein Monosaccharid. Glucose kommt in der Biotechnologie eine besondere Bedeutung zu, da es von allen industriell relevanten Mikroorganismen schnell und gut verstoffwechselt werden kann und eine wichtige Kohlenstoff- und Energiequelle darstellt.
- Glucose-Fructose-Sirup – ein Zuckerkonzentrat, das durch enzymatischen Abbau von Maisstärke zu Glucose und der Umzuckerung eines Teils der Glucose zu Fructose erzeugt wird. Glucose-Fructose-Sirup wird in großem Maßstab als Süßungsmittel für Lebensmittel und Getränke verwendet.
- GRAS – »generally recognized as safe«. Ein von der Food and Drug Administration (FDA) erteilter Status. Substanzen oder Mikroorganismen mit GRAS-Status gelten als sicher und dürfen ohne weitere Prüfung in Lebensmitteln verwendet werden.
- Grundchemikalien – Chemikalien, die das Ausgangsmaterial für viele andere Industrieprodukte darstellen. Grundchemikalien sind meist chemisch sehr einfach aufgebaute Substanzen. Grundchemikalien werden in großen Mengen hergestellt und weiterverarbeitet und sind deshalb auch zugleich Bulkchemikalien (Produktionsmenge über 20.000 t/Jahr).
- GVO – gentechnisch veränderter Organismus, dessen Erbinformation durch gentechnische Eingriffe verändert worden ist. Organismen, die durch Kreuzung, Mutation, Rekombination und andere Methoden der klassischen Züchtung erzeugt worden sind, werden nicht zu den GVO gezählt.
- Hefe – einzellige Pilze. Brau- und Backhefen spielen traditionell eine wichtige Rolle in der Biotechnologie.
- Hemicellulose(n) – sind eine uneinheitliche Gruppe pflanzlicher Polysaccharide ohne definierte Zusammensetzung, die durch ihre Interaktion mit Cellulose und Lignin für die Stabilität der pflanzlichen Zellwand sorgen. In der Regel machen Hemicellulosen 10 bis 30 % der pflanzlichen Trockenmasse aus. Hauptbestandteil von Hemicellulosen sind die aus fünf Kohlenstoffatomen aufgebauten Pentosen D-Xylose und L-Arabinose.
- heterotroph – Bezeichnung für die Art der Kohlenstoffquelle, die ein Organismus nutzt. Heterotrophe Organismen benötigen organische Kohlenstoffverbindungen zum Leben, da sie nicht in der Lage sind, Zellmasse nur aus anorganischem Kohlenstoff (CO₂) aufzubauen. Alle Tiere und Pilze sowie die meisten Mikroorganismen sind heterotroph, siehe auch autotroph.
- Hexose – Zuckermolekül, dessen Kohlenstoffgerüst aus sechs Kohlenstoffatomen besteht. Wichtige Hexosen sind Glucose und Fructose.
- Hydrolasen – Enzyme, die hydrolytische Reaktionen (= Hydrolysen) katalysieren. Dabei werden chemische Bindungen durch die Reaktion mit Wasser gespalten. Bei der Mehrzahl der technischen Enzyme handelt es sich um Hydrolasen, so z. B. fettspaltende Enzyme (Lipasen), eiweißspaltende Enzyme (Peptidasen) oder stärkespaltende Enzyme (Amylasen).
- Hydrolyse – Spaltung einer chemischen Bindung durch die Reaktion mit Wasser.
- IBT – industrielle Biotechnologie.

4. Glossar



- in silico – bezeichnet »im Computer« ablaufende Simulationen, Modellierungen und Analysen.
- in vitro – »im Glas«, beschreibt (biologische) Prozesse, die nicht in einem lebenden Organismus (d.h. »in vivo«) sondern in einer künstlichen Umgebung (z.B. Reaktionsgefäß) ablaufen.
- in vivo – »im Lebendigen«, bezeichnet (biologische) Prozesse, die im lebendigen Organismus ablaufen.
- industrielle Biotechnologie – auch als weiße Biotechnologie bezeichnet, nutzt biotechnologische Instrumente zur Verarbeitung und Herstellung von Chemikalien, Materialien und Energie. Die industrielle Biotechnologie verwendet insbesondere Mikroorganismen oder Enzyme zur Herstellung vielfältigster Produkte von Zitronensäure (eine Grundchemikalie) über Säfte, Bier, Polymilchsäure (ein Biokunststoff) und Vitamine bis hin zu Reinigungsmitteln, Papier, Textilien und Biokraftstoffen wie Ethanol. Die biotechnologische Verarbeitung kann an beliebigen Stellen des Produktionsprozesses stattfinden, unabhängig von der Art des genutzten Rohstoffes (z.B. erneuerbare Rohstoffe, fossile Brennstoffe oder anorganische Stoffe).
- ionische Flüssigkeiten – Salze, die bei Temperaturen unter 100 °C flüssig sind, ohne in Lösungsmitteln gelöst zu sein. Sie sind ein gutes Lösungsmittel für viele verschiedene Substanzen.
- KMU – kleine und mittlere Unternehmen.
- Kohlenhydrate – die Stoffklasse der Kohlenhydrate umfasst organische Verbindungen, die sich aus den Elementen Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H) zusammensetzen. Zu den Kohlenhydraten gehören u. a. Zucker, Stärke und Cellulose. Kohlenhydrate machen ca. 75 % der weltweit produzierten Biomasse aus.
- Kompartiment – abgegrenzter Raum. Durch die Kompartimentierung (Aufteilung in Reaktionsräume) können in Zellen auf engstem Raum unterschiedliche Mikroumgebungen geschaffen werden und verschiedene Stoffwechselreaktionen parallel ablaufen. Eukaryoten weisen eine stärkere Kompartimentierung ihrer Zellen auf Prokaryoten.
- Kulturmedium – auch Nährmedium oder Substrat, dient zur Anzucht von Mikroorganismen, Zellen, Geweben oder auch kleinen Pflanzen. Es wird unterschieden zwischen definierten Medien, deren Zusammensetzung der chemischen Inhaltsstoffe genau bekannt ist, und komplexen Medien, deren genaue Zusammensetzung nicht bestimmt ist, da sie auf einem komplexen Ausgangssubstrat wie Hefe- oder Fleischextrakt basieren. Medien existieren in flüssiger und fester (in der Regel auf Agar basierend) Form. Für biotechnologische Produktionsprozesse kommen in der Regel komplexe Flüssigmedien zum Einsatz.
- Kurzumtriebspflanzen – schnellwachsende Baumarten, die auf landwirtschaftlichen Flächen angebaut und alle zwei bis zehn Jahre mithilfe von landwirtschaftlichen Erntemethoden geerntet werden. Am häufigsten werden Pappeln und Weiden angebaut.
- Lignin – von lat. lignum »Holz«; Makromolekül, das die Verholzung pflanzlicher Zellwände bewirkt. Lignine gehören neben den Kohlenhydraten zu den häufigsten organischen Verbindungen weltweit und machen ca. 20 bis 30 % der pflanzlichen Biomasse aus.



- Lignocellulose – Materialverbund aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Die Einlagerung von Lignocellulose in die Zellwand von Pflanzen führt zur Verholzung. Lignocellulose ist biologische nur sehr schwer abbaubar. Deshalb sind lignocellulosereiche Pflanzenteile in der Regel nicht ess- oder verfütterbare Reststoffe in der Landwirtschaft und gelten wegen der fehlenden Konkurrenz zu Lebensmittel- und Futterproduktion als für die industrielle Biotechnologie zu bevorzugende nachwachsende Rohstoffquelle.
- Metabolic Engineering – Anwendung gentechnischer Verfahren zur Optimierung von genetischen und regulatorischen Prozessen in Zellen, um die Produktion einer bestimmten Substanz in den Zellen zu erhöhen.
- Metabolismus – Stoffwechsel, umfasst alle biochemischen Reaktionen, die in einem Organismus stattfinden, dazu gehören der Auf- und Abbau von Biomolekülen, Transportvorgänge, Energiegewinnung, Atmung und deren Regulation.
- Metabolit – Stoffwechselprodukt.
- Metabolom – Gesamtheit aller Stoffwechselprodukte (Metabolite) in einer biologischen Probe; d.h. in einer Zelle, einem Gewebe, einem Organismus oder einer Probe unbekannter Zusammensetzung zu einem gegebenen Zeitpunkt bzw. einem bestimmten Zustand.
- Mikroorganismus – eine einfache Lebensform mikroskopischer oder submikroskopischer Größe, wie etwa Bakterien, Hefen, Pilze oder Archaea. Mikroorganismen werden als Produktionsorganismen in der industriellen Biotechnologie eingesetzt.
- Minimalorganismus – »stark verschlankter« Produktionsorganismus, der auf diejenigen Eigenschaften reduziert ist, die für die Produktion des gewünschten Produkts zwingend erforderlich sind, alle anderen Funktionen werden entfernt bzw. inaktiviert.
- Molekularbiologie – Teilgebiet der Biologie, das sich mit biologischen Prozessen auf molekularer Ebene befasst. Die Genexpression und deren Regulation sind zentrale Aspekte der Molekularbiologie.
- Monomer – Baustein eines Polymers (siehe Polymer).
- Monosaccharide – Einfachzucker. Monosaccharide sind die Bausteine aller Kohlenhydrate. Wichtige Monosaccharide sind Glucose und Fructose.
- Mutation – Veränderung des Erbguts, dies kann sich auf einzelne DNA-Bausteine oder große Sequenzabschnitte beziehen.
- N – Stickstoff.
- Nährmedium – siehe Kulturmedium.
- Nukleotide – Bausteine der DNA. Es gibt vier verschiedene Bausteine: Adenosin (A), Cytosin (C), Guanin (G) und Thymin (T).
- omik bzw. -omics – bezeichnet Teilgebiete der Molekularbiologie, die sich mit der Analyse der Gesamtheiten ähnlicher Einzelelemente befassen, so z.B. Genomik – Analyse der Gesamtheit aller Gene eines Organismus; Proteomik – Analyse der Gesamtheit aller Proteine eines Organismus; Transkriptomik – Analyse der Gesamtheit aller mRNAs. -omics-Technologien umfassen Geräte und Methoden, die diese Analysen ermöglichen.
- Oxidation – ist eine chemische Reaktion, bei dem ein Atom, Ion oder Molekül Elektronen abgibt. Im Allgemeinen versteht man unter Oxidation eine Reaktion mit Sauerstoff.
- Pathogene – Krankheitserreger bzw. Organismen (in der Regel Mikroorganismen), die andere Lebewesen krank machen können.
- PBS – Polybutylensuccinat.

4. Glossar



PEF – Polyethylenfuranoat.

Pentose – Zuckermolekül, dessen Kohlenstoffgerüst aus fünf Kohlenstoffatomen besteht. Wichtige Pentosen sind Ribose (Bestandteil der DNA), Arabinose und Xylose (Bestandteile der Hemicellulosen).

PHA – Polyhydroxyalkanoate.

Photosynthese – die Erzeugung von energiereichen Verbindungen unter Nutzung von Lichtenergie. Neben grünen Pflanzen und Algen sind auch einige Bakterien in der Lage Photosynthese zu betreiben. Grüne Pflanzen können durch Photosynthese atmosphärisches Kohlendioxid für den Aufbau komplexerer Verbindungen nutzen.

phototroph – phototrophe Organismen sind in der Lage, Licht als Energiequelle zu nutzen und diese in chemische Energie zu überführen.

pH-Wert – ist ein Maß für die Säurekonzentration in wässrigen Lösungen. Eine Lösung mit einem pH-Wert < 7 wird als sauer, eine Lösung mit einem pH-Wert > 7 als basisch oder alkalisch bezeichnet. Eine neutrale Lösung hat einen pH-Wert von 7.

PLA – Polymilchsäure.

Plattformchemikalien – können mit einer geringen Anzahl von Prozessschritten aus Biomasse gewonnen werden und zeichnen sich dadurch aus, dass sich aus ihnen ganze Produktstammbäume von Industriechemikalien ableiten lassen. Sie werden daher in großen Mengen benötigt (siehe auch Bulkchemikalien).

Polymer – ein Makromolekül, das sich aus vielen Bausteinen (Monomeren) zusammensetzt. Homopolymere setzen sich aus identischen Bausteinen zusammen, Heteropolymere aus verschiedenartigen. Viele wichtige Biomoleküle sind Polymere (Proteine, Cellulose, Stärke, DNA, Lipide etc). Eine Vielzahl natürlicher und synthetischer Materialien basiert auf Polymeren.

Polysaccharide – Mehrfachzucker, die sich aus vielen Monosacchariden zusammensetzen. Beispiele für Polysaccharide sind Stärke, Pektin, Cellulose oder Hemicellulose.

Produktionsorganismus – Organismus, der für die Herstellung eines industriellen Produkts verwendet wird. Dabei kann es sich um entweder um einen natürlich vorkommenden Organismus handeln oder um einen genetisch veränderten, speziell auf die Produktion ausgelegten Organismus handeln.

Prokaryoten – einzellige Lebewesen, die keinen Zellkern besitzen. Umfasst die Domänen der Bakterien und Archaea (siehe auch Eukaryoten)

Proteasen – Enzyme, die Proteine spalten können.

Proteine – Eiweiße; ein aus Aminosäuren aufgebautes Biomolekül. Proteine haben in Zellen eine Vielzahl an Funktionen, als Enzyme, Transporter oder Strukturelemente.

Proteom – die Gesamtheit aller Proteine in einer biologischen Probe, d. h. in einer Zelle, einem Gewebe, einem Organismus oder einer Probe unbekannter Zusammensetzung zu einem gegebenen Zeitpunkt bzw. einem bestimmten Zustand.

PTT – Polytrimethylenterephthalat.

Racemat – liegen die beiden Enantiomere eines chiralen Moleküls in einem Mischungsverhältnis von 1:1 vor, bezeichnet man diese Mischung als Racemat oder racemisch. Die Abtrennung eines Enantiomers aus einer racemischen Mischung stellt häufig eine verfahrenstechnische Herausforderung dar.



- Rekombinant – DNA-Moleküle können durch gentechnische Methoden neu zusammengesetzt werden, z.B. können neue DNA-Abschnitte in ein DNA-Segment (z.B. ein Plasmid) eingefügt werden. Das neu zusammengesetzte DNA-Molekül wird als rekombinant bezeichnet. Wird die veränderte DNA in einen Organismus eingebracht und ausgehend von dieser DNA ein Protein exprimiert, spricht man von rekombinanter Expression bzw. rekombinanten Proteinen.
- rote Biotechnologie – wird in Medizin und im Gesundheitswesen angewendet; typische Produkte: Stammzellen, Antibiotika.
- Saccharose – Haushalts- oder Kristallzucker. Ein Disaccharid, das sich aus einem Glucose und einem Fructosemolekül zusammensetzt. Saccharose wird kommerziell aus Zuckerrohr oder Zuckerrüben durch Extraktion gewonnen. Saccharose ist eine der wichtigsten Lebensmittelzutaten.
- Scale-up – Maßstabsvergrößerung, Überführung eines Ansatzes vom kleinen (Versuchs-) Maßstab in einen Produktionsmaßstab. Stellt in der industriellen Biotechnologie häufig eine verfahrenstechnische Herausforderung dar.
- Screening – darunter wird die systematische Suche nach einem geeigneten Kandidaten innerhalb einer großen Sammlung verstanden. In der Biotechnologie kann es sich um eine geeignete Mutante in einer Population handeln oder um eine bestimmte Sequenz in einer Sequenzsammlung. Ein Screening setzt voraus, dass der ideale Kandidat eine gut identifizierbare Eigenschaft (Selektionsmarker) aufweist, anhand derer er in der Gesamtpopulation oder Sammlung identifiziert werden kann.
- Selektion – Auswahl.
- Sequenzierungsverfahren – Labormethode, mit der die genaue Abfolge der vier Nukleotidbausteine in einer DNA-Sequenz ermittelt wird.
- Spezialchemikalien (auch als Performance- oder Effektchemikalien bezeichnet) – hochwertige Produkte, die meist für einen speziellen Bedarf auf dem Markt hergestellt werden. Sie haben im Vergleich zu Bulkchemikalien i.d.R. geringe Produktionsvolumina (< 10.000 t im Jahr). Beispiele sind Schmierstoffe, Enzyme, Fettsäuren, Steroide. Sie werden meist nach ihrer Funktion beschrieben.
- Stärke – ein Polysaccharid, das sich ausschließlich aus Glucosebausteinen zusammensetzt. Stärke ist ein wichtiger Speicherstoff in Pflanzen und wird in großen Mengen in speziellen Organen (Kartoffelknolle, Samen) eingelagert. Stärke ist wegen seiner vielseitigen Anwendungen (Verwendung für Lebensmittel sowie für eine Vielzahl technischer Anwendungen) von großem industriellem Interesse.
- Substrat – siehe Kulturmedium.
- Systembiologie – ist eine Disziplin der Biowissenschaften, die darauf abzielt, ein biologisches System (eine Zelle, ein Organismus oder eine Population) in seiner Gesamtheit quantitativ zu erfassen. Dafür werden Parameter auf unterschiedlichen Ebenen (Genom, Transkriptom, Proteom, Metabolom etc) erfasst und zu einem Gesamtbild integriert.
- (k)t – (Kilo-)Tonnen.
- Transkript – oder die mRNA ist die Kopie eines Gens. Es dient als Vorlage für die Proteinsynthese. Außerdem haben viele Transkripte zusätzlich regulatorische Funktionen. Die Menge an Transkript kann als Maß für die Aktivität eines Gens gesehen werden.
- Transkription – wird als das Ablesen eines Gens und die Synthese der dazugehörigen mRNA bezeichnet.



- Transkriptom – bezeichnet die Gesamtheit aller Transkripte und beschreibt somit den Zustand der Genexpression eines Organismus, Gewebes oder einer Zelle zu einem gegebenen Zustand oder Zeitpunkt.
- Upstream Processing – umfasst im (biotechnologischen) Produktionsprozess die Schritte vor der Produktsynthese. Dazu gehören vorbereitende Maßnahmen, beispielsweise die Aufbereitung des Rohstoffs, um diesen für einen fermentativen Prozess verfügbar zu machen.
- weiße Biotechnologie – siehe industrielle Biotechnologie.
- Wildtyp – eine Form eines Lebewesens, wie es auch in der Natur anzutreffen ist. Ausgehend vom Wildtyp können durch Mutagenese, Züchtung oder gezielte gentechnische Eingriffe Produktionsorganismen für die industrielle Biotechnologie entwickelt werden.
- Zellkern – oder Nucleus. Kompartiment in eukaryotischen Zellen, das das Erbgut umfasst. Der Zellkern ist das Hauptmerkmal von Eukaryoten. Prokaryoten (Bakterien und Archaea) enthalten keinen Zellkern.



**BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG**

KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Fon +49 30 28491-0
Fax +49 30 28491-119

buero@tab-beim-bundestag.de
www.tab-beim-bundestag.de