

# Umwelt- und Nachhaltigkeitspotenziale der industriellen Biotechnologie

Seit vielen Jahren werden große Erwartungen an das ökonomische und ökologische Potenzial der »weißen« oder industriellen Biotechnologie (IBT) formuliert. Denn die IBT, so die Hoffnung, stellt einen wichtigen Baustein innerhalb einer Bioökonomie dar, also einer idealerweise nur auf regenerativen Rohstoffen basierenden und damit nachhaltigen Industrieproduktion. Dabei wird der IBT das Potenzial zugemessen, energie- und ressourceneffiziente industrielle Produktionsprozesse bereitzustellen, mit denen Biomasse umfassend als regenerativer industrieller Rohstoff erschlossen werden kann, um langfristig fossile Rohstoffe zu substituieren.

## Was ist industrielle Biotechnologie?

Unter industrieller Biotechnologie wird die Anwendung biotechnologischer Verfahren zur industriellen Erzeugung und Verarbeitung von Chemikalien, Materialien und Energie verstanden. Eine zentrale Rolle spielen Verfahren der IBT in der stofflichen Weiterverarbeitung von nachwachsenden Rohstoffen, was zu der geschilderten Bedeutung der IBT im Rahmen der Bioökonomie führt. Mithilfe von Enzymen und Mikroorganismen wird Biomasse in Produkte hauptsächlich der Bereiche Chemie, Lebens- und Futtermittel, Papier und Zellstoff, Textilien und Energie umgewandelt. Die der IBT zugrundeliegenden biotechnischen Verfahren und die gesamte Technologie haben sich rasant weiterentwickelt und ausdifferenziert. Bei dieser Entwicklung spielt insbesondere die seit den 1970er Jahren mögliche gezielte Veränderung von Mikroorganismen mithilfe der Gentechnik eine entscheidende Rolle. Durch sie können biotechnologische Prozesse kontrolliert sowie gezielt weiterentwickelt und optimiert werden. Erst durch die Gentechnik lässt sich das Potenzial der Biotechnologie industriell umfänglich(er) ausschöpfen.

## Bedeutung der industriellen Biotechnologie

Aktuell ist die wirtschaftliche Bedeutung der IBT noch relativ gering. Derzeit machen Produkte der IBT (inklusive Bioethanol) etwa 6 % aller weltweit verkauften

Chemikalien aus, mit steigender Tendenz. Gerade für Deutschland ist die ökonomische Bedeutung der IBT perspektivisch jedoch groß. Etwa 40 % (geschätzt) der kleinen und mittleren Unternehmen, die in Europa in der IBT tätig sind, befinden sich in Deutschland. Der hohe FuE-Anteil verspricht eine stetige Weiterentwicklung der stark wissensbasierten IBT und Wettbewerbsvorteile für Technologieführer.

Die IBT liefert wichtige technische Voraussetzungen dafür, die industrielle Produktion auf den Input aus nachwachsenden Rohstoffen (Biomasse) umzustellen, um so eine nachhaltige Entwicklung zu befördern. Dementsprechend werden die möglichen ökonomischen und ökologischen Potenziale der IBT in Politik, Gesellschaft und Wirtschaft intensiv diskutiert. Diesen Aspekten ist eine Innovationsanalyse des TAB nachgegangen, als deren Resultat zwei komplementäre Sachstandsberichte vorliegen. Während im TAB-Arbeitsbericht Nr. 168 die Verfahren, Anwendungen und ökonomischen Perspektiven beschrieben werden, fokussiert der TAB-Arbeitsbericht Nr. 169 Umwelt- und Nachhaltigkeitswirkungen der IBT. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der stofflichen Nutzung von Biomasse in der chemischen Industrie. Im letzteren Bericht, dessen Ergebnisse im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen, wird sich folgenden zentralen Fragestellungen gewidmet:

› Welche methodischen Zugänge zur Bewertung von IBT im Hinblick auf ihre Umwelt- und Nachhaltigkeitswirkungen gibt es? Was können diese leisten?

- › Wie wirkt sich IBT auf Umwelt und Nachhaltigkeit insgesamt aus? Was ist über das Nachhaltigkeitspotenzial unterschiedlicher Stoff- bzw. Produktgruppen bekannt?
- › Welche Aspekte des Ausbaus der IBT sind in Bezug auf Nachhaltigkeit möglicherweise problematisch?

## Methodische Überlegungen

Eine Abschätzung der Umwelt- und Nachhaltigkeitswirkungen der IBT stößt auf mehrere grundsätzliche Herausforderungen. So sind die biotechnischen Verfahren beispielsweise oft in herkömmliche Produktionsketten eingebunden. Das erschwert eine Zuordnung und Bewertung der auftretenden Umwelt- und Nachhaltigkeitswirkungen, die je nach Rahmenseetzungen (z. B. Zeit- und Raumeffekte) unterschiedlich ausfallen können. Zudem stehen oft keine ausreichenden Daten für seriöse Analysen zur Verfügung.

Um die Ergebnisse von wissenschaftlichen Untersuchungen einordnen und einschätzen zu können, war eine Auseinandersetzung mit den in den einzelnen Studien verwendeten Methoden zur Abschätzung der Umweltverträglichkeit notwendig. Eine Vielzahl von Methoden wurde in den vergangenen Jahrzehnten entwickelt, die alle ihre jeweiligen Stärken und Schwächen aufweisen. Dabei lässt sich grundsätzlich konstatieren: Je zeit- und kostenaufwendiger eine Untersuchungsmethode ist, desto ausgewogener sind in der Regel ihre Ergebnisse, da mehr Wirkungsdimensionen mit in die Betrachtung einbezogen werden können. Allerdings zeigen sich oft widersprüchliche Einschätzungen hinsichtlich der verschiedenen Wirkungsdimensionen, sodass selten ein eindeutiges Ergebnis erzielt wird. Einfache, auf nur wenigen Wirkungsdimensionen beruhende Ansätze kommen hingegen zwar oft zu (scheinbar) eindeutigeren Ergebnissen, allerdings sind die Beurteilungen nicht immer ausgewogen, weil andere Wirkungsdimensionen nicht einbezogen wurden.

Sogenannte Lebenszyklusanalysen (LCA) bilden einen wichtigen Schwerpunkt der verfügbaren Literatur. Sie gelten aufgrund ihrer relativen Breite der Betrachtung und standardisierten Vorgehensweise als besonders verlässlich. Deshalb stehen Ergebnisse von LCA zu wichtigen Produkten und Prozessen der IBT (u. a. Biokraftstoffe, Grund- und Feinchemikalien, enzymatische Verfahren) im Mittelpunkt der Innovationsanalyse.

### Ergebnisse: Umwelt- und Nachhaltigkeitswirkungen der IBT

Der Einsatz von IBT-Verfahren erlaubt es grundsätzlich, kostengünstig, energieeffizient und unter milden Produktionsbedingungen (hinsichtlich Druck, Temperatur, pH-Wert etc.) herzustellen. Die IBT zeichnet sich darüber hinaus dadurch aus, dass die Produktion i. d. R. in geschlossenen Systemen (Bioreaktoren) durchgeführt wird. Damit werden Kontaminationen der Umwelt weitgehend vermieden oder ausgeschlossen. Bei der übergreifenden Analyse der relativen Umwelt- und Nachhaltigkeitswirkungen verschiedener Produktgruppen zeigte sich, dass die Produktion der untersuchten, auf der Verarbeitung von Biomasse aufbauenden (biobasierten) Stoffe im Vergleich zu konventionell hergestellten Vergleichsprodukten den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen reduzieren kann. Im Gegenzug verstärkt sie aber negative Umweltwirkungen, die durch den großmaßstäblichen intensivlandwirtschaftlichen Anbau von Biomasse verursacht werden, wie beispielsweise die Belastung von Gewässern durch ein Überangebot an Nährstoffen, den stratosphärischen Ozonabbau und die Bodenversauerung. Allerdings bestehen erhebliche Unsicherheiten im Hinblick auf die quantitativen Wirkungsabschätzungen. Deshalb müssen die Ergebnisse zur Bewertung von Nachhaltigkeitseffekten und relativen Umweltwirkungen von IBT-Produkten vorsichtig interpretiert werden.

Ein Beispiel soll dies illustrieren: Biokunststoffe (z. B. biobasiertes Polyethylenterephthalat [PET], Polyactide [PLA] und Polyhydroxyalkanoate [PHA]) zählen neben den Biokraftstoffen zu den Produkten, denen ein großes mengenmäßiges Potenzial zugesprochen wird, obwohl der Biokunststoffmarkt gegenwärtig noch verhältnismäßig klein ist. Sie werden z. B. für Fasern, Getränkeflaschen und Verpackungen verwendet. Die Gesamtbilanz von Biokunststoffen ist ambivalent: Während es Vorteile in den Kategorien Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch gibt, zeigen sich bei anderen Umweltindikatoren, wie Bodenversauerung, Nährstoffbelastung von Gewässern und Böden, oft ungünstigere Ergebnisse im Vergleich zu auf fossilen Rohstoffen basierenden Kunststoffen. Entscheidend für die Gesamtbilanz im Hinblick auf Nachhaltigkeit ist die Bereitstellung der Biomasse. Darüber hinaus spielt die Entsorgung von Biokunststoffen eine wichtige Rolle für das ökologische Profil: Recycling wäre eine vorteilhafte Entsorgungsmöglichkeit, wird jedoch noch nicht umfassend angewendet.

### Einsatz von Enzymen: Beispiel Waschmittel

Ein Kernstück der IBT liegt im Einsatz von biotechnologisch hergestellten Enzymen als Katalysatoren, um bestimmte chemische Reaktionen ablaufen zu lassen. Im TAB-Bericht wurde beispielhaft die Anwendung von Enzymen als Bestandteil von Waschmitteln betrachtet. Bei diesem Verfahren der IBT ergeben sich unzweifelhaft positive Umwelt- und Nachhaltigkeitsbeiträge, wobei zwei Haupteffekte maßgebend sind: Zum einen können die Waschttemperaturen reduziert werden, was zu Energie- und Treibhausgaseinsparungen führt, und zum anderen können Waschmittel sparsamer dosiert werden, weshalb auch weniger ihrer konventionellen Mengenteile (Tenside, Bleichmittel, Enthärter etc.) verbraucht werden und in die Umwelt ge-

langen. Deutlich wurde jedoch auch, dass diese Vorteile von Waschmitteln mit höherem Enzymanteil durch die Zuwächse bei der insgesamt gewaschenen Wäschemenge im Zeitverlauf abgeschwächt werden (sogenannter Reboundeffekt) und durch die verbleibenden konventionellen Bestandteile von Waschmitteln signifikante Umweltbelastungen bestehen bleiben. Insgesamt muss konstatiert werden, dass für eine umfassende Aufarbeitung des Themas die notwendigen wissenschaftlich fundierten Ökobilanzstudien fehlen, was wiederum mit dem eingeschränkten Zugang zu den für eine Bilanz notwendigen Daten zusammenhängt. Deutlich wurde auch, dass die Fokussierung auf technologische Optionen (z. B. Enzyme) allein dem Anspruch der Nachhaltigkeit nicht gerecht werden kann, sondern auch soziale Faktoren, wie z. B. Nutzungsverhalten, als Ansatzpunkte für eine nachhaltige Entwicklung mit in den Blick genommen werden müssen.

### Gesamtbeitrag der IBT zur Nachhaltigkeit – Bereitstellung der Biomasse

Neben den relativen Umwelt- und Nachhaltigkeitswirkungen einzelner Produktionsprozesse oder einzelner spezifisch biotechnologisch hergestellter Produkte im Vergleich zu ihren konventionellen Vergleichsprozessen und -produkten spielt für eine Gesamtbewertung der Nachhaltigkeitsbeiträge der IBT eine entscheidende Rolle, welchen Beitrag sie zur Realisierung der Vision einer zukünftigen Bioökonomie leisten kann. Unstrittig ist, dass dies nur gelingen kann, wenn Technologien zur Verfügung stehen, mit denen die zugrundeliegenden erneuerbaren Ressourcen effizient und vielseitig aufgeschlossen und verarbeitet werden können. Für eine umfassende stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe ist eine große Bandbreite bestehender und noch zu entwickelnder Verfahren der IBT unverzichtbar.

Gleichzeitig stellt sich die Frage, in welchem Umfang die IBT zu einer Bioökonomie beitragen kann. Dies ist gekoppelt an die Verfügbarkeit bzw. nachhaltige Produktion entsprechender Mengen von Biomasse, d. h. an die Potenziale für deren (nachhaltige) Produktion. Zu dieser Frage liegen aus dem Kontext der Bereitstellung von Bioenergie zahlreiche Studien vor, die zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Insgesamt zeigt sich, dass auch bei Ausweitung der entsprechend verwendeten Agrarfläche in Deutschland die stoffliche Nutzung von Biomasse mittels IBT zwar nicht irrelevant ist, aber wohl nicht die einzige Rohstoffbasis industrieller Produktion bilden kann. Die Frage der Nachhaltigkeit der biotechnologischen Nutzung von Biomasse ist fundamental mit der grundsätzlichen Notwendigkeit einer nachhaltigen Bewirtschaftung der zur Verfügung stehenden begrenzten Flächen verbunden. Als besonders schwierig, auch international, gilt seit vielen Jahren das Problem der Nutzungskonkurrenz auf landwirtschaftlich nutzbaren Flächen zwischen der Nahrungsmittelproduktion für eine wachsende Weltbevölkerung und der Erzeugung von Biomasse.

## Handlungsoptionen

Der IBT wird zwar auf dem Weg hin zu einer Bioökonomie eine hohe Relevanz beigemessen, sie ist jedoch, insbesondere durch den intensiven Anbau der nachwachsenden Rohstoffe, mit einer Reihe

von Problemen verbunden. Daher fällt gegenwärtig die Umweltbilanz vieler Produkte der IBT ambivalent aus. Es ist somit naheliegend, von größeren Markteingriffen, etwa zur direkten Förderung von Produkten der IBT, abzusehen und auf die selbstselektiven Marktkräfte zu vertrauen. Dennoch ergeben sich einige Handlungsfelder für nachhaltigkeitsfördernde Politikmaßnahmen.

Im Bereich *Forschung und Entwicklung* ist die Beibehaltung bzw. Ausweitung der Förderung von Forschungsaktivitäten und Pilotanlagen der IBT sinnvoll, weil dadurch Optionen für die Entwicklung der Wirtschaft hin zu einer Bioökonomie und entsprechende Nachhaltigkeitsbeiträge generiert werden können. Aufgrund der Nutzungskonkurrenzen bei der Erzeugung der Biomasse ist es dabei wichtig, besonders solche (bio)technologischen Verfahren zu entwickeln, die auch andere als klassisch-landwirtschaftlich erzeugte Biomasse verarbeiten können, wie zum Beispiel Algen.

Da der *nachhaltige Anbau von Biomasse* entscheidend für die Gesamtbilanz der IBT im Hinblick auf Nachhaltigkeit ist, muss darauf hingearbeitet werden, dass dieser möglichst umweltfreundlich erfolgt, auch wenn Umweltbeeinträchtigungen und Landnutzungskonkurrenzen nicht vollständig vermeidbar sind. Auf den globalen Märkten für nachwachsende Rohstoffe kann dafür das bereits etablierte Instrument der Zertifizierung verwendet werden. Bei der Förderung des

Einsatzes nachwachsender Rohstoffe zur stofflichen Nutzung wäre es beispielsweise notwendig, über entsprechende Förderbedingungen eine Zertifizierung der Biomasseherstellung zu etablieren, wobei nur anspruchsvolle Zertifizierungssysteme als zielführend gelten können.

Durch die *Mehrfachnutzung von Biomasse* zuerst durch stoffliche und anschließend durch energetische Verwertung (sogenannte Kaskadennutzung) lässt sich die direkte Nutzungskonkurrenz zwischen stofflicher und energetischer Nutzung zwar nicht grundsätzlich lösen, aber abschwächen. Hieraus ergibt sich ein klarer Vorrang bei der Förderung der stofflichen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen gegenüber deren direkter energetischer Verwertung.

*Die Ergebnisse der Innovationsanalyse »Weiße Biotechnologie – Stand und Perspektiven der industriellen Biotechnologie für nachhaltiges Wirtschaften« werden in Kürze in Form zweier Sachstandsberichte (TAB-Arbeitsberichte Nr. 168 und 169) veröffentlicht.*

### Kontakt

Dr. Johannes Schiller,  
Helmholtz-Zentrum für  
Umweltforschung – UFZ  
+49 341 2351690  
johannes.schiller@ufz.de