Fraunhofer Institut
Systemtechnik und
Innovationsforschung

Überblick über den Stand von Wissenschaft und Technik im produktionsintegrierten Umweltschutz durch Biotechnologie (PIUS-BT)

Dr. Sibylle Gaisser
Dipl.-Phys. Roeland Hoogeveen
Dr. Bärbel Hüsing

Dezember 2002

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg im Zeitraum Juli bis Dezember 2002 erstellt.

Autorinnen und Autoren: Dr. Sibylle Gaisser (Projektleitung)
Dipl.-Phys. Roeland Hoogeveen
Dr. Bärbel Hüsing
Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe
E-Mail: s.gaisser@isi.fraunhofer.de

Sekretariat: Silke Just

Inhaltsverzeichnis Seite

Tabellenverzeichnis ..... **i**

Abbildungsverzeichnis ..... **ii**

1. Methodik und Vorgehensweise **1**

2. Das Konzept des produktionsintegrierten Umweltschutzes (PIUS) **3**

2.1 Grundlagen 3

2.2 Bedeutung der Biotechnologie im produktionsintegrierten Umweltschutz 5

3. Aktueller Stand von Wissenschaft und Technik **9**

3.1 Einführung 9

3.2 Chemische und pharmazeutische Industrie 15

3.2 Lebensmittelindustrie 29

3.4 Papier- und Zellstoffindustrie 33

3.5 Textilindustrie 35

3.6 Querschnittstechnologie biotechnologische Herstellung von Energieträgern 39

3.7 Perspektiven 46

4. Umweltentlastungseffekte **47**

4.1 Fallbeispiele für Umweltentlastungseffekte durch biotechnische Verfahren 47

4.2 Diskussion der Erkenntnisse aus diesen Fallstudien aus Unternehmenssicht 55

4.3 Diskussion der Erkenntnisse aus diesen Fallstudien aus Politiksicht 60

Seite

5. Fördernde und hemmende Faktoren bei der Implementierung von biotechnologischen Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz 65

5.1 Generelle Hemmnisse 65

5.2 Branchenspezifische Hemmnisse 66

5.2.1 Chemische und pharmazeutische Industrie 66

5.2.2 Lebensmittelindustrie 69

5.2.3 Papier- und Zellstoffindustrie 70

5.2.4 Textilindustrie 70

5.3 Fördernde Faktoren 71

6. Nationale und internationale Fördermaßnahmen und politische Initiativen 75

6.1 Fördermaßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland 75

6.1.1 Bundesebene 75

6.1.2 Landesebene 77

6.2 Internationale Fördermaßnahmen 78

6.2.1 Länderspezifische Fördermaßnahmen 78

6.2.2 Länderübergreifende Fördermaßnahmen 84

7. Glossar 89

8. Literatur 91

Tabellenverzeichnis **Seite**

Tabelle 2.1: Bedeutung der Chiralität für die Wirksamkeit von Pharmaka 6

Tabelle 3.1: Fallbeispiele für biotechnologische Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz in der industriellen Praxis 10

Tabelle 3.2: Übersicht über kommerzielle Massenenzyme für verschiedene industrielle Einsatzgebiete 11

Tabelle 3.3: Überblick über biotechnische Verfahren, die großtechnisch für die Synthese von Substanzen in der chemischen und pharmazeutischen Industrie eingesetzt werden 20

Tabelle 3.4: Übersicht über biotechnische Verfahren in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie und die damit verbundenen Umweltentlastungseffekte 30

Tabelle 3.5: Charakteristika der Stoffwechselprozesse, die an der biologischen Wasserstofferzeugung beteiligt sein können 43

Tabelle 3.6: Vergleich verschiedener Energieträger aus Biomasse 45

Tabelle 4.1: Umwelt(entlastungs)effekte ausgewählter Fallbeispiele biotechnologischer Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz 48

Abbildungsverzeichnis **Seite**

Abbildung 2.1: Einsatzmöglichkeiten biotechnologischer und konventioneller Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes auf verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette 4

Abbildung 3.1: Überblick über die aufeinander folgenden Verfahrensschritte bei der Textilherstellung (textile Kette). 36

Abbildung 3.2: Einzelschritte einer fermentativen oder enzymatischen Ethanolproduktion auf lignocellulosehaltigem Substrat 42

Abbildung 4.1: Energieverbrauch der Acrylamidproduktion (MJ/kg Acrylamid)..... 53

Abbildung 4.2 CO_2 –Produktion bei der Acrylamidproduktion (kg CO_2/kg Acrylamid)..... 54

Abbildung 4.3: Mögliche Bilanzrahmen von Verfahrensvergleichen..... 56

Abbildung 4.4: Flussschema zur Enzymherstellung als Basis einer Cradle-to-Gate- bzw. Cradle-to-Grave-Analyse 63

1. Methodik und Vorgehensweise

Zur Beschaffung der Informationen zum aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik biotechnologischer Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz in der Chemischen und Pharmazeutischen Industrie, der Lebensmittelindustrie, der Papier- und Zellstoffindustrie sowie der Textilindustrie wurden Recherchen in Literaturdatenbanken wie BIOSIS und Medline durchgeführt. Weitere Informationsquellen waren einschlägige Fachliteratur, Kongressdokumentationen, Studien und graue Literatur, die durch Vorarbeiten des Projektteams bekannt waren bzw. durch Internetrecherchen ermittelt wurden. Fallweise wurden die erhobenen Daten zusätzlich durch persönliche Anfragen (Telefon, E-Mail) mit relevanten Akteuren rückgekoppelt und ergänzt. Dies betrifft insbesondere Fragen zu den Hemmnissen beim Einsatz biotechnologischer Verfahren.

Einige Aspekte der Studie wurden und werden von Wissenschaftlern am Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung bearbeitet, die nicht zum eigentlichen Projektteam gehören. Dazu gehören Teilaspekte der Katalyse, alternative Energieträger und Umweltbetrachtungen. Für diese Themen wurden die Studienergebnisse und Kenntnisse der Wissenschaftler durch Interviews erhoben und in die vorliegende Studie integriert.

2. Das Konzept des produktionsintegrierten Umweltschutzes (PIUS)

2.1 Grundlagen

Industrielle Prozesse zur Herstellung und zur Verarbeitung von Produkten sind mit erheblichen Belastungen der Umwelt durch den Verbrauch von Energie und Rohstoffen sowie durch Emissionen von Schadstoffen in Abwässern, Abfällen und Abluft verbunden. Da der nachsorgende Umweltschutz mit seinen End-of-pipe-Technologien zunehmend an seine Grenzen stößt und diese Techniken nur einen geringen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten, kommt dem Konzept des produktionsintegrierten Umweltschutzes wachsende Bedeutung zu. Hierbei wird angestrebt, neue Produktionsformen zu finden, bei denen die oben genannten Umweltbelastungen von vornherein möglichst vermieden bzw. verringert werden. Als produktionsintegriert werden in dieser Studie Verfahren bezeichnet, die ein ressourcenschonendes Potenzial haben, da sie es ermöglichen

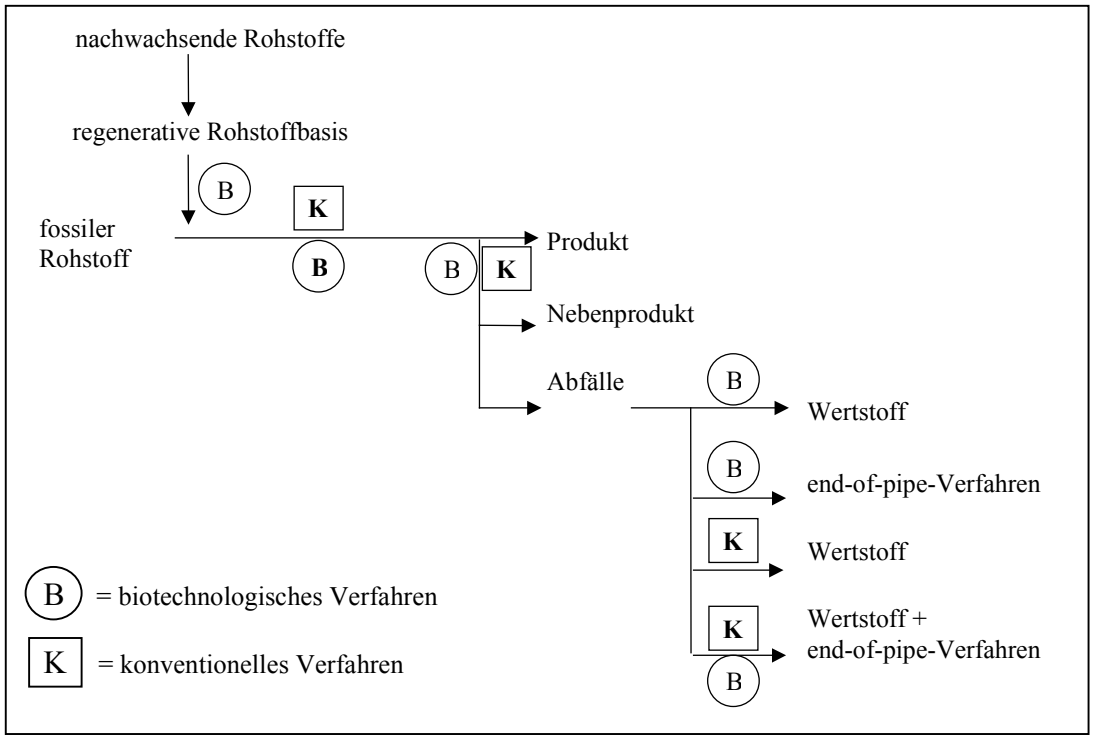
- eine alternative Rohstoffbasis zu erschließen bzw. eine fossile durch eine regenerative Rohstoffbasis zu substituieren,
- den Produktionsprozess für das Produkt ressourcenschonender zu gestalten,
- ein verwertbares Nebenprodukt zu produzieren,
- einen Wertstoff aus Reststoffen zu produzieren,
- einen Wertstoff aus Reststoffen im Rahmen einer Maßnahme des nachsorgenden Umweltschutzes (End-of-pipe-Technologie) zu produzieren.

Abbildung 2.1 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Möglichkeiten des produktionsintegrierten Umweltschutzes. Sie zeigt, dass diese Verfahren auf verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette zum Einsatz kommen.

Die vorliegende Studie fasst den Stand von Wissenschaft und Technik für industriell anwendbare biotechnische Verfahren zusammen. Daneben gibt es konventionelle Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes, die parallel zu biotechnologischen Verfahren eingesetzt werden können bzw. einen Einstieg in das Konzept des produktionsintegrierten Umweltschutzes ermöglichen, also eine Art Türöffner für biotechnologische Verfahren darstellen. In der vorliegenden Studie wurde davon ausgegangen, dass Nutzer konventioneller Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes durch ihr Interesse für die Thematik und die bereits erfolgte Beschäftigung mit möglichen (technischen) Lösungsansätzen auch

eine gewisse Affinität zu biotechnologischen Verfahren haben können, bzw. dass teilweise in konventionellen Verfahren bereits biotechnologische Teilkomponenten enthalten sind, dies den Nutzern aber u.U. gar nicht bewusst ist. Aus diesem Grund wurden die konventionellen Verfahren in der Erhebung biotechnologischer Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes in Baden-Württemberg für die in Abbildung 2.1 markierten Phasen der Wertschöpfungskette mit berücksichtigt.

Abbildung 2.1: Einsatzmöglichkeiten biotechnologischer und konventioneller Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes auf verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette



Verschiedene Untersuchungen (OECD 1998, Hüsing et al. 2000) kommen zu dem Ergebnis, dass das Konzept des produktionsintegrierten Umweltschutzes bislang immer noch zu wenig bekannt ist. So wird Umweltschutz zumeist mit dem nachsorgenden Umweltschutz gleichgesetzt. Symptomatisch dafür ist auch die Tatsache, dass in den vergangenen Jahren bis zu 80 % aller Umweltausgaben in den nachsorgenden Umweltschutz investiert wurden. Insgesamt wird jedoch der Weltmarkt für nachhaltige Technologien für den Umweltschutz auf 1500 Mrd € im Jahr 2010 geschätzt (Busquin und Vanderberghe 2002).

Aus der Sicht von Unternehmen sind die mit produktionsintegrierten Maßnahmen verbundenen Umweltentlastungseffekte meist kein ausreichender Anreiz für eine Verfahrensumstellung. Die Verfahrensumstellung zu produktionsintegrierten Maßnahmen wird hingegen eher vollzogen, wenn sie zusätzlich zu der Umweltentlas-

tung Produkt- bzw. Verfahrensinnovationen in der Produktion ermöglichen (Hüsing et al. 1998).

2.2 Bedeutung der Biotechnologie im produktionsintegrierten Umweltschutz

Da biotechnische Verfahren zur Stoffproduktion und -umwandlung unter milden Bedingungen, in wässrigen Medien und mit hoher Selektivität und Spezifität ablaufen, scheinen sie ein erhebliches Potenzial für den produktionsintegrierten Umweltschutz zu bergen. Unter prozessintegrierten biotechnischen Präventivtechniken werden fermentative Verfahren mit Mikroorganismen bzw. Zellkulturen, Biotransformationen mit ganzen Zellen sowie Stoffumwandlungen mit isolierten Enzymen verstanden. Die zum Einsatz kommenden Organismen können gentechnisch verändert sein; die verwendeten Enzyme können aus gentechnisch veränderten Organismen stammen und/oder mit Hilfe der Gentechnik in ihren Eigenschaften verändert worden sein.

Im Einzelnen zeichnen sich biotechnologische Verfahren durch folgende komparativen Vorteile aus.

Erschließen einer regenerativen Rohstoffbasis

Zu den herkömmlichen Rohstoffen für die Synthese von Bulk- und Feinchemikalien, für Polymere und Energieträger zählen fossile Rohstoffe. Vor dem Hintergrund der Limitierung der globalen Erdölvorkommen tragen regenerative Rohstoffe dazu bei, die Versorgung mit Ausgangsstoffen insbesondere für die chemische und pharmazeutische Industrie, als auch für den Kraftverkehr langfristig zu sichern. Unter dem Aspekt des produktionsintegrierten Umweltschutzes könnte der Einsatz regenerativer Rohstoffe zu einer Verbesserung der CO_2-Bilanz beitragen. Industriell relevante Prozesse im Rahmen dieser Studie sind beispielsweise die Produktion von Biopolymeren und die biotechnologische Erzeugung von alternativen Energieträgern wie Bioethanol.

Veränderung des Produktionsprozesses

Primäres Ziel beim Einsatz biotechnologischer Verfahren im Produktionsprozess war zunächst die Reduktion von Emissionen oder die gänzliche Substitution umweltschädlicher Substanzen. Relevante Beispiele im Rahmen dieser Studie sind die enzymatische Vorbehandlung von Textilien als Substitution für die chemische Behandlung, die enzymatische Produktion von Feinchemikalien und Pharmazeutika und das enzymatische Bleichen von Zellstoff. Biotechnische Verfahren verlaufen zumeist unter milden Bedingungen, d. h. bei Raumtemperatur und in wässrigem

Reaktionsmilieu. Dies führt zu einer Einsparung von Energie und zur Schonung der Produktionsanlagen. Ein Beispiel im Rahmen dieser Studie ist die enzymatische Entschleimung von Pflanzenölen. Weitere Vorteile biotechnologischer Verfahren liegen in der Selektivität und Spezifität der eingesetzten Produktionssysteme. Diese verleihen dem Produkt neue Eigenschaften, da die Reaktion enantioselektiv abläuft. Dieser Vorteil biotechnischer Verfahren kommt insbesondere bei der Produktion chiraler, d. h. spiegelsymmetrischer Verbindungen zum Tragen. Besonders im Bereich der Pharmawirkstoffe haben chirale Substanzen an Bedeutung gewonnen, nachdem in den letzten Jahren der Einfluss der Chiralität einer Substanz auf Wirkung und Nebenwirkung erkannt und in den Mittelpunkt der aktuellen Richtlinien für die Arzneimittelprüfung gestellt wurde. So wurden für eine Vielzahl von Pharmazeutika zumeist für das (S)-Enantiomer die gewünschte Wirkung ermittelt, während das (R)-Enantiomer unerwünschte Wirkungen zeigte. Bei Thalidomid hat im Gegensatz dazu das (R)-Enantiomer die gewünschte beruhigende Wirkung, während vom (S)-Enantiomer eine Fruchtschädigung ausgeht. Tabelle 2.1 fasst einige der prominentesten chiralen Medikamente zusammen.

Tabelle 2.1: Bedeutung der Chiralität für die Wirksamkeit von Pharmaka

Substanz	Einsatzgebiet des gewünschten Enantiomers	Wirkung des unerwünschten Enantiomers
Dopa	Parkinson-Erkrankung ((S)-Form)	schwerwiegende Nebenwirkungen ((R)-Form)
Ketamin	Anaesthesie ((S)-Form)	halluzinogen ((R)-Form)
Penicillinamin	Arthritis ((S)-Form)	mutagen ((R)-Form)
Ethambutol	Tuberkulose ((S)-Form)	Erblindung ((R)-Form)
Thalidomid	Beruhigungsmittel ((R-)-Form)	teratogen ((S)-Form)

Quelle. Wubbolts 2002

Herstellung eines kommerzialisierbaren Nebenprodukts

Wie auch in konventionellen Prozessen können biotechnologische Prozesse neben dem gewünschten Produkt zu einem kommerzialisierbaren Nebenprodukt führen und dadurch zur Reduktion des anfallenden Abfallvolumens beitragen. Als Beispiel sei hier die fermentative Bioethanol-Produktion genannt, bei der die anfallende Biomasse als Futtermittel eingesetzt werden kann.

Verwertung von Abfällen

Verstärkt wurden Forschungsanstrengungen unternommen, aus Reststoffen mit Hilfe biotechnologischer Verfahren neue Wertstoffe zu gewinnen. Dies reduziert das Abfallaufkommen und könnte gleichzeitig eine kostengünstige Produktion

durch niedrige Rohstoffpreise ermöglichen. Beispielhaft dafür ist die Produktion des Aromastoffs Vanillin durch Verwertung von Lignin, das bei der Zellstoffproduktion anfällt. Im Gegensatz dazu gibt es auch klassische Maßnahmen des nachsorgenden Umweltschutzes, die jedoch bei durchdachter Prozessführung zu einem Wertstoff führen und aus diesem Grund in der Bestandsaufnahme der biotechnischen Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz mit berücksichtigt wurden. Ein Beispiel dafür ist die Biogas-Produktion aus Abfällen.

3. Aktueller Stand von Wissenschaft und Technik

3.1 Einführung

Weltweit wurden in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte bei der Neuentwicklung biotechnologischer Verfahren für eine umweltschonende, nachhaltige Produktion gemacht. Dabei entstammen die Verfahren zahlreichen Bereichen des produzierenden Gewerbes: sie reichen von der Pharmaindustrie, über die chemische Industrie mit der Erzeugung von Fein- und Bulkchemikalien, der Lebensmittel- und Futtermittelindustrie, der Textil-, Papier- und Zellstoffindustrie bis hin zum praktischen Einsatz im Bergbau. Eine Querschnittstechnologie, die in verschiedenen Sektoren genutzt werden kann, stellt die Erzeugung von Energieträgern mittels biotechnologischer Verfahren dar. Ein Teil dieser biotechnologischen Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes hat bereits in der industriellen Praxis Einzug gehalten (OECD 2001). Einen Überblick gibt Tabelle 3.1.

Enzyme spielen eine wichtige Rolle für biotechnologische Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes. Von den 21 in der OECD-Studie „The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability“ (2001) analysierten Fälle des produktionsintegrierten Umweltschutzes benützten 15 in ihrem Produktionsprozess Enzyme. Der Enzymweltmarkt wird auf 1,5 Mrd US$ (1998) geschätzt (Beilen und Zhi 2002). Tabelle 3.2 fasst industrielle Massenenzyme, ihre Einsatzgebiete und die wichtigsten Umweltentlastungseffekte zusammen.

Tabelle 3.1: Fallbeispiele für biotechnologische Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz in der industriellen Praxis

Sektor / Land	Pharma	Feinchemikalien	Bulk Chemikalien	Lebens- und Futtermittel	Textilien	Papier und Zellstoff	Bergbau	Energie
AU						Bleichung		
CA						Zellstoffaufhellung Zellstoffbleichung		Bioethanol
D	Riboflavin–Synthese 7-ACA-Synthese			Ölentschleimung	Bleichmittelentfernung			
J		Aminosäure-Produktion	Acrylamid-Synthese			innerbetriebl. Enzymprod.		
NL	Cephalexin-Synthese			Gemüseverarbeitung			Gipsfreie Zink-Aufarbeitung	
Südafrika							Kupfer Bioleaching	
UK		Chlorpropionat-Synthese	Acrylsäure-Synthese Polyester-Synthese					
USA			Polymer-Synthese					

Quelle: OECD 2001

Tabelle 3.2: Übersicht über kommerzielle Massenenzyme für verschiedene industrielle Einsatzgebiete

Industriezweig	Enzymtyp	Einsatzbereich	Hauptumwelteffekt
Lebensmittel	Amylasen	Stärkehydrolyse	geringere Abwasserbelastung, geringere Energiekosten
	Amyloglucosidasen	Verzuckerung	geringere Abwasserbelastung, geringere Energiekosten
	Proteasen	Verarbeitung von Fleisch Milch, Käse	bessere Rohstoffausnutzung, Einsparung von Kühl- und Lagerkosten
	Pektinasen	Klärung von Fruchtsäften	verringerter Energieverbrauch
	Pullulanasen	Verzuckerung	geringere Abwasserbelastung, geringere Energiekosten
	Cyclodextrin-glycosyltransferase	Produktion von Cyclodextrin	Produktion unter milden Reaktionsbedingungen, Verringerung von Nebenprodukten
	(Phospho)Lipasen	Modifizierung von Fetten	Substitution von Trennprozessen
	Xylanase	Viskositätsreduzierung bei Stärkeverarbeitung	Energieeinsparung, schonendere Anlagennutzung
	Glucose Isomerasen	Produktion von Fructose	geringere Abwasserbelastung, geringere Energiekosten, neue Produkteigenschaft

Fortsetzung Tabelle 3.2

Industriezweig	Enzymtyp	Einsatzbereich	Hauptumwelteffekt
	Lactase	Lactoseentfernung aus der Milch	neue Produkteigenschaft
	Pectin-methylesterase	Viskositätserhöhung bei Fruchtzubereitungen	Einsparung von chemischen Additiven
	Glucose-oxidase	Teigfestiger	Einsparung von chemischen Additiven
	Acetolactatdecarboxylase	Bierreifung	bessere Rohstoffausnutzung
	Laccase	Saftklärung	geringere Abwasserbelastung, geringere Energiekosten
	Lipoxygenase	Brotaufheller	Einsparung chemischer Additive
Futtermittel	Hemicellulasen	Verdaubarkeit von Futtermitteln	weniger Mistanfall
	Cellulasen	Steigerung des Nährwerts	bessere Rohstoffausnutzung
	Phytasen	verbesserte Phosphataufnahme	bessere Rohstoffausnutzung, geringerer Phosphatgehalt der Gülle, dadurch geringerer Eutrophierungseffekt
	Xylanase	Verdaubarkeit von Futtermitteln	weniger Mistanfall
	β-Glucanase	Verdaubarkeit von Futtermitteln	weniger Mistanfall
Pharma	Penicillinacylase	Produktion von Penicillinderivaten	Substitution eines chemischen Prozesses
	Lipasen	Produktion optisch reiner Substanzen (chirale Auftrennung), Polyester	weniger Abfall, bessere Rohstoffausnutzung

Fortsetzung Tabelle 3.2

Industriezweig	Enzymtyp	Einsatzbereich	Hauptumwelteffekt
	Proteasen	Produktion optisch reiner Substanzen (chirale Auftrennung)	weniger Abfall, bessere Rohstoffausnutzung
	Aminoacylasen	Produktion optisch reiner Substanzen (chirale Auftrennung)	weniger Abfall, bessere Rohstoffausnutzung
	Nitrilasen	Produktion von Ammoniumacrylat	Substitution eines chemischen Prozesses
	(R)-spez. Dehalogenase	Produktion von Chloropropionsäure	weniger Abfall, bessere Rohstoffausnutzung
	Nitrilhydratase	Produktion von Acrylamid	Substitution eines chemischen Prozesses
	Hydantoinase	Produktion von L-Methionin	weniger Abfall, bessere Rohstoffausnutzung
	Hydroxylase	Produktion von Niacin, Steroiden	Substitution eines chemischen Prozesses
	Amidase	Produktion von D-Phenylglycin	bessere Rohstoffausnutzung, weniger Abfall
Textil	Amylasen	Entschlichten	geringerer Energie- und Wasserverbrauch, geringere Abwasserbelastung
	Cellulasen	Stone washed Effekt, Filzfrei-Ausrüsten	keine Staubbelastung der Arbeitsluft, weniger Abfall, schonendere Anlagennutzung
	Pectinasen	Entfernen von Faserbegleitstoffen	geringerer Energieverbrauch, geringere Abwasserbelastung

Fortsetzung Tabelle 3.2

Industriezweig	Enzymtyp	Einsatzbereich	Hauptumwelteffekt
	Proteasen	Entbasten von Seide	geringere Abwasserbelastung, Einsparung von Seifen und Laugen
	Laccasen	Bleichen	geringerer Energieverbrauch, geringere Abwasserbelastung
	Catalasen	Entfernen von Bleichmitteln	geringere Abwasserbelastung, Spülwas-sereinsparung
	Peroxidasen	Entfernung überschüssiger Farbe	geringere Abwasserbelastung, Spülwas-sereinsparung
Papier- und Zellstoff	Hemicellulasen	Erzielung einer verbesserte Bleichbarkeit des Zellstoffs	geringere Abwasserbelastung, Chemika-lieneinsparung
	Cellulasen	Papierherstellung	Energieeinsparung
	Lipasen	Entfernung von Begleitstoffen	geringere Abwasserbelastung
	Cellulasen/Hemicellulasen	Deinking von Altpapier	geringere Abwasserbelastung
	Laccasen	Bleichen	geringere Abwasserbelastung
	Proteasen	Entfernung von Biofilmen	geringere Abwasserbelastung
	Amylasen	Stärkebeschichtung, Deinking von Alt-papier	geringere Abwasserbelastung
	Xylanase	Bleichungsverstärker	geringere Abwasserbelastung

Quelle: Sorup et al 1998, Schmid et al. 2002, Kirk et al 2002, Huisman and Gray 2002

3.2 Chemische und pharmazeutische Industrie

In der chemischen und pharmazeutischen Industrie kommen drei biotechnische Verfahrenstypen bei der industriellen Synthese von Substanzen zum Einsatz:

(1) Fermentative Verfahren;

(2) Biotransformation von Vorstufen mit wachsenden oder ruhenden Zellen oder isolierten Enzymen;

(3) Biosynthese von Pharmawirkstoffen mit Hilfe gentechnisch veränderter Organismen.

Eine Zusammenstellung der wichtigsten industriell eingesetzten biotechnischen Verfahren in der chemischen und pharmazeutischen Industrie gibt Tabelle 3.3.

Für die meisten wasserlöslichen und wasserunlöslichen Vitamine wurden biotechnische Produktionsverfahren entwickelt. Diese bedienen sich fermentativer Verfahren mit Bakterien, Pilzen und Algen und Biotransformationen mit isolierten Enzymen. Chemische Verfahren, die in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelt wurden, stellen jedoch immer noch eine starke Konkurrenz zur biotechnischen Herstellung dar (De Baets et al. 2000). Im Falle des Riboflavins (Vitamin B_2) wurden allerdings weltweit seit Beginn der 90er-Jahre chemische Produktionsverfahren durch biotechnische Verfahren ersetzt. Heute erfolgt die Riboflavin-Synthese bei der BASF mittels einer Hefe, Coors/ADM produziert Riboflavin mittels eines filamentösen Pilzes. 1998 erfolgte die Prozessumstellung von der chemischen zur biotechologischen Produktion bei Hoffman La-Roche. Hier wird Riboflavin mit Hilfe eines gentechnisch modifizierten *Bacillus subtilis* im Umfang von jährlich 2.000 t synthetisiert (OECD 2001). Es kann davon ausgegangen werden, dass mindestens 75 % der weltweiten Riboflavinproduktion mittels biotechnologischer Verfahren erfolgt (Bollschweiler 2002).

Somit werden biotechnische Verfahren besonders bei der Synthese von hochpreisigen Spezial- und Feinchemikalien sowie in der asymmetrischen Synthese von chiralen Substanzen eingesetzt, da biotechnische Verfahren in diesem Segment auf Grund ihrer Eigenschaften Spezifität und Selektivität komparative Vorteile gegenüber chemischen Synthesen aufweisen. Künftig wird die Bedeutung biotechnischer Verfahren noch wachsen, da das Segment der enantiomerenreinen chiralen Substanzen an Bedeutung gewinnen wird. Dies ist auf einen internationalen Trend in der Zulassungspraxis für Pharmaka und Agrochemikalien zurückzuführen, indirekt enantiomerenreine Substanzen zu begünstigen, indem die Bedingungen für die Zulassung von Racematen verschärft werden. Somit kommt Verfahren zur Racemattrennung und zur asymmetrischen Synthese wachsende Bedeutung zu, und in beiden Bereichen können biotechnische Verfahren wesentliche Beiträge leisten.

In den letzten Jahren wurden verschiedene biotechnische Produktionsprozesse im industriellen Maßstab im Bereich der Polymere erarbeitet. Diese Biopolymere werden ausgehend von einer alternativen, d. h. regenerativen statt fossilen Rohstoffbasis synthetisiert. Es sind insbesondere Polymere, die vollständig durch Mikroorganismen synthetisiert werden können sowie Polymere, deren monomere Bausteine durch Mikroorganismen synthetisiert werden und anschließend durch chemische Verfahren polymerisiert werden. Eine Kommerzialisierung der Biopolymere scheitert jedoch bislang häufig an den hohen Produktionskosten im Vergleich zu entsprechenden Kunststoffe auf petrochemischer Basis. Unter der Bezeichnung Biopol wurde von der britischen Firma ICI bzw. ihrem Nachfolger Zeneca ein Polyhydroxyalkanoat (PHA) kommerzialisiert. Durch Fermentation auf Glucose mit einer Mutante von *Ralstonia eutrophus* wurden jährlich etwa 500 – 1.000 t produziert. Inzwischen wurde das Produkt jedoch wieder vom Markt genommen.

Ein Biopolymer, für das größere Marktperspektiven zu existieren scheinen, ist Polylactat. Milchsäure, deren Weltjahresproduktionsvolumen auf 80.000 t geschätzt wird (Hofvendahl et al. 2000) wird in Form des Monomers als Säuerungsmittel, Geschmacksstoff und Konservierungsmittel vor allem in der Lebensmittelindustrie, aber auch in pharmazeutischen Industrie und Textilindustrie verwendet. Daneben dient sie als Ausgangsstoff für die Synthese von Chemikalien. Neben der Herstellung von Milchsäurestern als umweltfreundliches Lösungsmittel kann Milchsäure katalytisch zu Acetaldehyd dehydriert, mit Wasserstoff zu Propylenglycol reduziert, zu 2,3-Pentadion kondensiert und zu Pyruvat oxidiert werden (Varadarajan et al. 1999). Acrylsäure und Propylglycol sind wichtige Bausteine für Polymere. Milchsäure selbst ist Baustein für die biologisch abbaubaren Polymere Polylactid und Polymilchsäure.

Weltweit führend bei der Herstellung von PLA für den Verpackungs- und Fasermarkt dürfte das US-amerikanische Unternehmen Cargill Dow Polymers (CDP) sein. CDP ist ein 50:50 Joint Venture von Cargill Inc. mit besonderen Kompetenzen im Bereich der Verarbeitung landwirtschaftlicher Produkte und The Dow Chemical Company mit Kompetenzen in der Polymerchemie und -produktion. CDP hat einen biotechnischen Prozess zur großtechnischen Herstellung von PLA entwickelt, das unter dem Warenzeichen NatureWorks™ vermarktet wird (OECD 2001). Eine semikommerzielle Anlage mit einer Kapazität von rund 4.000 t/Jahr befindet sich in der Nähe von Minneapolis (Anonymous 1996).

In Blair, Nebraska wurde jüngst die weltweit erste großtechnische Produktionsanlage für PLA (NatureWorks™) gebaut, die 2002 in Betrieb ging. An diesem Standort ist bereits eine Maisstärkefabrik vorhanden. Im April 2002 ging eine PLA-Produktionsanlage mit einer Jahreskapazität von 140.000 Tonnen NatureWorks™ PLA in Betrieb, Ende 2002 soll eine Milchsäureproduktionsanlage mit einer anfänglichen Kapazität von 35.000 t folgen (Holbert 1997, O´Brien 2000). Rohstoffbasis für diese Anlage ist auf Grund der geringen Kosten und leichten Verfügbarkeit

Maisstärke. Aktuelle Forschungsarbeiten bei CDP zielen darauf ab, den Prozess so zu modifizieren, dass eine Vielzahl stärke- oder zuckerhaltiger Rohstoffe als Substrat dienen kann, so z. B. Weizen, Zuckerrüben oder landwirtschaftliche Abfälle (Ohman 2000). In dieser Anlage wird aus Mais zunächst Maisstärke gewonnen, diese verzuckert und daraus durch ein fermentatives Verfahren Milchsäure hergestellt. Die Milchsäure wird zu Dilactid umgesetzt und durch Vakuumdestillation gereinigt. Anschließend erfolgt die Ringöffnungspolymerisation durch einen lösungsmittelfreien Schmelzprozess (http://www.cdpoly.com).

Im Gegensatz zu den nur vereinzelt kommerzialisierbaren Biopolymeren, die durch Kombination biologischer und chemischer Prozesse sowie als intrazelluläre Produkte eine anschließende Aufreinigung aus den Produktionsstämmen erfordern, gibt es für eine Vielzahl von bakteriellen Exopolysacchariden eine gut etablierte industrielle Produktion und Kommerzialisierung. Industriell bedeutend sind Xanthan, Gellan und Curdlan, die bevorzugt wegen ihrer viskositätsregulierenden Eigenschaften, als Geliermittel, und als Filmbildner eingesetzt werden, und bakterielle Cellulose, die als Feinchemikalie wegen ihrer guten Membraneigenschaften für Wundverbände und audioakustische Membranen verwendet wird. Die Absatzmärkte für bakterielle Exopolysaccharide liegen damit in den Branchen Chemie, Pharma, Medizintechnik, Kosmetika, Lebensmittel, Erdölförderung und Erzextraktion (Sutherland 2001).

Itaconsäure (Methylenbernsteinsäure, $C_5O_4H_4$) ist eine einfach ungesättigte Dicarbonsäure, bei der eine Carboxylgruppe mit einer Methylengruppe konjugiert ist. Sie kann als ein Derivat der Acryl- und Methacrylsäure aufgefasst werden. Aus Methacrylsäure werden Polymere mit verschiedensten Eigenschaften hergestellt, die je nach Derivatisierung zwischen klebrig, gummiartig, zäh, hart und spröde variieren und in der Industrie vielfältige Anwendung finden. Es wäre demnach zu erwarten, dass man Itaconsäure und ihre Ester zu Polymeren verarbeiten kann, die denen der Polyacrylate und Polymethacrylate ähneln.

Iatconsäure weist im Vergleich zur erdölbasierten Methacrylsäure einige komparative Vorteile auf, beispielsweise die Gewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen, die einfache Handhabung auf Grund des hohen Schmelzpunkts und der geringen Neigung zur unkontrollierten Polymerisation und die geringe Toxizität.
Anwendungen von Polymeren auf Itaconsäurebasis werden vor allem in folgenden Bereichen gesehen (Willke et al. 2001):

- *Harze, Fasern*. Itaconsäure wird in geringen Mengen als Co-Monomer eingesetzt, das in Anteilen von 1-5 % den Co-Polymerisaten besondere Eigenschaften verleiht. So werden z. B. bestimmte Papiercoatings (u. a. Einsatz bei Lebensmittelverpackungen), Textilfarben auf Wasserbasis, fotografische Filme, Textilfasern, Bodenbeschichtungen von Teppichen und Auslegeware sowie Dentalzemente mit einem geringen Anteil an Itaconsäure hergestellt (Rüdiger 2000).

- *Detergenzien, Reiniger und Hilfsstoffe*.
- *Bioaktive Komponenten*. Möglich erscheint der Einsatz von Itaconsäurederivaten auch im Pflanzenschutz als wurzelwachstumsbeschleunigender Wachstumsregulator sowie auf Grund von entzündungshemmenden oder schmerzstillenden Wirkungen bestimmter Derivate im pharmakologischen Bereich (Welter 2000).

Bislang werden Itaconsäure und ihre Derivate vor allem in begrenzten Mengen für Spezialitäten verwendet. Itaconsäure kann fermenatitiv durch verschiedene filamentöse Pilze und Hefen der Gattung *Aspergillus, Ustilago, Candida und Rhodotorulla* auf Glucose als Substrat synthetisiert werden.

Das Potenzial, Polymere herzustellen, die Itaconsäure oder ihre Derivate als Hauptmonomer enthalten, scheint derzeit kommerziell nicht genutzt zu werden. Die Weltjahresproduktion von Itaconsäure beläuft sich zurzeit auf etwa 10.000-15.000 t/Jahr.

Biopolymere, die Polymere auf petrochemischer Basis substitutieren können, sind beispielsweise die Polyaminosäuren Polyglutaminsäure und Polylysin. Obwohl zumeist das chemische Produktionsverfahren dem biotechnischen unter ökonomischen Kriterien überlegen ist, konnten zumindest zwei japanische Firmen (Meiji Seika Kaisha Ltd. und Chisso Corporation) die biotechnische Produktion erfolgreich zur kommerziellen Produktion der Polyaminosäuren etablieren. In Deutschland befindet sich die unter dem Namen Baypure DS von der Bayer AG hergestellte Polyasparaginsäure als Dispergiermittel in Waschmitteln (Hüsing et al. 2002).

Die biotechnische Herstellung von 1,3-Propandiol, das als Ausgangsstoff für zahlreiche Kunststoffe Verwendung findet, wird derzeit von DuPont im Pilotmaßstab erprobt. Die Versuche werden in einer Pilotanlage der Firma Tate&Lyle in Decatur, Illinois, USA durchgeführt. Nähere Angaben zu diesem Verfahren sind jedoch in der wissenschaftlichen Literatur nicht publiziert. Erste Schätzungen beziffern die Herstellungskosten auf 1.468 US$/t 1,3-Propandiol (Grothe 2000). Die Inbetriebnahme eines kommerziellen Verfahrens im Jahr 2003 wird angestrebt.

Auch Harze, die zur Erzeugung Wasser abweisender Eigenschaften auf Papier aufgebracht werden, können mittels biotechnischer Verfahren umweltschonend produziert werden. Bei der Produktion dieser so genannten wet-strength Harze entstehen als Nebenprodukt Chlorverbindungen, welche mit Hilfe einer Biodehalogenierung durch eine Mischkultur aus *Arthrobacter histidinolovorans* und *Agrobacterium radiobacter* entfernt werden. Das Verfahren wurde von der US-amerikanischen Firma Hercules Inc. kommerzialisiert (Hartmans 2002).

Zurzeit gibt es nur sehr wenige biotechnisch herstellbare Biopolymere und Energieträger auf regenerativer Rohstoffbasis, die ein fortgeschrittenes Entwicklungs-

stadium erreicht haben. Kommerzialisiert sind Polylactide (Jahreskapazität ca. 140.000 t/Jahr ab 2002), verschiedene bakterielle Exopolysaccharide (Xanthan, Pullulan, Gellan, Curdlan, bakterielle Cellulose sowie diverse Oligosaccharide), und Itaconsäure. Im fortgeschrittenen Forschungs- bzw. Pilotstadium befinden sich Verfahren zur biotechnischen Herstellung von 1,3-Propandiol, von ausgewählten Polyhydroxyalkanoaten, Chitosan, Bernsteinsäure sowie zur enzymatischen Polymerisation von Ligninen. Alle anderen Substanzen befinden sich im Stadium der Grundlagenforschung.

Diejenigen Produkte und Verfahren, die an der Schwelle zur Kommerzialisierung stehen oder sie bereits überschritten haben, sind seit Jahrzehnten bekannt und intensiv erforscht; sie vermögen jedoch nur Markt- und Anwendungsnischen zu besetzen. Einer prinzipiell möglichen quantitativen Ausweitung steht vor allem entgegen, dass diese Biopolymere bzw. ihre Bausteine im Vergleich zu petrochemischen Alternativen über ihre Nischen hinaus keine so herausragenden spezifischen Eigenschaften aufweisen, dass dies ihren höheren Preis rechtfertigen würde. Da auch die „FuE-Pipeline“ relativ schwach gefüllt erscheint, ist nicht zu erwarten, dass in den kommenden Jahren eine größere Zahl von biotechnisch herstellbaren Polymeren bzw. Polymerbausteinen auf regenerativer Rohstoffbasis dieses fortgeschrittene Entwicklungsstadium erreichen wird. Das weltweite Produktionsvolumen der kommerzialisierten, biotechnisch herstellbaren Biopolymere auf regenerativer Rohstoffbasis liegt zurzeit in der Größenordnung von 200.000 t/a. Setzt man diese Produktionsmenge in Relation zur Weltkunststoffproduktion (ca. 150 Mio t/a) oder zur Kunststoffproduktion in Deutschland (ca. 12 Mio t/a), so ergibt sich, dass der Beitrag von Biopolymeren zur Schonung fossiler Rohstoffquellen aktuell und mittelfristig quantitativ vernachlässigbar sein dürfte.

Tabelle 3.3: Überblick über biotechnische Verfahren, die großtechnisch für die Synthese von Substanzen in der chemischen und pharmazeutischen Industrie eingesetzt werden

Produkt	Anwendungs-bereich des Produkts	Produktions-maßstab (t/Jahr)	Beschreibung des biotechnischen Verfahrens	kommer-zialisiert durch	Substitution eines chemischen Verfahrens
Aminosäuren					
L-α-Aminosäuren		ca. 100	Racemattrennung durch Acetasen, Esterasen oder Lactamasen	Recordati-De.Bi, Bayer AG, Snam Progretti, Chirotech	teilweise
L-Glutaminsäure	Geschmacksverstärker	ca. 300.000	Fermentation mit *Corynebacterium glutamicum*	Ajinomoto Co.	teilweise
L-Lysin	Futtermittelzusatz	>80.000	Fermentation mit *Corynebacterium glutamicum, Brevi-bacterum lactofermentum, Brevibacterium flavum*	Ajinomoto Co. Ltd., Du Pont, Eurolysin SA, Kyowa Hakko Kogyo, Toray, Toyo Rayon Ind. Inc.	teilweise
L-Threonin		einige 1.000	Fermenation mit ganzen Zellen	Degussa	
L-Carnitin	Nahrungs- und Futter-mittelzusatz	ca. 10.000	Reduktion von γ-Chloracetoacetatester zu (R)-γ-chlor-β-hydroxybutanoat durch eine β-Ketoreduktase aus *Saccharomyces cerevisiae* bzw. durch eine Mutante HK-1349 mit 4 Enzymen	R-Carnitin: Lon-za , Sigma Tau, L-Carnitin: Lonza	ja

Fortsetzung Tabelle 3.3

Produkt	Anwendungs-bereich des Produkts	Produktions-maßstab (t/Jahr)	Beschreibung des biotechnischen Verfahrens	kommer-zialisiert durch	Substitution eines chemischen Verfahrens
Aminosäuren					
L-Aspartat		400 6.000	Umwandlung achiraler Vorstufen durch eine Aspartat-Ammoniak-Lyase (Aspartase) aus *E. coli*, immobilisiert in Carrageenan im packed bed reactor	Tanabe Seiyaku, Kyowa Hakko Kogyo	teilweise
L-Alanin		<500	Aspartat-4-Decarboxylase aus *Pseudomonas dacunhae*	Tanabe Seiyaku Co., Degussa	teilweise
L-Methionin		<250	Racemattrennung durch eine Aminoacylase aus *Aspergillus oryzae*	Tanabe Seiyaku Co., Degussa	teilweise
L-Phenylalanin		kommerzialisiert 1984/85, Hunderte von Tonnen, aber Prozess wird nicht mehr betrieben	Lyase-katalysierte Umsetzung von trans-cinnamic acid durch eine Phenylalanin-Ammoniak-Lyase aus *Rhodotorula rubra*	Genex	teilweise
L-*tert*-Leucin	Pharma	einige 10 kg/d	reduktive Aminierung von Trimethylpyruvat zu L-*tert*-Leucin durch eine Leucindehydrogenase aus *Bacillus sphaericus*; Prozess im Enzym-Membran-Reaktor mit Cofaktor-Regenerierung!	Degussa in Kooperation mit KFA Jülich	teilweise
Citrullin		einige kg	L-Arginin-Iminohydrolase aus *Pseudomonas putida*		
Pharmazeutika					
6-Aminopenicillansäure (6-APA)	Antibiotika	10.000	Hydrolyse von Benzylpenicillin durch eine Penicillin-Amidohydrolase/Penicillinamidase aus *E. coli, Bacillus megaterium* oder *Bovista plumbea*	Smith Kline Beecham, Tanabe Seiyaku Co., Ltd.	ja

Fortsetzung Tabelle 3.3

Produkt	Anwendungs-bereich des Produkts	Produktions-maßstab (t/Jahr)	Beschreibung des biotechnischen Verfahrens	kommer-zialisiert durch	Substitution eines chemischen Verfahrens
Pharmazeutika					
7-Amino-Cephalosporan säure (7-ACS)	Antibiotika	>1.000	Hydrolytische Abspaltung der Seitenkette aus Cephalosporin C durch eine D-Aminosäureoxidase und eine Glutarylamidase	Chemferm Hoechst AG, Asahi Chemical Ind. Co., Ltd., Eli Lilly, Toyo Jyozo	ja
L-Dopa		200	C-C-Verknüpfung von Pyruvat, Catechol und NH_4^+ durch eine Tyrosin-Phenol-Lyase aus *Erwinia herbicola*	Ajinomoto Co., Ltd.	teilweise
(R)-1-hydroxy-1-phenylpropan-2-one	Vorstufe für (1R, 2S)-Ephedrin	einige 100	C-C-Verknüpfung durch eine Pyruvatdecarboxylase aus *Zymomonas mobilis* zur Herstellung einer Vorstufe für (1R, 2S)-Ephedrin		teilweise
D-p-Phenylglycin	Bestandteil semisynthetischer Antibiotika	einige t	Racemattrennung durch selektive Hydantoin-Hydrolyse	Kaneka Singapore Pte. Ltd., Snam Progretti, Ajinomoto Co., Ltd.	teilweise
3-hydroxyisobutyric acid (D-ß-hydroxy-isobutyric acid)	Vorstufe für Captopril-Synthese	einige t	Acyl-CoA-dehydrogenase, Enoyl-CoA-hydratase aus *Candida rugosa*	Kaneka, Squibb	teilweise
Androsten-dion (AD), Androsta-die-dion (ADD)	Steroidsynthese	einige t	ausgehend von Sterinen mikrobiologischer Seitenkettenabbau zur Synthese von Schlüsselverbindungen in der Steroidsynthese	Schering AG	ja

Fortsetzung Tabelle 3.3

Produkt	Anwendungs-bereich des Produkts	Produktions-maßstab (t/Jahr)	Beschreibung des biotechnischen Verfahrens	kommer-zialisiert durch	Substitution eines chemischen Verfahrens
Pharmazeutika					
Ultralan, Hydrocortison	Steroidsynthese	einige t	Stereospezifische Hydroxylierungen (z. B. 11β-Hydro-xylierung) am Steroidgerüst durch ganze Mikroorga-nismen	Schering AG	ja
Lebensmittel, Kosmetika					
Glucose	Süßungsmittel	>20 Mio	Stärkehydrolyse durch Amyloglucosidase		ja
Fructose, high fructose syrup	Süßungsmittel	8 Mio 3 Mio	Isomerisierung von Glucose durch Glu-cose(xyl)isomerase	Nagase Biochemicals Co., Ltd., Novo Nordisk, Tanabe Seiyaku Co., Ltd.	ja
L-Sorbose	Vorstufe der Vitamin-C-Herstellung	50.000	Oxidation von D-Sorbitol zu L-Sorbose durch Sorbit-Dehydrogenase aus *Acetobacter suboxydans* zur Her-stellung einer Vitamin-C-Vorstufe	alle Vitamin C-Hersteller, Hoffmann-La Roche AG	ja
Riboflavin	Vitamin	2.000 – 4.000	Fermentation mit gentechnisch verändertem *Bacillus subtilis* auf Glucose	Hoffman La-Roche, BASF, Coor/ADM	ja
Aspartam	Süßstoff	2.000	Verknüpfung von Phenylalaninmethylester mit Aspartat durch die Metalloproteinase Thermolysin	Holland Sweete-ner Company, Searle, Ajinomoto Co., Ltd., Monsanto	teilweise

Fortsetzung Tabelle 3.3

Produkt	Anwendungs-bereich des Produkts	Produktions-maßstab (t/Jahr)	Beschreibung des biotechnischen Verfahrens	kommer-zialisiert durch	Substitution eines chemischen Verfahrens
Lebensmittel, Kosmetika					
L-Malat	Lebensmittelzusatz	500	Umwandlung von Fumarat durch eine Fumarase aus *Brevibacterium ammoniagenes*, seit 1974 kontinuierlicher Prozess mit immobilisierten Zellen	Tanabe Seyaku Co., Ltd.	teilweise
Isopropyl-Myristat	Kosmetika, Körperpflegeprodukte	einige 100	Einsatz einer Lipase aus *Candida spec.*	Unichema, Unilever	teilweise
Agrochemikalien					
(S)-2-Chlorpropionat	Agrochemikalien	2.000	3 verschiedene Verfahren: 1. Racemattrennung durch selektive Umsetzung des R-Chlorpropionats zu Milchsäure durch eine 2-Halosäure-Dehalogenase aus *Pseudomonas putida*; 2. Racemattrennung durch selektive Veresterung des S-Isomers mit Butanol; 3. Synthese ausgehend von reiner R-Milchsäure, die durch Fermentation von Sucrose zugänglich ist	Zeneca, Genex Chemie Linz (Lizenz des MIT)	ja
(R).-Isobutyl Lactat	Agrochemikalien (Vorstufe zu (S)-Chlorpropionat)	einige 100	Fermentation mit nicht weiter spezifizierten Mikroorganismen	BASF	
Nicotinamid			Nitrilhydratase aus *Rhodococcus rhodochrous*	Lonza	teilweise
(R)-2-(4-hydroxyphenoxy) propionsäure (HPOPS)	Zwischenprodukt bei der Synthese enantiomerenreiner Herbizide vom Aryloxyphenoxypropionat-Typ		Hydroxylierung von (R)-2-phenoxypropionsäure (POPS) durch den Pilz *Beauveria bassiana* zu (R)-2-(4-hydroxyphenoxy)propionsäure oder mittels isolierter Oxidase	BASF	diese Stufe ja

Fortsetzung Tabelle 3.3

Produkt	Anwendungs-bereich des Produkts	Produktions-maßstab (t/Jahr)	Beschreibung des biotechnischen Verfahrens	kommer-zialisiert durch	Substitution eines chemischen Verfahrens
Agrochemikalien					
Acetyl-S-allethrolone	Baustein eines Py-rethroids		Einsatz einer Lipase zur Herstellung einer Vorstufe der Pyrethroidsynthese	Hoechst AG, Roussel Uclaf	
Polymere und Ausgangsstoffe von Polymeren					
Polyhydroxyalkanoat	Polymer zur Herstel-lung von Verpackun-gen, Flaschen, Le-bensmittelschalen, Motorenöl	500-1.000	Fermentation im zweistufigen Fed-Batch-Verfahren auf Glucose mit *Ralstonia eutropha*	ICI/Zeneca	
Milchsäure	Monomer als Säue-rungs- und Konservie-rungsmittel, als Aus-gangssubstanz zur Herstellung von Pro-pylenglycol und Acetaldehyd, für Polymer Polylac-tat	80.000 140.000	Fermentative Milchsäuregewinnung durch eine Deha-logenase-katalysierte Reaktion mit *Pseudomonas putida* chemische Umsetzung des Monomer zu PLA	Zeneca Life Science Molecu-les Cragill Dow Po-lymers	

Fortsetzung Tabelle 3.3

Produkt	Anwendungs-bereich des Produkts	Produktions-maßstab (t/Jahr)	Beschreibung des biotechnischen Verfahrens	kommer-zialisiert durch	Substitution eines chemischen Verfahrens
Polymere und Ausgangsstoffe von Polymeren					
Xanthan	viskositätsregulie-rende Eigenschaften	20.000	Fermentation auf Glucose oder Saccharose auf *Xanthomonas campestris*	Rhodia S.A., CarboMer Inc., CP Kelco ApS, ArcherDaniels Midland Com-pany, UD Chemie GmbH	
Pullulan	Folien für Lebens-mittel	10.000	Fermentation im Rührtankfermenter bzw. 2-stufiger Feremtation mit *Aureobasidium pullulans*	Hayashibara C. Ltd.	
Alginat	Verdickungsmittel, Verkapselungs-material	30.000	kommerziell derzeit nur Isolierung aus Braunalgenbio-masse	Danisco, Kimitsu and Kibun Ce-mifa, TCM Cor-poration, Systems Bio-Industry, The NutraSweet Kelco Company	
Iatconsäure	Harze, Fasern, Deter-genzien, Reiniger, Bioactive Kompo-nenten (z. B. Pflan-zenschutz)	10.000 – 15.000	Fermenation auf Glucse mit filamentösen Pilzen und Hefen der Gattungen *Aspergillus, Ustilago, Candida* und *Rhodotorula*.	Pfizer Food Science, Car-gill/Cultor Food Science, Rhodia, Tianli Biological Fermentation Company	

Fortsetzung Tabelle 3.3

Produkt	Anwendungs-bereich des Produkts	Produktions-maßstab (t/Jahr)	Beschreibung des biotechnischen Verfahrens	kommer-zialisiert durch	Substitution eines chemischen Verfahrens
Sonstige					
Acrylamid	Herstellung synthetischer Fasern, Flockulierungsmittel	30.000	Hydrolyse von Acrylnitril durch eine Nitrilhydratase aus *Pseudomonas chlororaphis* bzw. *Rhodococcus sp.*	Nitto Chemical Ind. Co., Ltd., Mitsubishi Rayon	ja
Niacinamid		über 3.000	Biotransformation durch immobilsierte Zellen oder durch isolierte Nitrilhydratase	Lonza	ja
chriale Amine		einige 1.000 t	enantiospezifische Acylierung sekundärer Amine durch Lipasen	BASF	
(R)-Mandelat		einige t	Racemisierung von Cyanohydrin durch eine Nitrilase		
D-4-Hydroxyphenylglycin		<10.000	Racemattrennung (mit Racemisierung) durch eine Hydantoinase aus *Bacillus brevis*	DSM Adeno, Kaneka, Ajinomoto Co., Ltd. Doretil, Recordati, Snam Progretti S.p. a.	teilweise
β-Cyclodextrin		ca. 1.000	Glycosyltransfer durch eine Cyclodextrin-Glycosyltransferase aus *E. coli* K12 oder *Bacillus subtilis*	Wacker Chemie GmbH, Mercian Co., Novo Nordisk	nein
(R)-Phenylacetylcarbinol		300 – 500	C-C-Verknüpfung durch eine Pyruvatdecarboxylase aus *Saccharomyces spec*. von Benzaldehyd und Acetaldehyd	Malladi, Knoll	ja

Fortsetzung Tabelle 3.3

Produkt	Anwendungs-bereich des Produkts	Produktions-maßstab (t/Jahr)	Beschreibung des biotechnischen Verfahrens	kommer-zialisiert durch	Substitution eines chemischen Verfahrens
Sonstige					
3,3,3-trifluoro-1,2-epoxy-pro-pan		<10	Umsetzung von 3,3,3-trifluoro-1,2-propene durch eine ψ-Hydrolase aus *Pseudomonas spec.* oder *Nocardia spec.*	Nippon-Mining	teilweise
(S)-2,3-epoxy propanol		einige t	Lipase aus Schweinepankreas	DSM Andeno, Lonza	
enantioreine Alkohole		einige 100 t	enantiospezifische Acylierung durch Lipasen	BASF	
NAD, NADP, ATP	Diagnostika	einige t	Biokonversion mit Hefen	Boehringer Mannheim GmbH	nein
D-Glycerin-3-Phosphat	Diagnostika	einige kg	Glycerinkinase		
Glucose-6-Phosphat	Diagnostika	einige kg	Hexokinase aus *Saccharomyces cerevisiae*	Unitika	
(R)-Cyanhydrin		einige kg	Umsetzung von Aldehyden und HCN durch eine (R)-oxynitrilase aus *Prunus amygdalus* (Bittermandel)	Solvay Duphar	
Urocansäure			Elimination von Ammoniak aus L-Histidin durch L-Histidin-Ammoniak-Lyase aus *Achromobacter liqui-dum* in einem batch-Prozess mit hitzebehandelten Zel-len	Tanabe Seiyaku Co., Ltd.	

Quelle: Hüsing et al. 1998, Liese et al. 2000, Hüsing et al. 2002, Schmid 2002

3.2 Lebensmittelindustrie

Da sich die Ursprünge der Biotechnologie in der Lebensmittel- und Getränkeherstellung finden, sind biotechnische Ansätze in diesem Industriezweig traditionell weit verbreitet. Diese Verfahren finden sich in der Prozessierung von Stärke, in der Milchverarbeitung, der Getränkeherstellung (Alkohol, Bier, Wein, Frucht- und Gemüsesäfte), der Fleisch- und Proteinverarbeitung sowie bei der Öl- und Fettherstellung. Im Überlappungsbereich zur chemischen Industrie liegt die Synthese von Farb-, Aroma-, Geschmacksstoffen, Vitaminen und Aminosäuren als Nahrungsmittelzusätze. In diesem Bereich ist eine strenge Zuordnung zu einer der beiden Branchen nicht möglich. Diese Substanzen werden sowohl in der Lebensmittelindustrie selbst als auch von der chemischen Industrie erzeugt. Aufgrund der Vielfalt ist eine Auflistung aller Verfahren nicht möglich. Die eingesetzten Verfahren lassen sich den folgenden Prozesstypen zuordnen

(1) Lebensmittelprozessierung mit Hilfe isolierter Enzyme (z. B. Stärkemodifikation und Stärkeverzuckerung mit Amylasen, Glucoamylasen, Pullulanasen, Glucoseisomerasen);

(2) fermentative Verfahren (z. B. Herstellung von Aminosäuren, Aromastoffen z. B. Vanillin (Rabenhorst 2002).

Daneben gibt es Beispiele, bei denen traditionellen biotechnische Verfahren durch Neuerungen der modernen biotechnologischen Forschung optimiert werden und dadurch beispielsweise die Prozesszeiten verkürzt werden. Beispielhaft dafür ist die Bierproduktion mittels immobilisierter Hefe (Immocon-Prozess) (Ranta und Pajunen 2002). Dieser Prozess wurde unter dem Aspekt der Ressourcenschonung von der Brauerei Synebrychoff, Finnland entwickelt. Das Verfahren erlaubt die Reduktion der Prozesszeiten sowie des Reifungs- und Fermentationsvolumens. Weitere umweltentlastende Effekte sind die Reduktion der benötigten Fläche um 85 % und die Reduktion des Verbrauchs von Filtermaterial um 30 %. Insgesamt kommen die Autoren zum Ergebnis, dass die jährlichen Betriebskosten der Anlage im Vergleich zur konventionellen Bierproduktion um 153.000 € verringert werden konnten.

Ein neuer Zweig innerhalb der Lebensmittelindustrie entstand in den vergangenen Jahren im Sektor der Biopolymere. Einerseits wurden Verfahren entwickelt, Oligosaccharide mittels fermentativer Verfahren als kalorienarme Süßstoffe und Bestandteile funktioneller Lebensmittel zu produzieren (Hüsing et al. 2002), andererseits gelangen Durchbrüche bei der Weiterverwendung von Reststoffen der Lebensmittelindustrie zu Wertstoffen, wie es das Beispiel der Milchsäureproduktion verdeutlicht. Milchsäure, deren Weltjahresproduktionsvolumen auf 80.000 t geschätzt wird (Hofvendahl et al. 2000) wird als Monomer als Säuerungsmittel, Geschmacksstoff und Konservierungsmittel in der Lebensmittelindustrie verwendet.
Tabelle 3.4 führt die wichtigsten Wirkprinzipien biotechnologischer Verfahren und die damit verbundenen Umweltentlastungseffekte in der Lebensmittelindustrie auf.

Tabelle 3.4: Übersicht über biotechnische Verfahren in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie und die damit verbundenen Umweltentlastungseffekte

Teilbereich	Wirkprinzip bzw. Prozess/Ziel des Enzymeinsatzes	eingesetzte Enzyme	Umweltentlastungseffekt
Stärkeindustrie	Stärkemodifikation und -verarbeitung zu Dextrinen, Glucose, Maltose, Fructosesirups; Stärkeverzuckerung, -verflüssigung und -verarbeitung	Amylasen, Glucoamylasen, Pullulanasen, Glucose-Isomerase	Substitution von Säure durch wässrige Lösungen, dadurch geringere Abwasserbelastung; geringere Energiekosten; Anlagenteile aus weniger korrosionsbeständigem Material; Geringere Farbbildung; dadurch Verminderung/Vermeidung des Schwefeldioxid-Einsatzes zur Entfärbung; Höhere Abbaugrade der Stärke und höhere Produktausbeuten; Geringere Bildung von Reversionsprodukten; Erheblich geringerer Aufwand bei der Sirupaufreinigung (Raffination).
Milchverarbeitung	Käseherstellung	Lab, Chymosin	
	Beschleunigung der Käsereifung, Produktion von Geschmacksstoffen	Proteinasen, Peptidasen, Lipasen	Verringerung des Raumbedarfs temperierter Räume, dadurch auch Energieeinsparung
	Verhinderung von Fehlgärungen	Lysozym	Verringerung des Ressourcenverbrauchs, Verringerung der Fehlproduktionen und Rücklieferungen
	Erhöhung der Prozesssicherheit und -stabilität	Einsatz definierter Starterkulturen	
	Herstellung lactosereduzierter Milch	Lactase	

Fortsetzung Tabelle 3.4

Teilbereich	Wirkprinzip bzw. Prozess/Ziel des Enzymeinsatzes	eingesetzte Enzyme	Umweltentlastungseffekt
	Gewinnung von Milchsäure aus Molke	Milchsäurebakterien	verbesserte Rohstoffausnutzung; Verringerung der Abfallströme; weitgehende Reinigung des Molkereiabwassers.
Alkohol-, Bier- und Weinherstellung	Steigerung der Vergärbarkeit, Verkürzung/Effizienzsteigerung des Mälzprozesses	Amylasen	bessere Rohstoffausnutzung durch Einsparung von Braumalz; Energieeinsparung durch Verkürzung des Malzprozesses.
	Abbau von Trübstoffen, Verbesserung der Filtrierbarkeit	Glucanasen	bessere Rohstoffausnutzung durch erhöhte Ausbeute; Verringerung der Abfallmengen; verringerter Energieverbrauch z. B. beim Pumpen/Rühren, beim Pressen; Verlängerung der Filterstandzeiten.
	Erhöhung der Saftausbeute	pektolytische Enzyme β-Glucanasen	bessere Rohstoffausnutzung durch erhöhte Ausbeute; Verringerung der Abfälle.
	Stickstoffsteuerung, Kältestabilisierung	Proteasen	Bessere Rohstoffausnutzung durch verbesserten Maischeaufschluss
Obst- und Gemüseverarbeitung, Saftherstellung	schonende Mazerierung, Erhöhung der Saftausbeute, Effizienzsteigerung beim Pressen, Verbesserung der Filtrierbarkeit	Pektinasen, Cellulasen	verringerter Energieverbrauch z. B. beim Pumpen/Rühren, beim Pressen; Verlängerung der Filterstandzeiten
Backwarenherstellung	Verbesserung der verfahrenstechnischen Eigenschaften der Teige/Mehle	Proteasen, Amylasen, Pentosanase, Glucosidase	verringerter Energieverbrauch z. B. beim Ausbacken

Fortsetzung Tabelle 3.4

Teilbereich	Wirkprinzip bzw. Prozess/Ziel des Enzymeinsatzes	eingesetzte Enzyme	Umweltentlastungseffekt
	Einsatz von Enzymen zur Verringerung der Waffelteigviskosität Erhöhung der Gebäckhaltbarkeit Verbesserung der Backeigenschaften der Mehle/Teige		
Synthesen von Farb-, Aroma-, Geschmacksstoffen und Vitaminen	Substitution von chemischen Synthesen durch Biosynthesen		Produktion unter milderen Reaktionsbedingungen; Verringerung der Nebenprodukte.
Fleischverarbeitung	Fleischzartmachung	Proteasen, Peptidasen	Beschleunigung des Reifungsprozesses; Einsparung von Kühl- und Lagerkosten; Verminderung des Verderbrisikos durch schnelleren Warenumschlag.
Proteinverarbeitung	Gelatineproduktion aus Häuten und Knochen	Proteasen	Substitution von Säure durch wässrige Lösungen, dadurch geringere Abwasserbelastung.
Öl/Fettherstellung	enzymatische Entschleimung von Pflanzenölen enzymatische Modifikation von Fetten zur Gewinnung von Mono- und Diglyceriden	Lipasen, Phospholipasen	Substitution von Trennprozessen durch selektive Umsetzung (einzelne Trennprozesse können entfallen).

Quelle: Hüsing et al. 1997

3.4 Papier- und Zellstoffindustrie

Weltweit nimmt das Interesse an der Anwendung biotechnischer Verfahren in allen Verfahrensbereichen der Papier- und Zellstoffindustrie zu, beginnend beim Faserrohstoff Holz über die Zellstoff- und Holzstofftechnik sowie Altpapieraufbereitung bis hin zur Papiererzeugung, Papierveredlung und Papierverarbeitung. In der Regel werden Kombinationen aus biotechnischen, chemischen und physikalischen Verfahren favorisiert. Nach einer Analyse des Joint Research Centers der Europäischen Kommission wurden aus der Gesamtheit aller biotechnischen Prozesse des produktionsintegrierten Umweltschutzes in der Papier- und Zellstoffindustrie archetypische Prozesse identifiziert. Diese sind u. a. das enzymatische Bleichen von Zellstoff mit Xylanase und der enzymatische Zellstoffaufschluss. Für beide Prozesse trifft zu, dass sie bereits einen gewissen Durchdringungsgrad in der industriellen Anwendung erreicht haben bzw. ihr Potenzial für die industrielle Kommerzialisierung als sehr hoch eingeschätzt wird (Bhat 2000), da bei ihnen die Einsparungspotenziale gleich oder sogar höher als die Investitions- und Betriebskosten sind und dadurch die Prozesse mit einem Nettogewinn verknüpft sind (Vigsoe et al. 2002).

Daneben gibt es eine Fülle von biotechnischen Verfahren in der Papier- und Zellstoffindustrie, die bereits in einzelnen Unternehmen erprobt wurden, oder im Technikumsmaßstab ihre Anwendungsnähe bzw. –reife bewiesen haben.

- *Biopulping*. Unter Biopulping versteht man die Bebrütung von Holzhackschnitzeln mit Weißfäulepilzen. Biopulping erleichtert den mechanischen Holzaufschluss, entfernt beim Kochen das Lignin schneller und ermöglicht eine deutliche Energieeinsparung. In Amerika wurde ein Biopulping-Verfahren im 50-t-Maßstab erfolgreich durchgeführt, in Österreich wurde das Verfahren bis zum Technikumsmaßstab entwickelt. Nach Übernahme der österreichischen Firma KNP Leykam Gratkorn GmbH durch den südafrikanischen Papier- und Zellstoffkonzern Sappi Ltd. im Jahr 1998 wurden die weiteren Entwicklungen eingestellt. In Europa müsste die Industrie eine amerikanische Lizenz des Biopulping Consortiums erwerben, um das Verfahren in die Praxis zu übernehmen. Aus diesem Grund wurde das Verfahren bislang in Europa noch nicht in die industrielle Praxis eingeführt (OECD 2001).
- *Energieeinsparung bei der mechanischen Zellstofferzeugung durch Cellulasen.* Die mechanische Zellstofferzeugung wird bisweilen kombiniert mit einer enzymatischen Vorbehandlung durch Cellulasen. Dadurch kann der benötigte Energieeintrag reduziert und die Faserqualität verbessert werden (Bhat 2000)
- *Biobleaching (Biobleiche).* Biobleichen mit Lignin-abbauenden Enzymen werden nur bei wenigen Kraft-Anlagen älterer Bauart eingesetzt. Zur Bleichung von alkalisch hergestellten Zellstoffen werden Xylanasen weltweit in ca. 20 Zellstoffwerken eingesetzt. In Deutschland wird davon kein Gebrauch gemacht, da bei Sulfitzellstoffen erwartungsgemäß keine Wirkung von Hemicellu-

lasen nachzuweisen ist. Ein für die Biobleiche interessantes Enzym ist die Laccase, die in Gegenwart von Cosubstraten, so genannten Mediatoren, Lignin oxidativ abbauen kann. Das Laccase-Mediator-System ist für die Zellstoffindustrie für die Delignifizierung oder zur Bleiche in größerem Maßstab interessant geworden, seit neue, biologisch abbaubare Mediatoren eine verbesserte und kostengünstigere Verfahrenstechnik versprechen. Das Laccase-Mediator-System wurde vom Consortium für elektrochemische Industrie, einer 100 %igen Tochter der Wacker-Chemie, in einer Pilotanlage erfolgreich erprobt (Amann 2001).

- *Enzymatische Entfernung von Störstoffen der Papiererzeugung (Pitch).* Unter Pitch werden Störstoffe der Papiererzeugung wie Lipide (Mono-, Di-, Triglyceride, Wachse), Harze, freie Fettsäuren und unverseifbare Bestandteile (Sterole) zusammengefasst. Kommerzialisiert und großtechnisch eingesetzt wird ein Verfahren der Firma Nippon Paper Industries in Japan, in dem mit einer Lipase, die aus dem Pilz *Candida rugosa* isoliert wurde, eine bis zu 90 %ige Hydrolyse von Triglyceriden erzielt werden kann (Jaeger und Reetz 1998).
- *Enzymatische Altpapierstoffaufbereitung und -modifizierung.* Zwei Ansätze werden dabei verfolgt: die enzymatisch herbeigeführte Verbesserung der Entwässerungseigenschaften und das enzymunterstützte Deinking. Zum enzymatischen Deinken werden Cellulasen, Hemicellulasen, Pektinasen, Ligninasen, Amylasen und Lipasen eingesetzt. Verschiedene Unternehmen in den USA und Niederlanden bieten bereits Technologien und Enzyme für das enzymatische Deinken an. Pilotstudien z. B. an der University of Georgia unter Beteilung der US-amerikanischen Firma Enzymatic Deinking Companies und ein EU-Kooperationsprojekt zwischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen haben die industrielle Einsetzbarkeit sowie die ökonomischen und ökologischen Potenziale des enzymatischen Deinkens demonstriert. Aus diesem Grund wird die Kommerzialisierung des enzymatischen Deinkens für die nahe Zukunft erwartet (Bath 2000).

Somit gibt es in der Papier- und Zellstoffindustrie mehrere praxisreife bzw. praxisnahe biotechnische Verfahren, die zur Verringerung von Umweltbelastungen beitragen können. Die Analyse der Entwicklungs- und Publikationszeiten zeigt jedoch, dass die meisten bereits Mitte der 1990er-Jahre entwickelt wurden. Sie müssten in der Industrie weitere Verbreitung finden, um ihr Umweltentlastungspotenzial voll nutzen zu können.

Gegenstand längerfristiger Forschungsaktivitäten in der Papier- und Zellstoffindustrie ist die Pflanzenoptimierung durch Gentechnik in Bezug auf ihre Cellulose- und Ligninzusammensetzung. Dabei wurden durch gezielte Hemmung (Downregulation des am Lignin-Stoffwechsel beteiligten Enzyms Hydroxy-Cinnamat-CoA Ligase (4CL) der Ligningehalt der Zitterpappel um 45 % reduziert bei gleichzeitiger Zunahme des Cellulosegehalts um 15 % und einem erhöhten Wachstum der transgenen Bäume (Hu et al. 1999). Diese Bäume könnten die jeweilige Auf- und Weiterverarbeitung des Holzes kostengünstiger und umweltverträglicher machen oder würden somit eine Maßnahme des produktionsintegrierten Umweltschutzes dar-

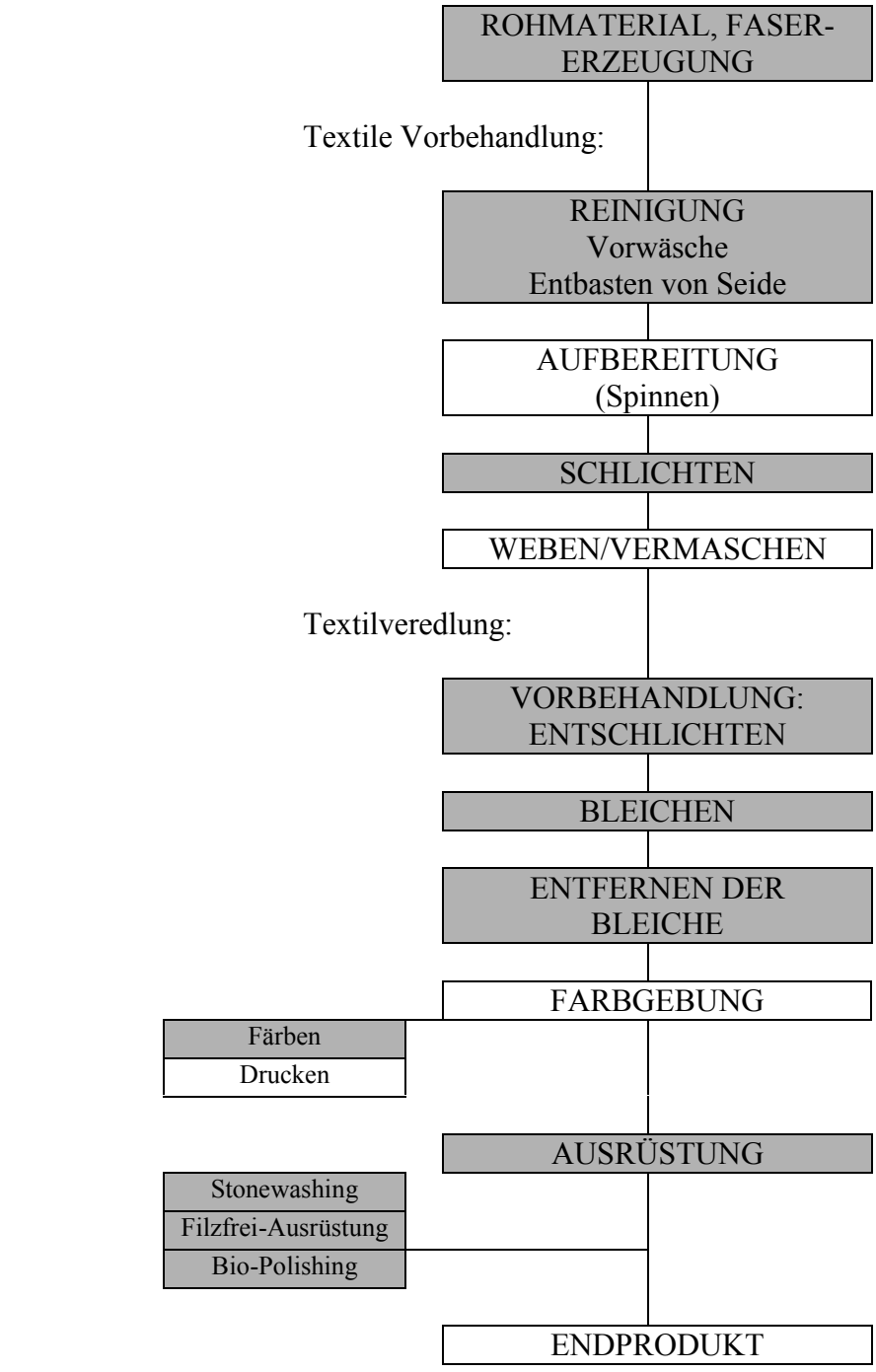
stellen (Fladung 2000). Die kommerzielle Nutzung transgener Gehölze steht jedoch noch am Anfang, da wichtige methodische Fragen noch nicht geklärt sind (Menrad et al. 2002).

Vor dem Hintergrund eines ressourcenschonenden Umgangs mit dem nachwachsenden Rohstoff Holz werden Forschungsarbeiten interessant, die versuchen, alternative Rohstoffquellen für die Papier- und Zellstoffindustrie zu erschließen. Diskutiert wird dabei u. a. die Verwendung von Bagasse, ein Reststoff aus der Zuckerherstellung. Die gemahlenen und ausgepressten Stängel des Zuckerrohrs bestehen zu 50 % aus Cellulose und jeweils 25 % aus Hemicellulose und Lignin. Erste Versuche zur Papierherstellung gibt es bereits, allerdings müsste die saisonal anfallende Bagasse für bis zu 8 Monate gelagert und konserviert werden (Sharma et al. 2000). Hier sowie bei der Verwertung zu Papier besteht erheblicher Forschungsbedarf bis zu einer industriellen Kommerzialisierung.

3.5 Textilindustrie

Die überwiegend nasschemische Prozesse nutzende Textilveredlungsindustrie ist eine Branche mit hohen Energie- und Stoffverbräuchen. Biotechnische Verfahren werden in der Textilherstellung erst seit wenigen Jahren eingesetzt, doch wächst ihre Bedeutung. Durch den Einsatz biotechnischer Verfahren können Wasser, Chemikalien und Energie eingespart, Prozessschritte verkürzt und einfacher steuerbar werden. Eine Fülle von Einzelverfahren wurden inzwischen für den Einsatz in der Textilindustrie entwickelt. Abbildung 3.1 fasst die möglichen Einsatzbereiche entlang der Verfahrensschritte der Textilherstellung zusammen.

Abbildung 3.1: Überblick über die aufeinander folgenden Verfahrensschritte bei der Textilherstellung (textile Kette).



In folgenden Verfahrensschritten können biotechnische Verfahren eingesetzt werden. Zum Teil sind sie bereits flächendeckend in der industriellen Praxis etabliert,

andere Verfahren sind zwar anwendungsreif, haben sich jedoch noch nicht durchsetzen können. Einzelne Verfahren befinden sich erst im Entwicklungsstadium.

- *Vorwäsche*. In der Vorwäsche werden Faserbegleitstoffe, die die späteren Veredlungsschritte stören könnten, von den Fasern entfernt. Im Entwicklungsstadium befinden sich enzymatische Verfahren zur gleichzeitigen Entfernung von Begleitsubstanzen der Baumwolle und zur Entschlichtung.
- *Entbasten von Seide*. Das enzymatische Entbasten mit Proteasen ist Stand der Technik. Dabei wird die Ware bei 55-65 °C für eine ½ - 1 h in der Enzymlösung mit alkalischen Proteasen aus *Bacillus licheniformis* leicht bewegt. Das Verfahren zeigt gegenüber dem konventionellen Verfahren in heißer Lauge eine geringere Abwasserbelastung und geringeren Energieverbrauch durch milde Reaktionsbedingungen.
- *Abkochen (scouring) von Baumwolle.* Einer der Prozesse in der Verarbeitung von Baumwolle, der am meisten Energie und Wasser verbraucht, ist das Entfernen von Faserbegleitstoffen wie Zellwandreste aus Fetten, Wachsen, Pektinen und Proteinen. Als Alternative zur Entfernung dieser Substanzen durch hohe Temperaturen und starke alkalische Bedingungen wurde ein enzymatisches Verfahren mit Pectinasen entwickelt (Tzanov et al. 2001). Die Auszeichung dieses Verfahrens mit dem United States Presidential Green Chemistry Award 2001 hatte nach Meinung von Kirk et al. (2002) eine Schrittmacher- und Signalfunktion für die Einführung weiterer enzymatischer Aufarbeitungsschritte in der Produktion von Baumwolltextilien.
- *Schlichten und Entschlichtung*. Das Schlichten, d. h. die Beschichtung der Kettfäden zur Erhöhung der Reißfestigkeit erfolgt konventionell mit Gelatine, Guar- oder Johannisbrotkernmehl, Polyvinylalkohol, Methacrylat, wasserlöslichen Cellulosederivaten, Stärkeprodukten und weiteren wasserlöslichen Polysacchariden. Bei Verwendung von wasserlöslichen Polysacchariden sind die Schlichten leichter auswaschbar und tragen damit zur Kosteneinsparung bei. Beim Entschlichten ist die Entschlichtung von Stärkeschlichten mit Amylasen Stand der Technik. Sie wird von vielen Firmen routinemäßig eingesetzt. Künftig könnte die enzymatische Entschlichtung mit einer Wertstoffgewinnung aus den hoch BOD-belasteten Abwässern gekoppelt werden.
- *Bleichen*. In der Jeansstoffveredlung wurde das konventionelle Bleichverfahren durch eine Biobleiche mit dem Laccase-Mediator-System substituiert.
- *Enzymatische Entfernung von Bleichmittelresten*. Praxisreife hat die enzymatische Entfernung von Resten des Bleichmittels H_2O_2 mit Katalasen und Peroxidasen erlangt. Inzwischen wird dieser Prozess in der industriellen Fertigung eingesetzt. Eine ökologische und ökonomische Kosten-/Nutzenanalyse wurde von Etschmann et al. 1999 durchgeführt, in dem gezeigt werden konnte, dass sich sechs bis acht Prozent der Kosten im Vergleich zum herkömmliche Verfahren

einsparen lassen. In der Entwicklung befinden sich optimierte Enzyme, die auch für den Einsatz in kontinuierlichen Prozessen geeignet sind.

- *Färben*. Um die Fixierraten von Stoffen an die Faser zu erhöhen, wird erforscht, wie die Fasern enzymatisch so modifiziert werden können, dass „Andockstellen" für Farb- oder Ausrüstungshilfsstoffe an der Faseroberfläche geschaffen werden. Außerdem kann die Farbstoffverankerung an der Faser selbst enzymatisch katalysiert werden. Entsprechende Enzyme stehen kurz von der Markteinführung. Die Substitution chemisch-synthetischer durch biosynthetisch hergestellte Farbstoffe und Pigmente ist eine weitere potenzielle Möglichkeit, beim Färben Umweltentlastungseffekte zu erzielen. Auch bei der Zusammensetzung der verwendeten Farben können Innovationen aus der Biotechnologie zu einer Umweltentlastung beitragen. So gibt es erste kommerzielle Einsätze beispielsweise bei der Firma Hubert Eing Textilveredelung GmbH: beim „eco-print"-Verfahren werden Farben aus 97 % pflanzlichen Harzen und Ölen aus nachwachsenden Rohstoffen und 3 % aus speziellen Synthesepigmenten verwendet.
- *Enzymatisches Stonewashing (Biostoning)*. Seit 1989 werden Cellulasen eingesetzt, um Bimssteine, die zur Erzielung des „Used-Look" in der Jeansmode verwendet werden, teilweise oder ganz zu ersetzen. Der Durchdringungsgrad bei der Herstellung von Denimjeansstoffen liegt bei fast 100 %. Cellulasen können auch bei anderen Wash-out-Artikeln als Jeans zum Erzielen von modischen Oberflächeneffekten angewandt werden. Eine Neuentwicklung, die bereits vereinzelt von Textilveredlern eingesetzt wird, ist ein Enzym-Mix-Präparat, welches ermöglicht, Entschlichtung und Biostoning in einem Verfahrensschritt durchzuführen.
- *Filzfrei-Ausrüsten von Wolle*. Die kontinuierliche Filzfrei-Ausrüstung von Wolle mit Proteasen wurde im großtechnischem Maßstab getestet, doch waren die Ergebnisse so unbefriedigend, dass das enzymatische Verfahren sich nicht flächendeckend durchsetzen kann. Hauptproblem ist, dass die Qualität des enzymatischen Filzfrei-Ausrüstens nicht den Kriterien des Wollsiegel-Gütezeichens entspricht und den potenziellen Anwendern dadurch Nachteile beim Absatz des Produkts entstehen. Im Labormaßstab befinden sich Versuche, das Potenzial von Lipoprotein-Lipasen für die Reduktion des Filzvermögens von Wolle auszuloten.
- *Enzymatische Strukturveränderungen von Wolle*. Stand der Technik, jedoch aus Kostengründen nur selten technisch angewendet ist der Einsatz von Proteasen zum Erzielen verschiedener Griffvariationen (z. B. kaschmirähnlicher Griff, Veredlung billiger Qualitäten).
- *Biopolishing*. Seit 1988 werden Cellulasen zur Veredlung von Baumwollgeweben und Viskose eingesetzt, um folgende Effekte zu erzielen: geringere Bildung von am Gewebe haftenden Flusenbällchen (Pillings), die das Gewebe unansehnlich und abgetragen aussehen lassen, Erzielung von Weichgriff, Glanz, Glätte und guter Oberflächenoptik. Biopolishing verbessert auch die Qualitätseigenschaften neuartiger Regeneratcellulosefasern. Der Einsatz von Cellulasen ist in

der kommerziellen Anwendung verbreitet, allerdings durch das Produktionsvolumen der Regeneratfasern begrenzt.

- *Oberflächenbeschichtung.* Als alternative Rohstoffbasis zur Beschichtung von Outdoor-Bekleidung finden vereinzelt Bienenwachskombinationen als Substitut für Fluorverbindungen Anwendung in der industriellen Produktion (Effizienz-Agentur NRW).

In der Studie des European Joint Research Centers wurden drei Prozesse in der Textilindustrie identifiziert, die das Potenzial zur Substitution von herkömmlichen Prozessen haben (Visgoe 2002). Dies sind

(1) Enzymatisches Entschlichten mit Amylase als Alternative zum Dampfkochen mit Natronlauge

(2) Enzymatische Vorwäsche zur Entfernung von Wachsen aus Baumwolle durch Pektatlyasen als Ersatz von Natronlauge und Peroxid

(3) Enzymatisches Bleichen mit Katalasen als Ersatz des Sulfitverfahren und zur Wassereinsparung

3.6 Querschnittstechnologie biotechnologische Herstellung von Energieträgern

Für die Herstellung von Energieträgern aus Biomasse kommen grundsätzlich mehrere Biomassequellen in Betracht (Claassen et al. 1999). Dies sind

- bioorganische Reststoffe aus industriellen Produktionsprozessen und Siedlungsabfällen;
- bioorganische Reststoffe aus der landwirtschaftlichen Produktion und Verarbeitung, so z. B. Stroh und Stängel;
- Energiepflanzen, die speziell für die Gewinnung von Pflanzenmaterial für die Energieerzeugung angebaut werden, so z. B. Weiden, Pappeln, *Miscanthus*, Zuckerrohr, Mais.

Biomasse kann direkt oder nach spezifischer Aufarbeitung (thermochemische, physikalisch-chemische oder biochemische Umwandlung) in Form von festen, flüssigen und gasförmigen Brennstoffen verwendet werden. Dabei unterscheidet man

- biogene Festbrennstoffe, d. h. holzartige und halmgutartige Brennstoffe (für die vorliegende Untersuchung nicht relevant);
- flüssige Brennstoffe z. B. Pflanzenöle und Pflanzenölmethylester, sowie die durch Fermentation herstellbaren Energieträger Ethanol, Aceton mit Butanol und Ethanol (ABE);
- gasförmige Energieträger, z. B. Wasserstoff, Biogas (Methan).

Die Herstellung von Energieträgern aus Abfällen des produzierenden Gewerbes stellt entsprechend der im Kapitel 2 definierten Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands einen Beitrag zur umweltschonenden Produktion dar. Entsprechende Abfälle können in jeder der oben beschriebenen Branchen anfallen, weshalb die Herstellung von Energieträgern durch biotechnologische Verfahren als Querschnittstechnologie gilt. Relevante Verfahren im Rahmen der Bestandsaufnahme sind den Methoden Fermentation und Umwandlung mit isolierten Enzymen zuzuordnen. Die biotechnische Herstellung folgender Energieträger ist bereits in der kommerziellen Nutzung bzw. steht kurz vor der Anwendung.

Ethanol. Ethanol findet Verwendung als Bestandteil alkoholischer Getränke, als Chemiegrundstoff, Lösungsmittel, Treibstoff und Treibstoffadditiv. 93 % der Weltethanolproduktion (Stand 1998: 31,2 Milliarden Liter) werden fermentativ erzeugt. Stand der Technik ist die Verwendung von Zuckern als Substrat, die aus Zuckerpflanzen extrahiert bzw. aus Stärkepflanzen hergestellt werden, die großvolumige Fermentation durch Hefen zu Ethanol und die anschließende Abtrennung des Ethanols durch Destillation. Für die Verwendung von Ethanol als Treibstoff oder Treibstoffadditiv kann die fermentative Ethanolherstellung aus Zucker oder Stärke wirtschaftlich nur dann mit petrochemischen Treibstoffen konkurrieren, wenn Subventionen in Form von Steuerbefreiungen gezahlt werden.

Obwohl die Erzeugung von Bioethanol industriell bereits weit fortgeschritten ist, werden hier verschiedene Aspekte weltweit im Hinblick auf eine wirtschaftlichere Produktion erforscht. Alle herkömmlichen industriellen Verfahren setzen Glucose oder Oligo- und Polymere der Glucose als Kohlenstoffquelle in der Fermentation ein. Forschungsanstrengungen gehen dahin, andere Kohlenstoffquellen als Substrat, insbesondere lignocellulosehaltige Biomasse einsetzbar zu machen. Dabei besteht Forschungsbedarf für fortgeschrittene Vorbehandlungstechnologien, Prozessintegration und Kostenreduktion, Identifikation und Entwicklung von Enzymen für eine kombinierte Hydrolyse und Fermentation, sowie Integration mit fortgeschrittener Technologie zur Stromerzeugung aus Ligninfraktionen. Limitierend bei kombinierten Hydrolyse- und Fermentationsverfahren sind die Enzymkosten. Forschungsanstrengungen zielen auf eine Reduktion des Enzympreises durch effizientere Produktionsstämme und eine Reduktion der erforderlichen Enzymmenge im Ethanolproduktionsprozess ab (Sanford 2002). Abbildung 3.2 verdeutlicht die prinzipiellen Schritte der Bioethanol-Produktion aus lignocellulosehaltiger Biomasse (Jaaij et al. 2002) Die zurzeit größte Demonstrationsanlage wird von dem Unternehmen Iogen im kanadischen Ottawa betrieben; sie ist auf die Verarbeitung von bis zu 40 t Biomasse/Tag zu Ethanol ausgelegt.

Aceton, Butanol, Ethanol (ABE). Durch Fermentation mit *Clostridium acetobutylicum* kann im so genannten Weizmann-Prozess Aceton, Butanol und Ethanol produziert werden. Als Nebenprodukt entsteht Wasserstoff. Die ABE-Fermentation stellte besonders in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts das zweitwichtigste Fermenta-

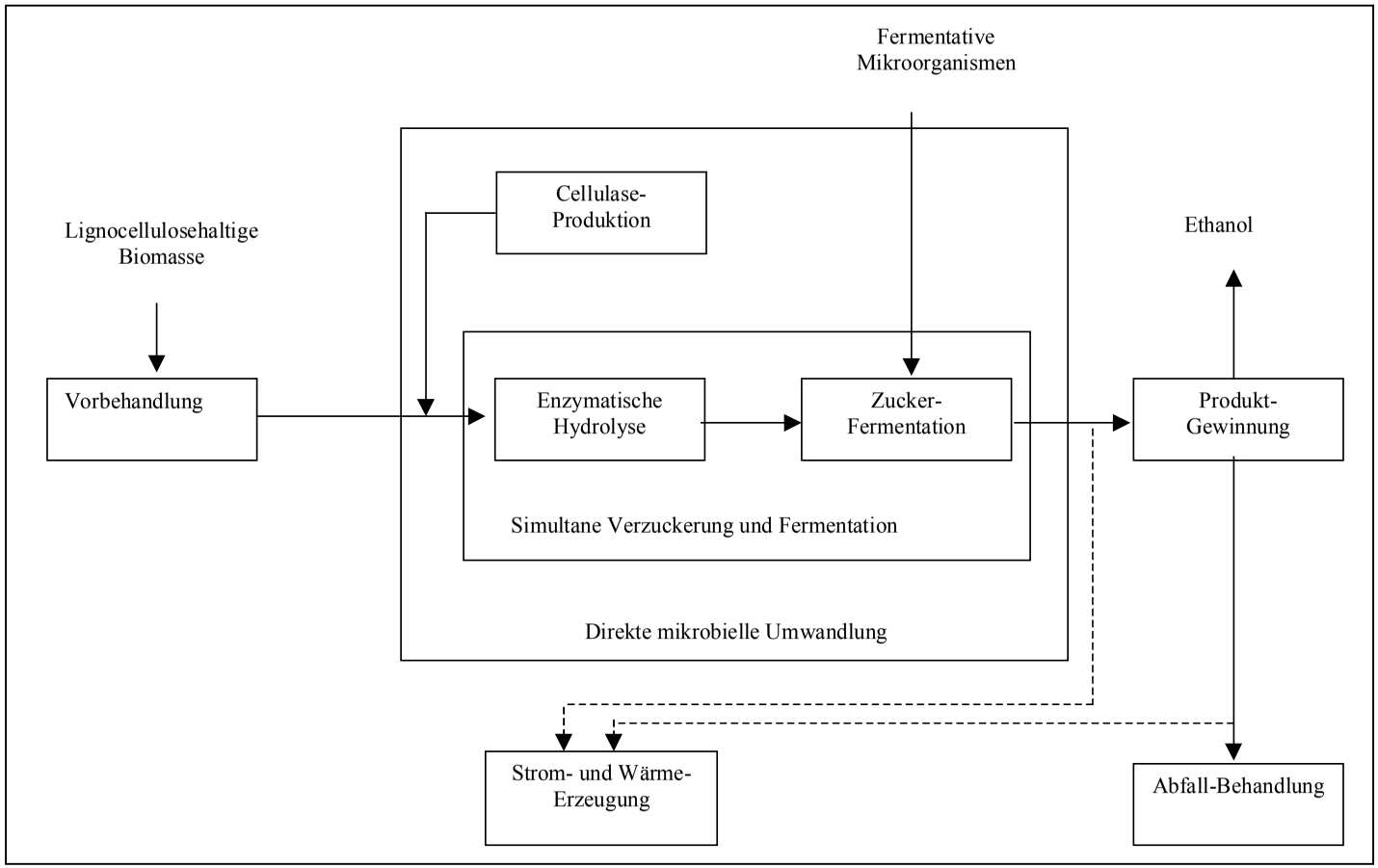
tionsverfahren nach der Ethanolproduktion dar (Dürre 1998). Auf dem Höhepunkt der Produktion hatte die größte Produktionsanlage in den USA eine Kapazität von mehr als 18 Mio Litern (96 Fermenter mit je 189.250 l). Wegen des zunehmenden Konkurrenzdrucks durch petrochemische Verfahren sank jedoch ab den 1950er-Jahren die Bedeutung der fermentativen Verfahren zur Herstellung von Aceton und Butanol rasch. Eine der letzten großen Fermentationsanlagen, eine in Südafrika betriebene Anlage mit einer Fermenterkapazität von mehr als 1 Mio l, wurde 1982 geschlossen. Heute spielt die fermentative Herstellung von Aceton und Butanol weltweit eine unbedeutende Rolle, da sie als nicht konkurrenzfähig zu petrochemischen Verfahren gilt. Ihr kommt nur in einigen Ländern nationale Bedeutung zu: so soll beispielsweise in China etwa 50 % des Acetonbedarfs durch fermentative Herstellung gedeckt werden (Dürre 1998). In Österreich wird zurzeit eine ABE-Pilotanlage in einer ehemaligen Ethanolfermentationsanlage betrieben, die über Fermentervolumina von 50 und 300 l verfügt (Nimcevic et al. 2000).

Um eine großtechnische, wirtschaftlich tragfähige ABE-Fermentation wieder etablieren zu können, müssen jedoch folgende Aspekte optimiert werden:

- Senkung der Herstellungskosten durch die Erschließung kostengünstiger, in ausreichender Menge verfügbarer Substrate (z. B. Reststoffe),
- Senkung der Herstellungskosten, indem die Destillation durch eine verbesserte, energieeffizientere Produktgewinnung ersetzt wird,
- Erhöhung der Langzeitstabilität, Verlässlichkeit und Reproduzierbarkeit des Prozesses, u. a. durch Vermeidung von Phagenbefall und der Degeneration von Produktionsstämmen,
- Praktischer Betrieb näher an den theoretischen Grenzen der Ausbeuten und Endproduktkonzentrationen,
- Vollständige, hochwertige Nutzung sämtlicher Fermentationsprodukte.

Als Substrate sind zucker- und stärkehaltige Agrarroh- und Reststoffe (Melasse, Getreide- und Kartoffelmaische) gut nutzbar. Speziell angebaute Agrarrohstoffe sind aber zu teuer. Potenziale werden in verdorbenen, für den Verzehr nicht mehr geeigneten Agrarrohstoffen gesehen (z. B. mycotoxinbelastetes Getreide). Diese Rohstoffe fallen jedoch nicht regelmäßig und in ausreichenden Mengen an, um eine großtechnische ABE-Fermentation zu ermöglichen. In Analogie zur fermentativen Ethanolgewinnung werden auch für die ABE-Fermentation lignocellulosehaltige Reststoffe als aussichtsreich eingeschätzt, da sie kostengünstig und breit verfügbar sind. ABE-Produzenten vermögen jedoch Cellulose nicht zu hydrolysieren. Dies bedeutet, dass die Expression heterologer Cellulasen in Clostridien versucht werden müsste oder dass die bei der Totalsequenzierung von *Clostridium acetobutylicum* im Genom identifizierten inaktiven Cellulasegene mit Hilfe gentechnischer Methoden zur Expression gebracht werden müssten.

Abbildung 3.2: Einzelschritte einer fermentativen oder enzymatischen Ethanolproduktion auf lignocellulosehaltigem Substrat



Quelle: Faaij et al. 2002

Wasserstoff. Molekularer Wasserstoff lässt sich biotechnisch mit Hilfe isolierter Enzyme (so genannter Hydrogenasen) oder mit Mikroorganismen erzeugen. Eine biologische Wasserstofferzeugung mit Hilfe von Mikroorganismen ist im Zuge von drei verschiedenen Stoffwechselprozessen möglich:

(1) biophotolytische Wasserstofferzeugung im Rahmen der oxygenen Photosynthese,

(2) Photoproduktion von Wasserstoff aus Biomasse im Rahmen der anoxygenen Photosynthese,

(3) Wasserstofferzeugung aus Biomasse im Rahmen von Gärungsprozessen.

Diese drei Prozesse unterscheiden sich voneinander hinsichtlich

- der Organismengruppe, die zu der jeweiligen Stoffwechselleistung befähigt sind,
- der beteiligten Enzyme und Enzymsysteme,
- der Lichtabhängigkeit des Stoffwechselprozesses,
- der jeweils genutzten Elektronenquelle und
- der gleichzeitig mit Wasserstoff gebildeten weiteren Stoffwechselprodukte.

Eine Übersicht über die drei wasserstoffliefernden Stoffwechselprozesse gibt Tabelle 3.5.

Tabelle 3.5: Charakteristika der Stoffwechselprozesse, die an der biologischen Wasserstofferzeugung beteiligt sein können

Stoffwechsel-prozess	**Organismen-gruppe**	**Licht erforderlich**	**Elektronen-donator**	**Produkte**
Oxygene Photosynthese	Grünalgen, Cyanobakterien	ja	Wasser	Wasserstoff, Sauerstoff
Anoxygene Photosynthese	Phototrophe Bakterien	ja	organische Verbindungen oder reduzierte Schwefelverbindungen	Wasserstoff, Kohlendioxid bzw. Wasserstoff, oxidierte Schwefelverbindungen
Gärung	Gärende Bakterien	nein	organische Verbindungen	Wasserstoff, Kohlendioxid, organische Verbindungen

Quelle: Reiß und Hüsing (1993)

Die biophotolytische Wasserstoffgewinnung stellt den Idealtypus eines biologischen Wasserstofferzeugungssystems dar, da Wasser durch sich selbst regenerierende Biokatalysatoren unter Nutzung des Sonnenlichts als Energiequelle zu Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Wird der Wasserstoff bei seiner Nutzung verbrannt, wird das Ausgangssubstrat Wasser wieder regeneriert. Die Substrate dieses Prozesses sind Wasser und Kohlendioxid, die Hauptprodukte Wasserstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Biomasse. Für eine großtechnische Wasserstoffgewinnung muss das biotechnische Verfahren so optimiert werden, dass die Wasserstoffproduktion maximiert, die Kohlendioxidbindung und Biomassebildung jedoch minimiert werden.

Die Produktion von Wasserstoff aus Biomasse, sei es im Rahmen der anoxygenen Photosynthese oder durch Gärung, ließe sich mit einer Verwertung von biogenen Reststoffen aus Produktionsprozessen koppeln, steht dabei aber teilweise in Konkurrenz zur Biogasproduktion. Bei allen biotechnischen Wasserstoffgewinnungsverfahren fällt Biomasse an. Sie müsste sich ebenfalls zur Gewinnung von Wertstoffen bzw. Energieträgern nutzen lassen.

Zurzeit werden Biowasserstoff-Produktionsanlagen im kleineren Maßstab nur versuchsweise im Rahmen von Forschungsvorhaben betrieben, z. B. auf Hawaii. Für eine großtechnische Anwendung müssen wesentliche Fortschritte auf folgenden Gebieten erzielt werden (Hüsing 1998):

- Annäherung des Wirkungsgrades der Prozesse an das theoretische Maximum,
- Erhöhung der Kosteneffizienz der Prozesse,
- Erhöhung der Langzeitstabilität der Prozesse,
- Erarbeitung eines Gesamtkonzepts für großtechnische Anlagen, die eine umweltverträgliche Versorgung mit Substraten, Wasser, Nährstoffen gewährleisten und auch die als Produkt anfallende Biomasse verwerten. Als Verwertung bietet sich die Gewinnung von Wertstoffen (z. B. Futter- und Lebensmittelsupplemente, Vitamine, Dünger) und Energie an.

Eine industrielle Nutzung wird jedoch nicht vor dem Jahr 2030 bis 2040 erwartet (Cammack et al. 2001).

Pflanzenöle zu Biodiesel. Pflanzenöle stellen eine alternative Rohstoffbasis in Form von Bio-Diesel als Ersatz von Diesel auf Erdölbasis dar. Ihre Herstellung selbst benötigt kein biotechnologisches Verfahren. Zumeist werden Öle aus Raps gewonnen, die verestert werden (Kaltschmidt und Hartmann 2002).

Tabelle 3.6: Vergleich verschiedener Energieträger aus Biomasse

Energieträger / Parameter	Rapsmethyl-ester	Ethanol aus zucker-/stärkehaltigen Nutzpflanzen	Ethanol aus lignocellulose-haltiger Biomasse	Wasserstoff	Fischer-Tropsch	Methanol
Konzept	Extraktion und Elektrizi-tätserzeugung	Fermentation	Hydrolyse und Fermentation, Elek-trizitätsproduktion	Vergasung	Vergasung	Vergasung
Nettoenergie-Effizienz	keine Angaben	50 % (bei Zuckerrüben)	60–70 % (Stromerzeugung eingeschlossen)	55-65 % in Zukunft Effizienzsteige-rung auf 60- 70 % erwartet	50-60 %	50-60 % in Zukunft Effizienzsteigerung auf 60- 70 % erwartet
Kosten (US$/GJ)	15-25 US$/GJ (in NW Europa)	15-25 US$/GJ (für Zuckerrüben in NW Europa)	5-15 US$/GJ (niedrige Kosten bei weit fortgeschritte-ner Technologie)	5-10 US$/GJ	8-17 US$/GJ	7-13 US$/GJ

Zum Vergleich: derzeitige Preise für Treibstoff auf Erdölbasis liegen zwischen 4-7 US$/GJ, Prognosen sehen eine Steigerung auf 5-11 US$/GJ voraus. Die Verkaufpreise für Treibstoff für Verkehrsmittel belaufen sich inklusive Steuern auf 20-50 US$/GJ

Quelle: Faaij et al. 2002

3.7 Perspektiven

Innerhalb der Biotechnologie für den produktionsintegrierten Umweltschutz werden in den nächsten Jahren neue Technologiefelder und Methoden Einzug halten. So werden aus dem Bereich der Materialwissenschaften und der Nanotechnologie neue Anwendungen erwartet, die durch veränderte Oberflächeneigenschaften, spezielle Nanopartikel oder Interfaces zwischen biologischen und nicht-biologischen Bestandteilen (Biochips, Biosensoren. Biomineralisationsprozesse) Produktionsverfahren verändern werden. Um hier den Anschluss an neue Entwicklungen nicht zu verpassen, sollten die Entwicklungen in diesen Feldern verfolgt und auf ihre Einsetzbarkeit im produktionsintegrierten Umweltschutz überprüft werden.

Das Methodenspektrum der biotechnologischen Forschung hat sich in den letzten Jahren insbesondere um Genomics, Proteomics und die In-silico-Biologie (Simulation biologischer Prozesse am Computer) erweitert. Davon werden auch Impulse für biotechnologische Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes erwartet. So könnte die Problematik der Unkultivierbarkeit von Organismen durch Genproben zum Teil umgangen werden, könnten neue Biokatalysatoren nicht nur durch Suche in neuer Organismen in extremen Habitaten sondern auch durch Kombination verschiedener Gene oder Genteilsequenzen (Geneschuffling) erzeugt werden.

In Anbetracht der Fülle an neuen Informationen erlangt die Frage nach einem effizienten Datenmonitoring und Datenhandling auch für biotechnologische Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz neue Bedeutung. Waren bislang die Entwicklungen biotechnologischer Verfahren für den produktionsintegrierten Umweltschutz keiner allzu großen Dynamik unterworfen, so könnten sich aus den Kenntnissen verschiedener Sequenzierungsprojekte neue Perspektiven ergeben. Diese Erkenntnisse für die relevanten Bereiche des produktionsintegrierten Umweltschutzes zu erschließen, muss eine der vorrangigen Aufgaben zukünftiger Aktivitäten sein.

4. Umweltentlastungseffekte

In Kapitel 3 wurden aktuell eingesetzte und in absehbarer Zeit industriell einsetzbare biotechnische Verfahren zur Vermeidung von Umweltbelastungen identifiziert und die durch sie möglichen Umweltentlastungseffekte qualitativ beschrieben. In diesem Kapitel soll darauf eingegangen werden, inwieweit diese Umweltentlastungseffekte bereits quantifiziert wurden bzw. inwiefern eine Verbesserung der Datenlage wünschenswert und machbar ist. Dabei muss nach dem unterschiedlichen Informationsbedarf der verschiedenen Zielgruppen (Unternehmen, Politik) differenziert werden.

4.1 Fallbeispiele für Umweltentlastungseffekte durch biotechnische Verfahren

Die bislang publizierten Quantifizierungen von Umweltentlastungen durch biotechnische Verfahren haben meist den Charakter von Fallstudien, die in einzelnen Unternehmen durchgeführt wurden. Somit liegen für alle relevanten Branchen Beispiele vor, in denen die Umweltbelastung durch den Wechsel zu einem biotechnischen Verfahren in teilweise beeindruckendem Ausmaß verringert werden konnte (OECD 2001). Tabelle 4.1 fasst einige prominente Fallbeispiele zusammen.

Tabelle 4.1: Umwelt(entlastungs)effekte ausgewählter Fallbeispiele biotechnologischer Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz

Prozessbeschreibung	Umwelt-(entlastungs-)Effekte
Biotechnologische Herstellung von Riboflavin (Vitamin B_2) (Hoffmann La-Roche, Deutschland)	• Insgesamt höherer Rohstoffbedarf (um 50 %) • Reduktion des Anteils an nicht-erneuerbaren Rohstoffen (um 75 %) • Energiebedarf unverändert (Verwendung von elektrischer Energie anstelle von Dampf erzeugt durch Verbrennung fossiler Brennstoffe) • Reduktion der Emissionen von flüchtigen organischen Komponenten (um 50 %) • Geringere Wasserverschmutzung (um 67 %)
Produktion von 7-Amino-Cephalosporan-Säure (7-ACA) (Biochemie, Deutschland/Österreich)	• Reduktion der eingesetzten Brennstoffe (um 99,3 %) • Abwasserreduktion (um 10 %) • Keine Verwendung von Lösungsmitteln der Klasse 1 • Reduktion der verwendeten Lösungsmittel der Klasse 2 (um 97,5 %) • Keine Notwendigkeit von Zinkbeseitigung (da keine Zinksalze während des Prozesses eingesetzt werden)
Biotechnologische (biokatalytische) Produktion des Antibiotikums Cephalexin (DSM, Niederlande)	• Bis zu dreifache Reduktion der gesamten Abfallmenge im Vergleich zum konventionellen Verfahren (von 15 kg Abfall/kg Produkt auf bis zu 5 kg Abfall/kg Produkt) • Gleicher Anteil anorganischer Komponenten an Abfall • Reduktion des Anteils an (nicht halogenierten) organischen Komponenten um 80 % • Reduktion von (nicht halogenierten) Lösungsmitteln von 1,7 kg/kg auf 0,3 kg/kg • Kein Einsatz von halogenierten Lösungsmitteln • Um 50 % höherer Bedarf an elektrischer Energie • 60 % weniger Dampf • dreifacher Wasserbedarf • kein Einsatz von flüssigem Stickstoff erforderlich

Fortsetzung Tabelle 4.1

Prozessbeschreibung	Umwelt-(entlastungs-)Effekte
Bioprozesse zur Herstellung von Aminosäuren (Tanabe, Japan) (Produktions-)Kostenvergleich Batch- und kontinuierliche Prozessführung	• Reduktion von Rohstoff – und Substratbedarf von 52,0 % auf 41,0 % • Reduktion des Enzymbedarfs von 23,0 % auf 3,5 % • Reduktion von Arbeitskosten von 20,5 % auf 6,0 % • Gleicher Brennstoffbedarf (4,5 %) • Bedarf an DEAE-Sephadex für die kontinuierliche Prozessführung (2 %) Gesamtkostenreduktion bei kontinuierlicher Prozessführung um 43 %
Enzymatische Produktion von Acrylamid (Mitsubishi Rayon, Japan)	Vergleich bzgl. Prozessführung • Reduktion der Reaktionstemperatur von 343°K auf 273-288°K • 20 bis 30 % höhere Ausbeute im ersten Durchlauf (von 70-80 % bei katalytischer auf 100 % bei enzymatischer Prozessführung) • Höhere Acrylamid -Konzentration • Aufkonzentrierung nicht erforderlich • Reinigung bei beiden Verfahren: Katalysator- bzw. Proteinentfernung erforderlich Vergleich bzgl. Energieverbrauch (in MJ/kg Acrylamid) • Reduktion des Dampfbedarfs um mehr als 80% (von 1,6 auf 0,3) • Dreifache Reduktion der benötigten elektrischen Energie (von 0,3 auf 0,1) • Gleicher Rohstoffbedarf Vergleich bzgl. CO_2 – Produktion (kg CO_2 /kg Acrylamid) • 84 % Reduktion der CO_2 – Produktion durch geringeren Dampfbedarf (von 1,25 auf 0,2) • um 60 % geringere CO_2 – Produktion durch eingesparte elektrische Energie (von 0,25 auf 0,1) • keine Veränderung auf Grund von Rohstoffbedarf

Fortsetzung Tabelle 4.1

Prozessbeschreibung	Umwelt-(entlastungs-)Effekte
	Vergleich bzgl. Abfallproduktion und -behandlung • Reaktionsprozess - Bei beiden Prozessen Katalysatoren erforderlich (immobilisierte Enzyme bzw. Kupfer) - Erzeugung von geringen Mengen an organischem Abfall bei beiden Prozessführungen - Kein anorganischer Abfall bei enzymatischer Prozessführung (geringfügig beim katalytischen Prozess) • Notwendigkeit zur Aufkonzentrierung und Reinigung - Kein Bedarf bzgl. organischer Abfallprodukte bei enzymatischer Prozessführung (geringfügig beim katalytischen Prozess) - Kein Bedarf bzgl. anorganischer Abfallprodukte bei enzymatischer Prozessführung (Reinigung/Behandlung von Kupfer bei katalytischer Prozessführung erforderlich) • Notwendigkeit zur Abfallbehandlung - Abwasserbehandlung (in beiden Fällen) erforderlich - Kein Einsatz von Ionenaustauscherharz bei enzymatischer Prozessführung erforderlich - Verbrennung erforderlich
Enzymatische Synthese von Acrylsäure (CIBA, Großbritannien)	Verbrauch von Rohstoffen und Leistungen • Rohstoffbedarf: 0,6 t Acrylonitril, 0,4 t Wasser, Fermentationsmedium Kostenreduktion durch Rohstoffe 54 % • Prozessbetrieb - Stöchiometrische Neutralisation (keine toxische Dampfemissionen wie bei konventionellem Verfahren) - Einfache, Onlineprozessüberwachung und -steuerung (keine Fernqualitätsüberwachung mehr erforderlich) • Anlagenkosten Kombinierte Fermentations- und Bioumwandlungsanlage Kosten > 2 Mio GBP

Fortsetzung Tabelle 4.1

Prozessbeschreibung	Umwelt-(entlastungs-)Effekte
Enzymatische Entschleimung von Pflanzenöl (EnzyMax) (Cereol, Deutschland)	• (Gesamtkosten-)Reduktion durch geringeren Rohstoffbedarf: - ca. 90% weniger Natronlauge (von 3,18 kg auf 0,26 kg) - kein Einsatz von Phosphorsäure erforderlich - kein Einsatz von Schwefelsäure erforderlich - geringerer Bedarf an enthärtetem Wasser (von 1,66 kg auf 0,14kg) - geringerer Bedarf an Dampf (von 1,24 kg auf 0,36 kg) - kein Einsatz von Kühlungswasser erforderlich - weniger elektrische Energie (von 0,69kWh auf 0,63kWh) - Einsatz von Zitronensäure und Enzymlösung Gesamteinspareffekt: 42,7 % (von 9,19 US$/t auf 5,27 US$/t))
Enzymatische Entschleimung von Pflanzenöl (EnzyMax) (Cereol, Deutschland)	• (Gesamtkosten-)Reduktion durch geringeren Rohstoffbedarf: - ca. 90% weniger Natronlauge (von 3,18 kg auf 0,26 kg) - kein Einsatz von Phosphorsäure erforderlich - kein Einsatz von Schwefelsäure erforderlich - geringerer Bedarf an enthärtetem Wasser (von 1,66 kg auf 0,14kg) - geringerer Bedarf an Dampf (von 1,24 kg auf 0,36 kg) - kein Einsatz von Kühlungswasser erforderlich - weniger elektrische Energie (von 0,69kWh auf 0,63kWh) - Einsatz von Zitronensäure und Enzymlösung Gesamteinspareffekt: 42,7 % (von 9,19 US$/t auf 5,27 US$/t))

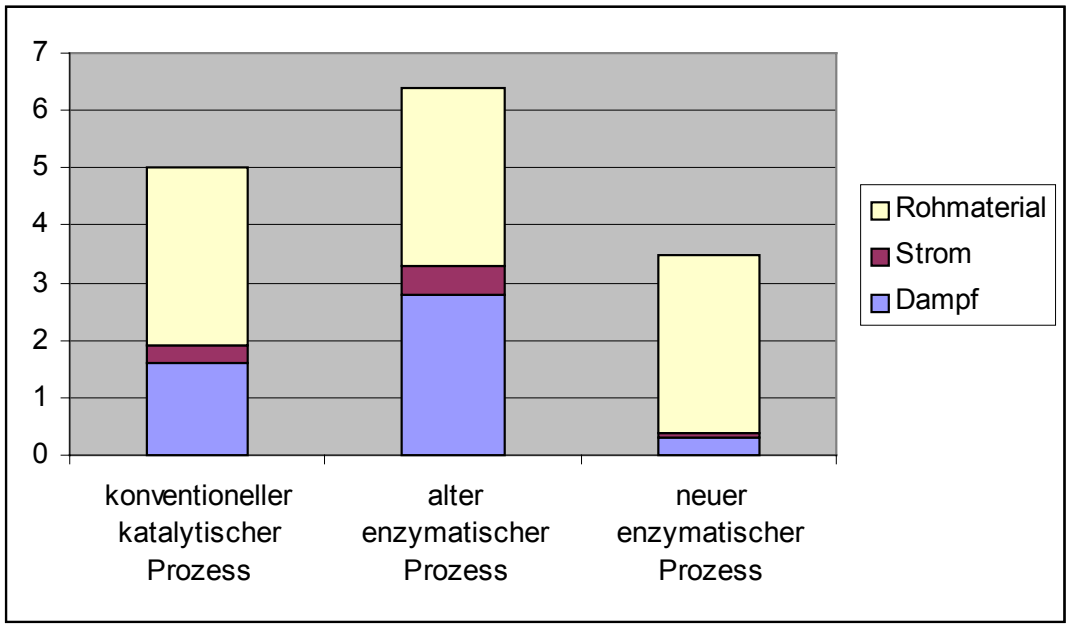
Fortsetzung Tabelle 4.1

Prozessbeschreibung	Umwelt-(entlastungs-)Effekte
Enzymatische Bleichung von Zellstoff (ICPET, Kanada)	Direkte Umwelteffekte im Vergleich zu konventionellem Verfahren • um 8 % mehr Treibhausgase • 15 % weniger Ozon • um 8 % geringere Ansäuerung • 2 % höhere Eutrophierung • 12 % weniger Schwermetalle • 16 % weniger Kanzerogene • um 13 % geringerer Wintersmog • 11 % mehr Sommersmog • um 3 % kleinerer Energieverbrauch • 13 % weniger feste Abfälle

Quelle: OECD 2001

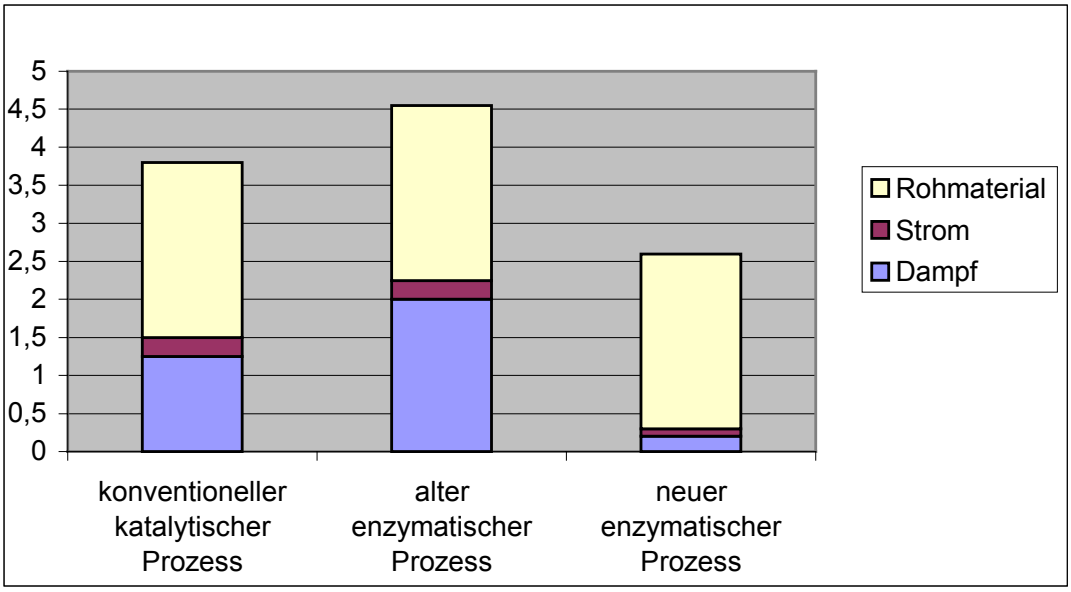
Exemplarisch konnte in den von der OECD 2001 untersuchten Fallbeispielen gezeigt werden, dass biotechnologische Verfahren nicht per se zu einem Umweltentlastungseffekt führen müssen. Dies verdeutlicht insbesondere die Analyse verschiedener Produktionsverfahren für Acrylamid, die bei Mitsubishi Rayon in Japan entwickelt und charakterisiert wurden (OECD 2001). Der 1998 entwickelte biotechnische Prozess konnte bei Zugrundelegung des Energieverbrauchs und der CO_2-Produktion lediglich hinsichtlich des Rohstoffverbrauchs mit dem konventionellen katalytischen Prozess gleichziehen, der Strom- und Dampfverbrauch war für den alten biotechnischen Prozess ungünstiger als für den konventionellen Prozess. Durch gezielte gentechnische Veränderung des eingesetzten Enzyms sowie durch Optimierung der Prozessbedingungen konnten die Prozessparameter dergestalt optimiert werden, dass der im Jahr 2001 in die industrielle Produktion eingeführte Prozess sowohl in Bezug auf den Energieverbrauch als auch die CO_2-Produktion nun mit erheblichen Umweltentlastungseffekten verbunden ist (Abbildung 4.1, Abbildung 4.2).

Abbildung 4.1: Energieverbrauch der Acrylamidproduktion (MJ/kg Acrylamid)



Quelle: OECD 2001

Abbildung 4.2 CO_2 –Produktion bei der Acrylamidproduktion (kg CO_2/kg Acrylamid)



Quelle: OECD 2001

Um den Fallstudiencharakter bisheriger Untersuchungen zur Umweltentlastung durch biotechnologische Verfahren auf eine etwas allgemeinere Ebene zu stellen, wurden in einer 2002 durch das Institute for Prospective Technological Studies in Sevilla veröffentlichten Bewertung archetypische biotechnologische Prozesse des produktionsintegrierten Umweltschutzes identifiziert und anhand ihrer Umweltentlastungspotenziale charakterisiert (Visgoe 2002). Unter archetypische Verfahren werden dabei die Prozesse verstanden, welche bereits einen gewissen Durchdringungsgrad erreicht haben bzw. die das Potenzial haben in gleicher oder leicht modifizierter Prozessführung in sehr vielen Unternehmen weltweit eingesetzt zu werden. Für die Papier- und Zellstoffindustrie sind dies die enzymatische Bleichung, der enzymatische Zellstoffaufschluss und das enzymatische Deinking bei der Verwertung von recyceltem Papier. Für das enzymatische Deinken konnten weder ökonomische Vor- noch Nachteile im Vergleich zu chemischen Alternativen bestimmt werden. Für die enzymatische Zellstoffbleichung durch Xylanase wurde ermittelt, dass bei vollständiger Umstellung aller Bleichprozesse in der Zellstoffverarbeitung der Anfall von chlorierten organischen Substanzen um 25 % reduziert werden könne, dies wären jährlich beinahe 2.700 t. Bislang wird nur in etwa der Hälfte aller Prozesse chlorfreie Bleiche durch Xylanase eingesetzt. Durch systematischen Einsatz des enzymatischen Zellstoffaufschlusses (Pulping) mittels Cellulasen könnte der jährliche Energiebedarf in Europa um 632 GWh reduziert werden. Dies entspricht einer CO_2 -Reduzierung zwischen 155.000 und 270.000 t.

In der Textilindustrie wurden ebenfalls drei archetypische Verfahren identifiziert. Dies sind die enzymatische Entschlichtung mit Amylasen, die enzymatische Entfernung von Faserbegleitsubstanzen durch Pektatlyasen und die enzymatische Bleichung durch Katalasen. Für alle drei archetypischen Verfahren wurden erhebliche Energieeinsparungspotenziale ermittelt, da die entsprechenden traditionellen Prozesse bei 80 – 90 °C stattfinden müssen, die enzymatischen jedoch bei 40 – 50 °C. Bei der enzymatischen Vorbehandlung von Baumwolle durch Pektatlyasen (Entfernung von Faserbegleitsubstanzen) können nach den Untersuchungen je 1.000 t verarbeiteter Rohbaumwolle 5.500 € gespart. Bei der enzymatischen Bleiche durch Katalasen spart das Unternehmen 21.000 € je Tonne verarbeiteter Rohbaumwolle. Außerdem ist dieser Prozess mit einer erheblichen Wassereinsparung verbunden. Für die enzymatische Entschlichtung konnten keine abschließenden Aussagen zur Kosteneinsparung gemacht werden, da für diesen Prozess belastbare Basisdaten fehlen (Visgoe 2002).

Für die Sektoren Chemie-, Pharma und Lebensmittelindustrie konnten in der Studie von Visgoe et al. (2002) keine archetypischen Prozesse identifiziert werden. Biotechnologische Prozesse in diesem Bereich sind individuell für eine bestimmte Fragestellung entwickelt und adaptiert worden. Dies könnte an der geringeren Standardisierbarkeit der Prozesse liegen.

4.2 Diskussion der Erkenntnisse aus diesen Fallstudien aus Unternehmenssicht

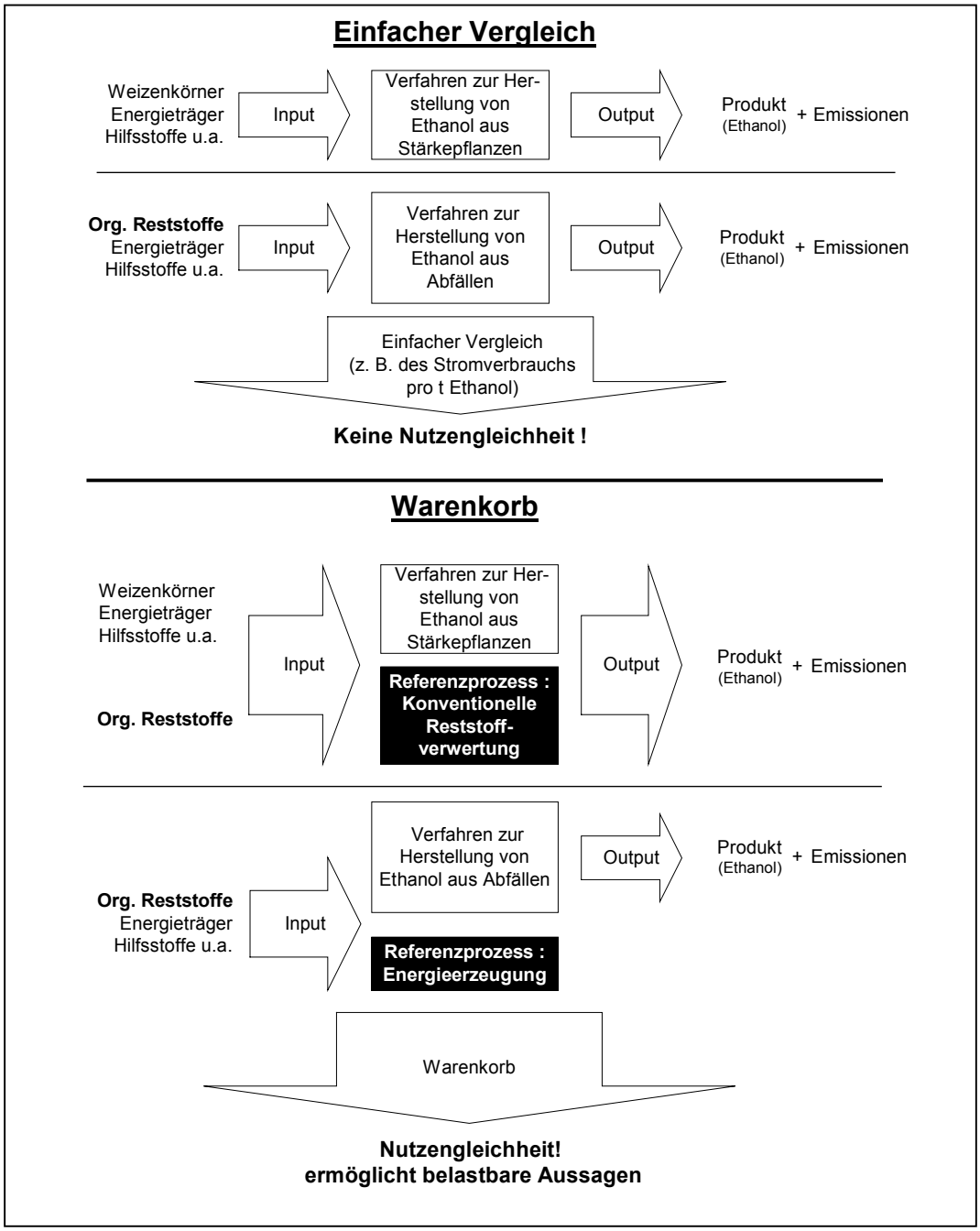
Die Fallstudien wurden erstellt, um das Konzept für Biotechnologie im produktionsintegrierten Umweltschutz breiter bekannt zu machen, um Vorteile herauszustellen und um dadurch breitere Anwendung biotechnischer Verfahren in der Industrie zu unterstützen. Diese Werbung ist umso nötiger, da sich zurzeit die biotechnischen Präventivtechniken in einem „Datendilemma“ befinden: da sie nur in geringem Umfang in der Praxis angewendet werden, fehlt der Nachweis, welche Umweltentlastungen sich mit ihnen erzielen lassen. Andererseits werden sie nur in geringem Umfang in der Praxis angewendet, da nicht offensichtlich und nachgewiesen ist, welche Umweltentlastungen sich mit ihnen erzielen lassen.

Prinzipiell ist die überwiegend gewählte Vorgehensweise der Umweltbetrachtungen (Bilanzraum Unternehmen bzw. betrachtetes Verfahren innerhalb des Unternehmens und direkter Vergleich von biotechnischem und konventionellem Verfahren[1]) meist adäquat. In methodischer Erweiterung sollte man noch den Warenkorbansatz

1 Ein solcher einfacher Vergleich ist in Abbildung 4.3 (oberer Teil) schematisch dargestellt.

berücksichtigen, der in die Bilanz alle Prozesse[2] einbezieht, die erforderlich sind um *Nutzen*gleichheit zu erzielen. Er ist schematisch im unteren Teil der Abbildung 4.3 dargestellt.

Abbildung 4.3: Mögliche Bilanzrahmen von Verfahrensvergleichen



2 Im Gegensatz zum direkten, einfachen Vergleich müssen beim Warenkorbansatz meist noch zusätzliche Referenzprozesse mit einbezogen werden, damit Nutzengleichheit zwischen den Verfahrensalternativen tatsächlich gewährleistet ist.

Problematisch für die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Fallstudien von einem Unternehmen auf das andere ist, dass die meisten Fallstudien unternehmensspezifisch sind, und es nicht unbedingt gegeben ist, dass dieselben Effekte beim Einsatz desselben Verfahrens auch in einem anderen Unternehmen unter anderen Rahmenbedingungen eintreten würden. Es stellt sich also jeweils die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse. Eine Anpassung an das eigene Unternehmen ist aber von einzelnen Unternehmen nicht/nur in Ausnahmefällen zu leisten, weil das zu Grunde liegende Verfahren der Ökobilanz/Lebenszyklusanalyse[3] sehr aufwändig ist. Sie enthalten als wesentliche Komponenten die Ziel- und Bilanzraumdefinition, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und die Interpretation der Ergebnisse.

Zwar betonen Industrievertreter immer wieder, wie wichtig für die Betriebe Informationen sind, anhand derer sie für ihr Unternehmen bewerten können, ob sich die Substitution des konventionellen Verfahrens durch ein biotechnisches bei ganzheitlicher Betrachtung sowohl ökonomisch als auch ökologisch „rechnet“ oder nicht. Dies ist gerade für Industriezweige wie die Lebensmittel- und Textilindustrie, die sich in einer schwierigen wirtschaftlichen Lage befinden, von großer Wichtigkeit. Allerdings dürften die aufwändigen Ökobilanzen nicht so gut geeignet sein, um die von den Praktikern gewünschten praxisorientierten Bewertungshilfen selbst zu erstellen. Wenn die Betriebe diese Analysen selbst durchführen müssen, sollten „abgespeckte“, schneller und leichter zu handhabende Instrumente etabliert sein und zum Einsatz kommen.

- Entsprechende Daten zu erheben, die gewissen Qualitätsanforderungen genügen, erfordert ein ausdifferenziertes betriebliches Umweltmanagement und i. d. R. einen relativ großen personellen Aufwand. Diese Voraussetzungen sind vielfach nicht gegeben bzw. es wird der Aufwand gescheut, die Daten systematisch und lückenlos zu erheben.
- Quantitative Daten werden in Unternehmen durchaus erhoben. Sie werden aber nur in Ausnahmefällen Dritten zugänglich gemacht, da dadurch Rückschlüsse auf die Produktionsverhältnisse im Unternehmen gezogen werden könnten.

---

[3] Um die Umweltentlastungspotenziale von biotechnischen Verfahren zu ermitteln und zu bewerten, können sogenannte Lebenszyklusbewertungen (Life Cycle Assessments (LCA)) herangezogen werden. Lebenszyklusbewertungen sind Instrumente des Umweltmanagements zur Vorsorge und Ressourcenschonung. Es handelt sich um Verfahren zur Erfassung und Bewertung von Umweltauswirkungen von Produkten, Prozessen, Dienstleistungen etc. über den gesamten Lebensweg. Mit ihrer Hilfe werden Schlussfolgerungen zu den ökologischen Optimierungsmöglichkeiten (Schwachstellenanalyse, z. B. für biotechnische Prozesse der zweiten Kategorie) oder der ökologischen Einordnung eines Produktes/Prozesses im Vergleich zu möglichen Alternativen getroffen (z. B. für biotechnische Prozesse der ersten Kategorie). Eine Lebenszyklusbewertung analysiert den gesamten Lebensweg eines Produktes oder Prozesses, erfasst die im Lebensweg auftretenden Stoff- und Energieströme, ermittelt die daraus resultierenden potenziellen Umweltbelastungen und bewertet sie.

Einige größere Unternehmen (z. B. der Enzymhersteller Novo Enzymes), die Anbieter von biotechnologischen Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes sind, haben entsprechende eigene Kapazitäten aufgebaut, um Life Cycle Analysen (LCAs) als Marketinginstrument ihrer eigenen Produkte nutzen zu können. Es wäre zu prüfen, ob durch gezielte Förderung mehr Anbieter dazu gebracht werden können, derartige Informationen bereitzustellen.

Andererseits gilt das obige nur für praxisreife, breit einsetzbare Verfahren. Der größere Teil biotechnologischer Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes erfordert aber noch unternehmensspezifische Entwicklungs- und Anpassungsarbeit. Im Rahmen dieser Entwicklungsarbeiten führen einige große Unternehmen manchmal Analysen der Umwelteffekte durch, ohne sie jedoch zu veröffentlichen, da diese Daten wiederum Rückschlüsse auf Produktionsverhältnisse (z. B. Ausbeuten) zulassen würden. Kleine und mittlere Unternehmen weisen hingegen die erforderlichen Strukturen und Kapazitäten nur selten auf. Entsprechende Bilanzen können daher am ehesten im Rahmen von (öffentlich geförderten) Projekten erstellt werden. Für sie besteht Bedarf nach Forschungsvorhaben, in denen derartige, auf die Verhältnisse der Betriebe zugeschnittene Bewertungsinstrumente für biotechnische Präventivtechniken entwickelt bzw. erstellt und auf Praxistauglichkeit überprüft werden.

Allerdings dürfte es sehr schwierig sein, überhaupt weitere Fallbeispiele zu identifizieren und zu analysieren, die über die bislang untersuchten und – überwiegend vom UBA bzw. der OECD – bereits publizierten Fallbeispiele hinausgehen. Diejenigen Firmen, die dieser Thematik aufgeschlossen gegenüberstehen, haben ihre hierfür geeigneten Prozesse und Daten bereits zur Verfügung gestellt. Industrievertreter schätzen es daher als unwahrscheinlich ein, dass es noch ein signifikantes Potenzial an Unternehmen gibt, die für diese Fragestellungen zu gewinnen sind.

Der Grund hierfür liegt nicht darin, dass es keine untersuchbaren Prozesse mehr gibt, sondern vielmehr in der geringen Bereitschaft der Unternehmen, die für eine sorgfältige und aussagekräftige Analyse erforderlichen Ressourcen zur Verfügung zu stellen. Die erforderlichen Daten liegen in den Unternehmen weit verstreut, z. T. an unterschiedlichen Standorten, vor oder müssen sogar extra erhoben werden. Jedoch haben die Unternehmen nur ein geringes Interesse, für die Analyse von Umwelteffekten Zeit- und Personalressourcen bereitzustellen, da der Aufwand in keinem angemessenen Verhältnis zum Nutzen für ihr Unternehmen stünde. Dies gilt, weil die Umweltentlastung zwar ein erwünschter Effekt, aber kein ausschlaggebender Grund für eine Verfahrensumstellung aus Unternehmenssicht ist.

Es gibt jedoch durchaus Themen- und Aufgabenstellungen, die für die Unternehmen von Interesse wären und die – als Nebeneffekt – Informationen und Daten zu Umweltentlastungen durch biotechnische Verfahren liefern könnten:

In den Unternehmen sind zurzeit verschiedene Software- und Managementtools im Einsatz, die betriebswirtschaftliche und technische Aspekte abdecken. Sie könnten um Module zur ökologischen Analyse und Bewertung erweitert werden, die jedoch praxisnäher, d. h. mehr an Unternehmensbedürfnisse angepasst sein müssten, als die LCA-Methodik. Es ist vorstellbar, dass Unternehmen eher zur Analyse von Umwelteffekten ihrer biotechnischen Verfahren bereit wären, wenn man ihnen anböte, ihre Prozesse mit Hilfe solcher (noch zu entwickelnder bzw. spezifisch an Biotechnologieprozesse anzupassender) Tools im Rahmen von öffentlich geförderten Forschungsprojekten zu analysieren. Als Gegenleistung für ihre Kooperationsbereitschaft erhielten sie unternehmens- und prozess-spezifische Hinweise auf noch vorhandene Kostensenkungs- und Umweltentlastungspotenziale. Die Prozessdaten könnten anschließend so aufbereitet werden, dass sie veröffentlicht werden können, ohne dass das Unternehmen vertrauliche Prozessdaten preisgeben müsste.

Derartige Ansätze werden unseres Wissens nach vom BMBF im Rahmen des Förderschwerpunkts „Nachhaltige Bioproduktion“ gefördert (BMBF 2002). Zum einen soll in mindestens einem Teilprojekt ein bereits genutztes Managementtool entsprechend adaptiert werden, zum anderen wurde gerade ein größeres Begleitprojekt bewilligt, das eine geeignete Methodik und Software entwickeln soll und dabei auf Daten zugreift, die in anderen Forschungsprojekten des Förderschwerpunkts generiert werden.

In der chemischen Industrie, insbesondere bei der Neuentwicklung von Verfahren für pharmazeutische Wirkstoffe und Feinchemikalien, stehen zu Beginn des FuE-Prozesses mehrere Verfahrensalternativen zur Diskussion, zwischen denen eine Entscheidung getroffen werden muss. Das zu diesem frühen Zeitpunkt gewählte Verfahren wird dann meist bis zur Produktionsreife beibehalten, selbst wenn es unter ökonomischen und ökologischen Aspekten nicht optimal ist. Hier fehlen Instrumente, die schon in diesem frühen FuE-Stadium eine ganzheitliche Betrachtung der Verfahrensalternativen und ihre ökonomische und ökologische Bewertung ermöglichen.

Die zielgruppengerechte Bereitstellung von Informationen zu Umweltentlastungseffekten sowie von Instrumenten zu ihrer Ermittlung stellen jedoch nur ein Element innerhalb eines Gesamtkonzepts zur Förderung von biotechnologischen Verfahren für den produktionsintegrierten Umweltschutz dar. Die Wirkungen nur dieser Maßnahme müssen grundsätzlich begrenzt bleiben, da Umweltentlastung wie bereits beschrieben alleine kein ausschlaggebender Grund für Verfahrenseinführung/-umstellung in Unternehmen ist (s. Kapitel 5 Fördernde und hemmende Faktoren zu weiteren Ursachen). Kenntnis der Umweltentlastungseffekte sind somit zwar notwendige Voraussetzung, aber nicht hinreichend. Weitere Maßnahmen, zumeist auf politischer Ebene sind daher erforderlich (vgl. folgendes Kapitel 4.3).

4.3 Diskussion der Erkenntnisse aus diesen Fallstudien aus Politiksicht

Die Kenntnisse und Quantifizierung von Umweltentlastungen liefern unter politischen Gesichtspunkten eine Entscheidungsgrundlage für die strategische Ausrichtung politischer Maßnahmen. Deshalb ist insbesondere aus politischer Sicht zu klären, welche Detailkenntnisse zur Entwicklung neuer Richtlinien nötig sind. Daneben sollte sich die Politik aber auch von globalen Fragen bei der Bewertung der Umwelteffekte biotechnologischer Fragen im produktionsintegrierten Umweltschutz leiten lassen. Dies sind die Bedeutung biotechnologischer Verfahren für ein nachhaltiges Wirtschaften, die Beurteilung der Märkte und die Betrachtung von Gesamtkosten, die bei der Einführung biotechnologischer Verfahren branchenübergreifend relevant werden und in unternehmensspezifischen Analysen nicht berücksichtigt werden können (so z. B. die Rolle der Anlagenbauer oder die Entwicklungen auf dem Enzymmarkt).

Biotechnische Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz werden nicht um der Biotechnologie willen zum Einsatz kommen können, sondern vielmehr sollte die erzielbare Umweltentlastung, unabhängig von der zum Einsatz kommenden Technik, maßgeblich sein. In Kapitel 5 „Fördernde und hemmende Faktoren“ wird aber auch dargelegt, dass sich biotechnische Verfahren, selbst wenn sie eine gleichwertige oder sogar überlegene Technik darstellen sollten, nicht „automatisch“ auf dem Markt für Umwelttechnik etablieren und gegenüber technischen Alternativen durchsetzen können. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass biotechnische Verfahren nicht notwendigerweise, per se umweltschonende Verfahren sind. Bemerkenswerterweise erfolgt in der gängigen Darstellungsweise praktisch eine Gleichsetzung von Biotechnologie und integrierter Umweltschutztechnik. Dies ist insofern plausibel, als die durch biotechnische Verfahren erzielbaren Effekte mit Kenngrößen integrierter Umweltschutzansätze übereinstimmen. Diese Art der Darstellung suggeriert aber, dass biotechnische und enzymatische Ansätze „per Definition“ integrierte Umweltschutztechnik und somit „automatisch“ umweltschonend seien. Dies ist in dieser Ausschließlichkeit so nicht zutreffend. Vielmehr muss differenziert werden, wobei folgende Punkte zu berücksichtigen sind:

- In Kapitel 4 wurden biotechnische Verfahren dargestellt, die eine möglichst umweltschonende Umwandlung bestimmter Ausgangsmaterialien zu bestimmten Produkten ermöglichen. Durch die Beschränkung auf den eigentlichen Produktionsprozess wurden aber die Umweltwirkungen der Ausgangsmaterialien, der Produkte und des Enzyms bzw. des zum Einsatz kommenden Produktionsorganismus selber nicht betrachtet. So wurde z. B. nicht gefragt, ob nicht vielleicht das (relativ umweltschonend hergestellte) Produkt selbst substituierbar ist.
- Sofern biotechnische Präventivtechniken konventionelle Verfahren substituieren, kann zwar durch das neue Verfahren die spezifische „Umweltbelastung pro produziertes Produkt“ verringert werden. Wenn jedoch mit dem Einsatz des bio-

technischen Verfahrens die Produktionsvolumina deutlich gesteigert werden, kann insgesamt ein Anstieg der Netto-Umweltbelastung zu verzeichnen sein.

- Im Kapitel 4 wurden auch mehrere biotechnische Verfahren identifiziert, die die Herstellung bestimmter Produkte überhaupt erst ermöglichen. So umweltschonend die einzelnen Verfahren auch sein mögen, so führen sie doch zu einer Netto-Umweltbelastung durch Ressourcen- und Energieverbrauch, statt diese zu verringern.

Darüber hinaus ist in Betracht zu ziehen, dass sicherlich einzelne biotechnische und enzymatische Verfahren betriebswirtschaftlich keinerlei (Kosten-)Vorteile bieten, aber dennoch unter dem Umweltentlastungsgesichtspunkt sinnvoll erscheinen und durchaus gesamtwirtschaftliche bzw. gesamtgesellschaftliche Vorteile aufweisen. Hier könnten LCAs bei der Prüfung helfen, ob in diesen Fällen staatliche Aktivitäten (z. B. Vorsorgeforschung, gesetzliche Festlegung von Umweltstandards, finanzielle Anreize) sinnvoll wären, um diese Verfahren in die betriebliche Praxis einzuführen.

Abschließend soll darauf hingewiesen werden, dass biotechnische Verfahren auch über die einzelnen Produktionsprozesse hinausgehende Potenziale bieten, und zwar für die Erschließung neuer (nachwachsender) Rohstoffe sowie für die Gewinnung und Wandlung regenerativer Energien. Diese können langfristig zu einer nachhaltigeren Wirtschaftsweise beitragen, als es die derzeitigen, auf fossilen Rohstoffen und Energiequellen aufbauenden Produktionssysteme tun. Da es sich aber überwiegend um Entwicklungen handelt, die sich in frühen Stadien der Forschung und Entwicklung befinden, ist schwierig zu beurteilen, inwieweit es sich dabei um realistische Optionen für die Zukunft handelt.

Für politische Entscheidungen und Prioritätensetzungen, ob bzw. in welchen Fällen es sinnvoll erscheint, diesen komparativen Benachteiligungen durch geeignete Maßnahmen entgegenzuwirken, ist aber wiederum eine fundierte Einschätzung und Bewertung der aktuellen und potenziellen Beiträge von biotechnischen Präventivtechniken zur Umweltentlastung wichtig.

Bei der Abschätzung und Bewertung von Umweltentlastungseffekten und –potenzialen durch biotechnische Verfahren muss berücksichtigt werden, dass entsprechende biotechnische Präventivtechniken grundsätzlich in zwei Kategorien fallen:

(1) biotechnische Verfahren substituieren konventionelle Verfahren,

(2) durch biotechnische Verfahren werden bestimmte Produkte überhaupt erstmals wirtschaftlich herstellbar bzw. es werden neuartige Produkte mit Qualitätseigenschaften herstellbar, die mit konventionellen Verfahren nicht erzielbar sind.

Biotechnische Verfahren der ersten Kategorie sind beispielsweise die Substitution chemischer Syntheseverfahren durch enzymatische bei der Herstellung von 6-Aminopenicillansäure oder 7-Cephalosporansäure, die Substitution chemischer Stärkehydrolyseverfahren durch enzymatische Stärkeverzuckerungsverfahren, die Substitution chemischer Verfahren zum Deinken von Altpapier durch enzymatische oder die Substitution des Stonewashing von Jeansstoffen durch Biostoning.

Beispiele für Verfahren, die der zweiten Kategorie zuzuordnen sind, sind das Biopolishing in der Textilindustrie oder die Herstellung (menschlicher) körpereigener Substanzen in gentechnisch veränderten Organismen als Pharmawirkstoffe.

Die Unterscheidung dieser beiden Kategorien ist aus zwei Gründen wichtig: zum einen ist nur bei Verfahren der ersten Kategorie eine Ermittlung des Umweltentlastungspotenzials des biotechnischen Verfahrens im Vergleich zu einer technischen Alternative möglich; in der zweiten Kategorie kann kein anderes Verfahren zum Vergleich herangezogen werden. Zum anderen kann nur bei Verfahren der ersten Kategorie wegen des Substitutionseffekts eine reale Entlastung der Umwelt durch Verringerung des produkteinheitsbezogenen Ressourcenverbrauchs und Minderung der Emissionen erwartet werden[4]. Zwar kann bei Verfahren der zweiten Kategorie vermutet werden, dass es sich um relativ ressourcenschonende und emissionsarme Verfahren handelt, da sie sich biologischer Reaktionsprinzipien bedienen, doch dürfte die Einführung von Verfahren dieser Kategorie zu einer zusätzlichen Nettobelastung der Umwelt auf Grund der Ausweitung der Produktion führen.

Um also zu ermitteln, inwieweit biotechnische Verfahren zur realen Umweltentlastung beitragen (können), muss zum einen ermittelt werden, in welchem Verhältnis Verfahren der ersten Kategorie künftig zu Verfahren der zweiten Kategorie stehen. Zum anderen muss bei Verfahren der ersten Kategorie geprüft werden, inwieweit die produkteinheitsbezogenen Umweltentlastungen durch die Erhöhung der Produktion der jeweiligen Produkteinheiten (über-)kompensiert werden.

Für die Politik müssen Umweltentlastungseffekte nicht nur bezogen auf einzelne Unternehmen, sondern auch bezogen auf die jeweiligen Branche oder eine bestimmte Region (z. B. Bundesland, Deutschland, Europa o. Ä.) ermittelt und bewertet werden. Dies erfordert die Erhebung folgender Daten:

- Gesamtzahl der Betriebe in den zu untersuchenden Industriezweigen,
- Ermittlung der jeweiligen Produktionsmengen,
- Anzahl der Betriebe, die bereits das betreffende biotechnische Verfahren einsetzen,

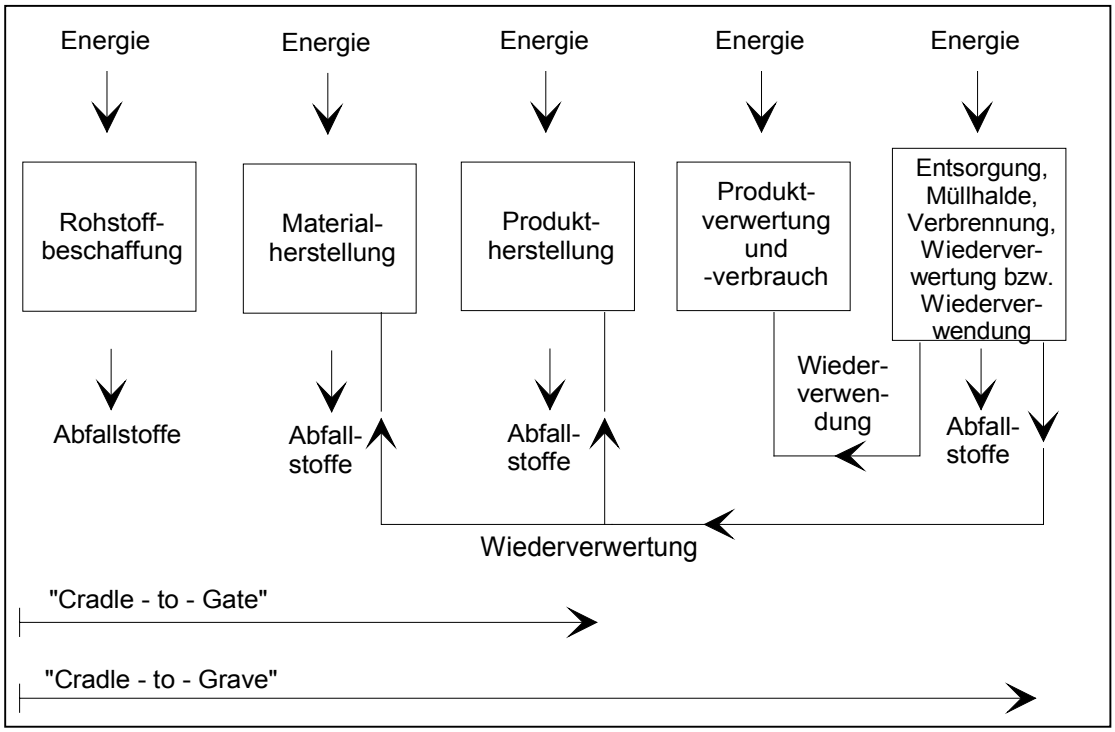
---

4 die allerdings durch eine Steigerung der Produktion (über-)kompensiert werden kann.

- Anzahl der Betriebe, in denen der Einsatz des betreffenden biotechnischen Verfahrens potenziell möglich ist,
- Ressourcenverbräuche bzw. Emissionen des zu untersuchenden Industriezweigs.

Hilfreich zur Bewertung können dazu auch die so genannten „Cradle-to-Gate“[5]- bzw. „Cradle-to-Grave“[6]-Ansätze sein. Diese beiden Ansätze sind am Beispiel der Enzymproduktion in Abbildung 4.4 dargestellt.

Abbildung 4.4: Flussschema zur Enzymherstellung als Basis einer Cradle-to-Gate- bzw. Cradle-to-Grave-Analyse



Quelle: Novo Nordisk 1995

Die alleinige Beseitigung von wissenschaftlich-technischen Hemmnissen durch Förderung geeigneter FuE-Vorhaben griffe daher zu kurz. Vielmehr erscheinen vielfältige Maßnahmen erforderlich, die auf allen Stufen des Innovationsprozesses ansetzen und teilweise an Maßnahmen zur Förderung kleiner und mittlerer Unternehmen, zur Förderung des produktionsintegrierten Umweltschutzes oder zur Förderung des Innovationsmanagements anknüpfen könnten.

---

5 „von der Wiege bis zum Versand“

6 „von der Wiege bis zur Entsorgung“

5. Fördernde und hemmende Faktoren bei der Implementierung von biotechnologischen Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz

5.1 Generelle Hemmnisse

Nachdem in den vergangenen Jahren Firmen häufig in ihre End-of-Pipe-Techniken investiert haben, um den bestehenden Umweltauflagen gerecht zu werden, besteht oft kein Bedarf zur weiteren Optimierung im Sinne einer den Regularien entsprechenden Umweltentlastung mehr (Hüsing et al. 2000). Dementsprechend werden Verfahren, die unter dem Aspekt „Umweltschutz“ angeboten werden, von den potenziellen Nutzern auch nicht als relevant eingestuft. Dass es in den meisten Unternehmen dennoch Schwachpunkte gibt, deren Verbesserung sich in einer Effektivitätssteigerung und/oder Kostenreduktion auszeichnen würde, entgeht den Entscheidungsträgern, da es kaum geeignete Methoden zur Gesamtprozessevaluation gibt. Umweltmanagementsysteme wie ISO 14000 wurden bislang nur in wenigen Industriezweigen wie der Automobilindustrie und der chemischen Industrie implementiert. Andere Sektoren wie die Lebensmittelindustrie sind hier eher zögerlich (Boudouropoulos und Arvatinoyannis 1999). Auch auf Forschungsebene konnten bislang keine einheitlichen Standards und klare Richtlinien entwickelt werden, um Umwelteffekte und ihren Nutzen für ein Unternehmen zu quantifizieren (Thoresen 1999). Exemplarisch wurden jedoch mittlerweile Werkzeuge entwickelt, deren Nutzen derzeit erprobt wird (Thoresen 2001).

Bei der Suche und Bewertung möglicher Optionen für den produktionsintegrierten Umweltschutz stehen für zahlreiche technische Optionen bereits seit einiger Zeit etablierte Instrumente zur Bewertung der zu erwartenden Kosten/Nutzen-Relation zur Verfügung (Kostka und Hassan 1997). Für biotechnologische Verfahren mangelt es nicht nur an diesen Bewertungsinstrumentarien. Auch detaillierte, für den Nichtfachmann verständliche Information ist nicht in adäquater Form vorhanden. Am Beispiel der Initiative BIO-WISE des britischen Wirtschaftsministeriums wird jedoch deutlich, dass es durchaus Möglichkeiten einer firmennahen Informationsaufbereitung gibt. BIO-WISE hat ein Maßnahmenpaket zur Bedeutung der industriellen Biotechnologie entwickelt, das aus schriftlichen Materialien, Roadshows und einer Helpline besteht (www.dti.gov.uk/biowise) (näheres siehe Kapitel 6 „Fördermaßnahmen“).

Schwächen biotechnologischer Verfahren im Vergleich zu technischen Alternativen sind darüber hinaus bei den Anwendern selbst zu suchen (Hüsing et al. 2000). So ist

biotechnologisches Know-how im Gegensatz zu ingenieurwissenschaftlichem Wissen in den betroffenen Unternehmen oft nicht per se vorhanden, Entscheidungsträger wurden während ihrer Ausbildung mit den Neuerungen der Biotechnologie noch nicht vertraut gemacht und Informationen zu den Möglichkeiten der Biotechnologie sind häufig nur mühsam zu bekommen. Dies führt zu einem mangelnden Bewusstsein für biotechnologische Alternativen und zu Berührungsängsten. Auch die Struktur der Anwender, zumeist kleine und mittelständische Unternehmen mit häufig konservativer Grundhaltung und wenig Forschungsaktivitäten stellen ein Hemmnis für die Einführung biotechnologischer Verfahren dar.

Ein weiteres Hemmnis bei der Einführung biotechnischer Verfahren liegt darin, dass Entscheidungsträger häufig das Kosten/Nutzen-Verhältnis einer biotechnischen Lösung als negativ einschätzen, und deshalb eine bereits etablierte (technische) Lösung bevorzugen. Da biotechnologische Lösungen detailliertes Wissen in Enzymtechnik und Biologie, in integrierter Prozesstechnik, Markstruktur, Marktanforderungen und Kundenwünschen erfordern, gehen sie u.U. mit erheblichen Veränderungen in Struktur, Arbeitsabläufen und infrastrukturellen Anforderungen einher. Dieser Organisationsaufwand bedeutet aber auch, dass diese Innovationen sich erst nach einer langen Zeitspanne bezahlt machen. Entsprechendes Flexibilität in der Ressourcenallokation ist somit eine wichtige Voraussetzung zur Investition in biotechnologische Verfahren.

5.2 Branchenspezifische Hemmnisse

5.2.1 Chemische und pharmazeutische Industrie

Einem breiteren Einsatz biotechnischer Verfahren in der chemischen Synthese als bisher stehen im Wesentlichen folgende Hemmnisse entgegen (Hüsing et al. 1997, Sauter 1996):

- *Inhärente Nachteile von Biokatalysatoren*. Die katalytische Aktivität von Enzymen ist häufig nur innerhalb enger Temperatur- und pH-Grenzen gegeben, häufig auf wässrige Medien begrenzt, die Substratspezifität ist eng („für jedes Substrat ein eigenes Enzym“) und die Enantioselektivität für unnatürliche, synthetische Substrate gering, die Stabilität unter Reaktions- und Lagerungsbedingungen oft nicht ausreichend, die Abtrennung der Reaktionsprodukte kann schwierig sein, einige Enzyme sind teilweise nicht schnell, in ausreichenden Mengen und gleich bleibender Qualität verfügbar. Deshalb sind Enzyme der erforderlichen Reinheit prinzipiell teure Hilfsstoffe, die die Verfahren gegenüber chemischen Synthesen schnell unwirtschaftlich werden lassen.

- *FuE-Aufwand steht in ungünstigem Verhältnis zu Markterwartungen*. Das Interesse am systematischen Ausloten des Potenzials von Biokatalysatoren für die chemische Synthese ist häufig deswegen gering, weil die erforderlichen FuE-Aufwendungen in ungünstigem Verhältnis zu den Markterwartungen stehen. Der Markt für Biokatalysatoren in der chemischen Synthese ist stark fragmentiert, so dass die Umsatzerwartungen für einzelne Katalysatoranwendungen meist bei wenigen Millionen US$ pro Jahr liegen (die Märkte für die Reaktionsprodukte können aber um Zehnerpotenzen größer sein als für den Biokatalysator!).
- *Erfordernis der Überlegenheit enzymatischer Katalyse auf Vollkostenbasis*. Selbst wenn sich biokatalytische Verfahren als mindestens ebenso gut wie ein bereits etablierter chemisch-synthetischer Prozess erweisen, führt dies nicht unbedingt zur ihrer Umsetzung in die Praxis. Gründe sind beispielsweise, dass der biokatalytische Prozess eine andere Produktionsanlagenkonzeption als der bestehende Prozess erfordert, die chemische Anlage aber bereits existiert bzw. abgeschrieben ist, oder dass der chemische Prozess in ein Netzwerk anderer chemischer Prozesse eingebunden ist (z. B. durch Nutzung von Abprodukten anderer Prozesse), in das sich der biokatalytische Prozess nicht ohne weiteres einfügen lässt.
- *Regulierung und Standards*. Ein Wechsel des Produktionsverfahren von chemischer Synthese zu enzymatischer Synthese bzw. Biotransformation kann u. U. eine (vergleichsweise teure und langwierige) Neuzulassung des Produkts erforderlich machen.
- *Konkurrierende Entwicklungen*. Zur Lösung eines chemisch-synthetischen Problems stellt die Biokatalyse meist nur eine Option unter mehreren wissenschaftlich-technischen Alternativen dar. Durch Weiterentwicklungen chemischer Katalyseverfahren kann möglicherweise der Einsatz von Biokatalysatoren fallweise obsolet werden. Daher ist die Beobachtung konkurrierender Entwicklungen (gerade in anderen Disziplinen) und sich wandelnder Rahmenbedingungen und deren Umsetzung in die Neuausrichtung der FuE-Aktivitäten von großer Bedeutung.
- *Feinchemikalien und Pharmaka*. Die Märkte für Pharmazeutika und Feinchemikalien weisen strukturelle Besonderheiten auf, die das systematische Ausloten des Potenzials der Biokatalyse für die Synthese dieser Substanzgruppen behindern. Sowohl bei Pharmazeutika als auch Feinchemikalien handelt es sich um Produkte mit hoher Wertschöpfung, die eine relativ große Toleranz gegenüber hohen Produktionskosten erlaubt, und bei denen die *Funktion* der betreffenden Substanz im Vordergrund steht, die über Patente abgesichert wird. Zudem ist – zumindest bei Pharma- und Agrochemikalienwirkstoffen – vor dem Markteintritt ein Zulassungsverfahren erfolgreich zu durchlaufen. Dies führt dazu, dass es für die Firmen von größerer Bedeutung ist, die entsprechenden Substanzen schnellstmöglich auf den Markt zu bringen, als Produktionsverfahren zu entwickeln, die im Hinblick auf Kosten und Ressourcenverbrauch optimiert sind

(Wubbolts 2002). Charakteristisch ist ein nachfolgend beschriebener Ablauf des FuE-Prozesses: Werden in einem Screening interessante Wirkstoffkandidaten identifiziert, werden zunächst kleine Mengen im Gramm- bis Kilogrammbereich von der Syntheseabteilung für erste Untersuchungen (z. B. Toxikologie, funktionelle Eigenschaften) hergestellt. Hierbei geht es lediglich darum, diese Substanzmengen überhaupt verfügbar zu machen, wobei der Syntheseweg, der Syntheseaufwand und auch die dabei entstehenden Kosten und Abfälle überhaupt keine Rolle spielen. Übersteht der Substanzkandidat diesen ersten Test mit positiven Ergebnissen, werden für weitere Untersuchungen größere Mengen benötigt (ca. 10 bis 100 kg). In diesem Stadium des Forschungsprozesses wird häufig auch eine biotechnische Herstellung in Erwägung gezogen. Trotz erheblicher Fortschritte bei der Herstellung maßgeschneiderter Biokatalysatoren (z. B. mit Hilfe der *directed evolution*) können jedoch Substanzmengen von bis zu 100 kg mit Hilfe biokatalytischer oder biotechnischer Verfahren meist nicht so schnell hergestellt werden, dass sie noch in den weiterlaufenden Forschungsprozess sinnvoll einzuspeisen wären. Denn inzwischen werden weitere Tests, aber auch Patente sowie Ergebnisse für spätere Zulassungsverfahren mit chemisch synthetisierten Substanzen gemacht, und selbst wenn später durch die Biokatalyse Prozesse entwickelt würden, die im Vergleich zur chemischen Synthese in Bezug auf Ökonomie und Ökologie vorteilhafter wären, wird das Rad nicht wieder zurückgedreht. Dieser Prozess ist für die Firmen trotzdem tragfähig, da insbesondere bei Pharmawirkstoffen am Markt sehr hohe Preise erzielbar sind, die nur zu 5 % bis 10 % aus den tatsächlichen Produktionskosten bestehen. Erst wenn wirklich die Herstellungskosten signifikant zum Tragen kommen (im Pharmabereich ist das beispielsweise bei den Generika der Fall), ist effizienten biotechnischen oder biokatalytischen Produktionsverfahren ein hoher Stellenwert einzuräumen.

- *Instrumente zur ganzheitlichen Bewertung von Syntheserouten in der Frühphase des FuE-Prozesses*. In der Frühphase des FuE-Prozesses zur Herstellung einer neuen Substanz werden meist die entscheidenden Weichen gestellt, mit welchen Technologien und über welche Synthesewegen die Substanz letztlich hergestellt wird. Diese Entscheidungen sind auf Grund der besonderen Marktstrukturen und Rahmenbedingungen (s.o.) später kaum revidierbar. Daraus resultiert zum einen, dass bevorzugt diejenigen Technologien ausgewählt werden, die sehr kurzfristig einsetzbar sind, im Unternehmen hinreichend beherrscht sind und das gewünschte Ergebnis mit hoher Wahrscheinlichkeit ermöglichen. Dies trifft auf biotechnische Verfahren häufig (noch) nicht zu. Zudem wäre es erforderlich, bereits in der Frühphase der Entwicklung abschätzen zu können, welche der prinzipiell möglichen Synthesealternativen die günstigste in Bezug auf ökonomische und ökologische Ziele ist. Hierfür fehlen aber noch geeignete Instrumente.

5.2.2 Lebensmittelindustrie

Einem breitem Einsatz biotechnischer und enzymatische Verfahren in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie stehen im wesentliche folgende Hemmnisse entgegen (von Schell und Mohr 1995, Hüsing et al. 1997, Videbaek 1997):

- länder- und produkt(linien)spezifische Regelungen, die den Einsatz von Enzymen nicht gestatten (z. B. deutsches Reinheitsgebot für Bier);
- traditionelle handwerkliche Herstellungsprozesse, die als nur schlecht vereinbar mit dem Gebrauch industrieller Enzyme angesehen werden;
- unerwünschte Veränderung der Produktqualität beim Einsatz industrieller Enzyme gegenüber der bisherigen Herstellungsweise (z. B. Geschmacksveränderung);
- Handhabungskompetenzen für die biotechnischen Prozesse sind im Unternehmen nicht vorhanden, die Einstellung speziell ausgebildeten Personals wäre jedoch wirtschaftlich nicht tragfähig;
- geringe eigene Forschungsaktivität in der Lebensmittelindustrie bedingt durch die Vielzahl der kleinen und mittleren Unternehmen;
- zu geringe Transparenz über bestehende Forschungsangebote bzw. Forschungsergebnisse;
- die Gewinnspannen bei der Lebensmittelproduktion sind sehr klein, so dass sich biotechnische Arbeiten nur bei erheblichen Optimierungseffekten lohnen; oft sind traditionelle Verfahren enzymatischen Prozessen preislich überlegen (dies betrifft konventionell und gentechnisch hergestellte Enzyme in gleicher Weise);
- Neuentwicklungen setzen sich nur dann durch, wenn sie im Vergleich zum traditionellen Prozess, auf welcher Ebene auch immer, technologische Vorteile haben (z. B. höhere Effizienz, besserer Temperaturbereich). Innovationen, die lediglich eine Umweltentlastung bieten und sich möglicherweise erst in einem längeren Zeitraum als dem derzeitigen Planungshorizont von etwa zwei Jahren amortisieren, stellen in der gegenwärtigen wirtschaftlichen Situation der Branche keinen ausreichenden Anreiz für eine Betriebsumstellung dar;
- fehlende Akzeptanz der Verbraucher für gentechnisch hergestellte Enzyme und gentechnisch veränderte Organismen und daraus resultierende Selbstverpflichtungen der Industrie, derartige Präparate und Organismen nicht zu verwenden, um Image- und daraus resultierende Umsatzeinbußen vorzubeugen. So sind beispielsweise für das gentechnisch hergestellte Chymosin zurzeit drei verschiedene geprüfte und offiziell für sicher befundene Handelsprodukte auf dem Markt, die in vielen außereuropäischen und europäischen Ländern (Ausnahme Frankreich, Österreich) verwendet werden dürfen. In Deutschland gilt gentechnisch gewonnenes Chymosin als Labaustauschstoff und ist daher im Gegensatz zu den übrigen Enzymen der Käseherstellung zulassungspflichtig.

- zu geringe Verbraucheraufklärung über die industrielle Produktion von Lebensmitteln (hohe Qualitätsanforderungen und niedrige Preisen sind meist nur durch industrielle Massenproduktion zu gewährleisten).

5.2.3 Papier- und Zellstoffindustrie

Es konnte gezeigt werden, dass in der Papier- und Zellstoffindustrie einige der grundlegenden Prozesse bereits durch etablierte Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes ersetzt werden können. Trotz dieser positiven Voraussetzungen gibt es Hemmnisse, neue Verfahren bzw. Verfahrensschritte in die industrielle Praxis umzusetzen. Dazu zählen in der Papier- und Zellstoffindustrie nach einer Analyse von Vigsoe et al. (2002) insbesondere die „konservative Einstellung der Papiermühlenbesitzer sowie die mangelnden Kenntnisse von Biokatalysatoren auf Managementebene“. Darüber hinaus gibt es in der Papierindustrie keine klassischen Zulieferer für Biokatalysatoren und wenig Werbung für diese Technologien. Da der Nutzen aus biotechnologischen Prozessen nur gering ist im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren, es wenig Nachfrage nach entsprechenden „ökologischen“ Produkten gibt und der internationale Wettbewerbsdruck stark ist, bleibt nur ein enger Spielraum für Investitionen in neue Technologien. Weitere Hemmnisse sind nach einer Analyse von Hüsing et al. (1998) die fehlende Bereitschaft, etablierte und erprobte - und in den Augen der Betriebstechniker auch gut laufende - Verfahren zu ersetzen, die langen Abschreibungszeiten der bereits getätigten hohen Kapitalinvestitionen speziell in der Zellstoff- und Papierindustrie sowie die fehlende Ausbildung des technischen Personals in der Biotechnologie.

5.2.4 Textilindustrie

Einem breiten Einsatz biotechnischer Verfahren in der Textilindustrie stehen eine Reihe von Hemmnissen entgegen (Novo Nordisk 1997, Schönberger 1994):

- die Textilindustrie befindet sich in einer schwierigen wirtschaftlichen Lage, sichtbar an niedrigen Umsatzrenditen und dem wachsenden Konkurrenzdruck insbesondere aus Südostasien;
- Neuentwicklungen setzen sich nur dann durch, wenn sie im Vergleich zum traditionellen Prozess, auf welcher Ebene auch immer, technologische Vorteile haben (z. B. höhere Effizienz, besserer Temperaturbereich). Innovationen, die lediglich eine Umweltentlastung bieten und sich möglicherweise erst in einem längeren Zeitraum als dem derzeitigen Planungshorizont von etwa zwei Jahren amortisieren, stellen in der gegenwärtigen wirtschaftlichen Situation der Branche keinen ausreichenden Anreiz für eine Betriebsumstellung dar;
- geringe Forschungskapazität;

- qualifizierte Mitarbeiter, die sich ausschließlich um Umweltfragen kümmern, sind die Ausnahme;
- Handhabungskompetenzen für biotechnische Innovationen sind in den Unternehmen nicht vorhanden;
- in Horizontalbetrieben erhält der Nutzer der enzymatischen Technik nicht automatisch den entsprechenden Vorteil und Entlastungseffekt; umgekehrt sind die Kunden der Auftragsveredler nicht bereit, die Mehrkosten für die neu eingeführte Technik zu tragen;
- stark begrenzte Nachfrage nach entsprechenden „ökologischen" Produkten beim Endverbraucher. Kaufentscheidend ist in erster Linie der Preis der Ware.

5.3 Fördernde Faktoren

Im Gegensatz zu den zumeist klar definierten Hemmnissen für die Einführung biotechnologischer Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz, sind fördernde Faktoren eher global und beziehen sich nicht nur auf biotechnologische Fragen.

Zwar scheint die umweltschonende Produktion als Wettbewerbsvorteil inzwischen zunehmend wichtig zu werden. Am Beispiel eines skandinavischen Gemeinschaftsprojekts, in dem Firmen in Dänemark, Schweden und Norwegen befragt wurden, konnte gezeigt werden, dass die Umweltschutzmaßnahmen als direkter Verkaufsparameter und als Möglichkeit zur Kundenbindung eingesetzt wurden (Schmidt et al. 2002). Für viele Unternehmen ist die Bereitschaft zur Einführung biotechnologischer Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz jedoch nicht eine pure Umweltschutzmaßnahme, sondern Teil einer innovationsorientierten Gesamtstrategie eines Unternehmens (Hüsing et al. 2000). Dies bedeutet, dass die Firmen Mechanismen implementiert haben, die es ihnen ermöglichen, zukünftige Trends sowie Bedürfnisse und Anforderungen verschiedener Felder, wie Märkte, Technologien, Umweltregulierungen, Kundenwünsche usw. vorherzusehen. Als Resultat davon wurden und werden die unternehmensinternen Kompetenzen strategisch ausgebaut, um Flexibilität zur Antwort auf Veränderungen von außerhalb zu erhalten. Antriebskraft einer solchen Strategie ist der Erhalt langfristiger ökonomischer Vorteile. Unternehmen, die an der vordersten Front der Umweltinnovationen agieren, beschreiben ihr handeln nicht als „grün auf Grund umweltpolitischer Überzeugung". Stattdessen ist die Gesamtstrategie innovativ, und diese Strategie reicht auch in den Umweltsektor.

Umweltinnovationen eines Unternehmens können dazu beitragen, generelle Ziele zu erreichen. Dies hat eine Untersuchung von Firmen gezeigt, die ein Umwelt-

managementsystem eingeführt haben (Boudouropoulos und Arvanitoyannis 1999). Die Unternehmen zeichneten sich durch folgende Merkmale aus:

- reduzierte laufende Kosten (durch Verhinderung von Abfall und Abfallreduktion);
- Management der Versorgungskette;
- erhöhte Produktivität;
- verbesserte Finanzsituation (es konnte gezeigt werden, dass „sauberere Firmen" geringere Produktionskosten hatten);
- dauerhafte Übereinstimmung mit gesetzlichen Regularien;
- Verlässlichkeit in Bezug auf Umweltfragen (da Umweltaspekte strategisch und nicht fall-spezifische erwogen werden);
- weniger administrativen Aufwand;
- Abfallreduktion;
- verbessertes Image in der Öffentlichkeit;
- Motivation der Mitarbeiter (bessere Identifikation mit dem Unternehmen, stärkere Beteiligung im innerbetrieblichen Vorschlagswesen);
- bessere Umweltperformance

Diese innovationsfreundliche Gesamtstrategie ist häufig verknüpft mit einer unvoreingenommene und offene Belegschaft. So ist es in einem solchen Umfeld auch leichter, biotechnologische Prozesse einzuführen, selbst wenn die Belegschaft keine Vorbildung für die spezifischen Anforderungen der Biotechnologie hat. Die Informationslücken wurden durch den Aufbau von Informationskanälen, externen Beratern und die Etablierung von Kooperationen geschlossen (s. u.).

Generell gilt, dass auch für Unternehmen mit einer innovativen Gesamtstrategie schwierige Phasen im Projektverlauf zu Hemmnissen für ein biotechnologisches Verfahren führen können. Da sich jedoch die Bewertung und Sichtweise nicht nur auf die Reduktion von Kosten und die Verhinderung von Umweltverschmutzung fokussiert, sondern das Projekt im strategischen Kontext gesehen wird, fallen diese Hemmnisse weniger stark ins Gewicht, wenn andere Faktoren aus dem weiteren Umfeld der Gesamtstrategie auf der Nutzenseite zu Buche schlagen. Da biotechnologische Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes jedoch kostenintensiv sind, lange Amortisationszeiten haben und teilweise erhebliche strukturelle Veränderungen in Anlagen und Prozessen erforderlich sind, haben Unternehmen mit flexibler Ressourcenallokation bei der Einführung von PIUS-BT-Verfahren Vorteile.

Unternehmen, welche erfolgreich biotechnologische Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz eingeführt haben, haben in ihrem Betrieb häufig ein stringentes Projektmanagement eingeführt, das die kritische Bewertung von Kosten, Nutzen, erreichten Einzelschritten in regelmäßigen Abständen durchführt. Wenn nötig kann so ein Projekt frühzeitig korrigiert bzw. gestoppt werden. Darüber hinaus haben erfolgreiche Unternehmen geeignete Strategien zur Informationsbeschaffung etabliert. Dazu gehören Netzwerke, verschiedene Formen der Kooperation und verschiedene Formen der Personalpolitik und -entwicklung. Durch die richtige Wahl dieser Optionen kompensieren Firmen mögliche Know-how-Defizite.

Häufig ist die Abwägung der Vor- und Nachteile biotechnischer Verfahren im Vergleich zu technischen Alternativen stark anwendungsbezogen. So zeichnen sich katalytische und biokatalytische Verfahren durch ihre Selektivität und die Herabsetzung der Aktivierungsenergie zur Steigerung des Wirkungsgrads bzw. der Ausbeute der (bio-)chemischen Reaktionen aus, sie verringern den erforderlichen Einsatz von Rohstoffen sowie die Entstehung von Emissionen und können somit zur Energieeinsparung beitragen. Ihr Einsatz erfolgt hauptsächlich in der Synthese hochpreisiger Spezial- und Feinchemikalien sowie bei der asymmetrischen Synthese von chiralen Substanzen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass biotechnische, enzymatische Verfahren in diesem Segment auf Grund der Eigenschaft Spezifität und Selektivität komparative Vorteile gegenüber chemischen Synthesen aufweisen. Es wird vermutet, dass die Bedeutung in diesem Bereich biotechnischer Verfahren noch wachsen wird, da das Segment enantiomerenreiner chiraler Substanzen an Bedeutung gewinnen wird. Dies ist auf einen internationalen Trend in der Zulassungspraxis für Pharmaka und Agrochemikalien zurückzuführen, indirekt enantiomerenreine Substanzen zu begünstigen, indem die Bedingungen für die Zulassung von Racematen verschärft werden. Somit kommt Verfahren zur Racemattrennung und zur asymmetrischen Synthese wachsende Bedeutung zu, und in beiden Bereichen haben biotechnische Verfahren erhebliche Stärken.

6. Nationale und internationale Fördermaßnahmen und politische Initiativen

Öffentliche Förderprogramme, die speziell auf biotechnologische Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz fokussiert sind, spielen nur eine relativ geringe Rolle (z. B. in Großbritannien mit dem BIO-WISE-Programm). Neben allgemeineren Maßnahmen zur Unterstützung biotechnologischer FuE-Arbeiten, in deren Rahmen auch die Entwicklung neuer umweltschonender Produktionsverfahren gefördert wird, sind v. a. ökologisch motivierte Forschungsprogramme weit verbreitet. Innerhalb dieser Programme werden oft auch Projekte zur Nutzung der Biotechnologie im produktionsintegrierten Umweltschutz durchgeführt, sofern diese im Wettbewerb mit anderen Technologien bestehen können.

Die Tätigkeit internationaler Organisationen wie der UN oder der OECD beschränken sich meist auf die Schaffung eines positiveren Umfeldes für neue Umwelttechnologien und darauf, durch Publikationen oder die Organisation von Tagungen deren Diffusion zu stimulieren. Daneben werden kleinere FuE-Projekte in Entwicklungsländern gefördert. Umfangreiche Mittel zur Finanzierung von FuE-Maßnahmen innerhalb der Länder der Europäischen Union werden im Rahmen verschiedener EU-Programme zur Verfügung gestellt. Außerhalb der EU dominieren hingegen bei der öffentlichen FuE-Finanzierung nationale Maßnahmen.

Innerhalb der Bundesrepublik Deutschland werden im Folgenden sowohl die Maßnahmen des Bundes charakterisiert, als auch ein Überblick über die Aktivitäten der einzelnen Bundesländer gegeben.

6.1 Fördermaßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland

6.1.1 Bundesebene

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):

Neben der allgemeinen Förderung integrierten Umweltschutzes im Förderprogramm „Forschung für die Umwelt“ mit verschiedenen – inzwischen abgelaufenen – branchenspezifischen Ausschreibungen stehen in der aktuellen Ausschreibung „Nachhaltige BioProduktion“ 33 Mio € speziell zur Erschließung des Potenzials biologischer Prozesse für die nachhaltige industrielle Produktion bereit (BMBF 2000). Begleitend wird ein Instrumentarium zur Bewertung von Verfahren und Pro-

dukten entwickelt, um KMUs bei strategischen Entscheidungen bezüglich möglicher Änderungen ihrer Produktionsprozesse zu unterstützen (BMBF 2002). Im Förderzeitraum 1989-1994 förderte da BMBF unter dem Förderkonzept „Biologische Wasserstoffgewinnung“ mit einem Fördervolumen von ca. 21 Mio DM. Derzeit gibt es angesichts der langfristigen Perspektive einer kommerziellen Nutzung der biologischen Wasserstoffproduktion keine spezifischen Förderaktivitäten.

Bundesumweltamt (UBA):

Das Umweltbundesamt ist die wissenschaftliche Umweltbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Das Umweltbundesamt fördert Untersuchungen, Bestandsaufnahmen und Bilanzierungen biotechnologischer Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz anhand von Einzelprojektförderung auf Grund von jährlichen Ausschreibungen im Ufoplan. Darüber hinaus unterhält das Bundesumweltamt kostenfreie Datenbanken zu Umweltforschungsdaten (UFORDAT) und Umweltliteraturdaten (ULIDAT).

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU):

Die von der Bundesregierung 1989 mit einem Kapitalstock von knapp 1,3 Mrd € ausgestattete Deutsche Bundesstiftung Umwelt fördert als Stiftung bürgerlichen Rechts aus den anfallenden Kapitalerträgen unternehmensübergreifend anwendbare Innovationen. Im Fokus steht dabei die Unterstützung von Projekten, an denen KMU beteiligt sind. Einer der Förderschwerpunkte ist hier seit 1997 der „Einsatz biotechnologischer Verfahren und Produkte im Sinne eines produkt- bzw. produktionsintegrierten Umweltschutzes in ausgewählten Industriebranchen“ (Heiden et al. 1999).

Daneben wird in (zumindest teilweise) aus Bundesmitteln finanzierten Einrichtungen an biotechnologischen Projekten im produktionsintegrierten Umweltschutz gearbeitet, u. a. am (zu 90 % aus Mitteln des BMBF finanzierten)

Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH:

Zu dieser 1991 gegründeten Einrichtung der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren gehört ein Umweltbiotechnologisches Zentrum. Hier ist einer der Arbeitsschwerpunkte das Leitprojekt „Nachhaltige Biotechnologie“ zur umweltschonenden Substitution von Verfahren-/Verfahrensschritten durch biotechnologische Methoden (UFZ 2002). Am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt ein Kontaktbüro eingerichtet, um die Potenziale biotechnologischer Verfahren für die neuen Bundesländer zu erschließen, eine konzeptionelle Strukturierung und Weiterentwicklung von

Projektideen zu verfolgen und Antragssteller bei der Antragsstellung und Einreichung von Projektideen bei der DBU zu unterstützen.

Auch an weiteren mit einer Grundfinanzierung aus Bundesmitteln arbeitenden Forschungseinrichtungen laufen PIUS-BT relevante Projekte. So befasst sich in der Fraunhofer-Gesellschaft, die über eine Grundfinanzierung von ca. einem Drittel ihres Etats aus öffentlichen Mitteln verfügt, das Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik (IGB) mit dem Screening nach neuen Biokatalysatoren und in der Umweltbiotechnologie mit umweltgerechten Prozessentwicklungen sowie Verfahren zur Produktion von Massenchemikalien (FhG 2002).

6.1.2 Landesebene

Die meisten Bundesländer unterhalten Landesämter oder -anstalten für Umwelt(schutz) bzw. Ökologie. Diese bieten vielfach auch eine Beratung von Unternehmen bezüglich der Möglichkeiten innovativer Umwelttechnologien, z.T. speziell im Bereich des produktionsintegrierten Umweltschutzes – meist ohne spezielle Fokussierung auf biotechnologische Verfahren. In Baden-Württemberg ist dies an der Landesanstalt für Umweltschutz das Referat 31, welches sich mit Umwelttechnologien für die industrielle und gewerbliche Nutzung beschäftigt. Darüber hinaus sind die Aktivitäten des **Ministeriums für Umwelt- und Verkehr in Baden-Württemberg** ein sehr gutes, in anderen Bundesländern noch nicht etabliertes Instrumentarium der politischen Meinungsbildung und Öffentlichkeitsarbeit zur Förderung der Biotechnologie im produktionsintegrierten Umweltschutz.

Einige Bundesländer haben darüber hinaus spezielle Förder- oder Beratungseinrichtungen. Aktuell bedeutend sind dabei die Folgenden:

Bayern:

Am Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (LfU) wird ein Informations- und Dokumentationszentrum für Umwelttechnologie und Umweltmanagement (IDZ) eingerichtet. Dieses soll Unternehmen und Einrichtungen der Wirtschaft bei der Entwicklung und Anwendung innovativer – auch explizit integrierter – Umweltschutztechnologien beraten (BayLfU 2002).

Nordrhein-Westfalen:

Im Landesumweltamt NRW (LUA) werden gezielt Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Umweltbelastungen entwickelt. Dabei wird in den letzten Jahren die verfahrenstechnische Optimierung zum produktionsintegrierten Umweltschutz gegenüber nachsorgenden Umwelttechniken explizit bevorzugt (LUA 2002).

Zur Erschließung speziell der Potenziale der Biotechnologie für den produktionsintegrierten Umweltschutz sollen die rubitec – Gesellschaft für Innovation und Technologie der Ruhr-Universität Bochum mbH und die Transferstelle Umweltbiotechnologie der Ruhr-Universität Bochum beitragen. Hierzu hat die rubitec GmbH erhoben, welche Potenziale an den Hochschulen und Forschungseinrichtungen des Landes vorhanden sind und für den Transfer in die industrielle Nutzung genutzt werden könnten (rubitec 2001).

Sachsen:

Der Umweltforschungsplan des Sächsischen Landesamts für Umwelt und Geologie (LfUG) umfasst Forschungsvorhaben sowohl des Bereichs Umwelt als auch in der Gen- und Biotechnologie. Dabei werden seit August 2000 gezielt Projekte mit Schwerpunkt „Biotechnologie im Umweltschutz – insbesondere produktionsintegrierter Einsatz“ gefördert (LfUG 2001).

Ferner ist das Land Sachsen zu 5% an der Finanzierung des Umweltforschungszentrums Leipzig-Halle GmbH beteiligt.

Sachsen-Anhalt:

Das Land Sachsen-Anhalt beteiligt sich ebenfalls mit 5 % an der Finanzierung des Umweltforschungszentrums Leipzig-Halle GmbH und somit an den dort durchgeführten Arbeiten im Bereich der Umweltbiotechnologie.

6.2 Internationale Fördermaßnahmen

6.2.1 Länderspezifische Fördermaßnahmen

Zahlreiche europäische und außereuropäische Länder haben öffentliche FuE-Fördermaßnahmen im Rahmen des Umweltschutzes. Eine umfassende Analyse aller nationalen Fördermaßnahmen würde den Rahmen dieser Studie sprengen. Exemplarisch sollen aber die Aktivitäten einiger von ihrer Wirtschaftskraft her führenden oder beim Einsatz biotechnologischer Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz besonders engagierten Staaten betrachtet werden:

Großbritannien:

Mit dem BIO-WISE-Programm fördert die britische Regierung seit 1999 gezielt die Einführung biotechnologischer Verfahren in der Industrie. Ziel ist dabei gleichermaßen die Wettbewerbfähigkeit der britischen Industrie und die Entwicklung des biotechnologischen Anlagenbaus zu fördern sowie zugleich einer umweltschonenderen Produktionsweise den Weg zu bereiten.

Die Durchführung obliegt – im Auftrag und Namen des Department of Trade and Industry (DTI) – der AEA Technology plc., einem Ingenieur- und Technologieberatungsbüro, das die britische Regierung auch bereits bei der Umsetzung anderer Programme unterstützt.

Zur lokalen Betreuung der potenziellen Anwender arbeitet dieses mit verschiedenen „Regional Development Agencies“ zusammen, die z.T. mit regionalen (biotechnologischen) Unternehmensverbänden oder den örtlichen Handelkammern verbunden sind (DTI, 2000).

Über die vierjährige Laufzeit des Programms verteilt wurde ein Budget von insgesamt 13 Mio £ bereitgestellt, davon 3 Mio £ zur Förderung von Demonstrationsprojekten (DTI, 2001).

Das Programm umfasst (DTI, 1999):

- die Verbesserung des Informationsflusses durch einen Newsletter, Fallstudien und die Veranstaltung von Seminaren, Workshops und Werksbesichtigungen;
- eine kostenlose telefonische Helpline sowie – für KMU – die persönliche Beratung durch BT-Spezialisten zur Klärung der Möglichkeiten der Nutzung biotechnologischer Verfahren im jeweiligen Unternehmen;
- einen Marktüberblick, welche Unternehmen die benötigten Technologien bzw. Ausrüstungen anbieten,
- einen Zuschuss von bis zu 25 % der Projektkosten für innovative biotechnologische Verfahrensentwicklungen, bei denen ein späterer Technologietransfer möglich erscheint.

Damit konnten bis Ende 2001 insgesamt Investitionen in Höhe vom 19 Mio £ angeregt und dadurch bei den Anwendern bereits in den ersten beiden Jahren Kosten in Höhe von 11 Mio £ eingespart werden (DTI, 2001).

Finnland:

Auch in der finnischen Forschungsförderung spielen biotechnologische Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes eine im internationalen Vergleich große Rolle. Entsprechende Schwerpunkte finden sich:

- in den aktuellen Forschungsprogrammen der Suomen Akatemia (Finnische Akademie der Wissenschaften), die vorwiegend (zu 82%) universitäre Forschungsarbeiten finanziert
- der nationalen Technologie-Agentur TEKES,
- bei der VTT (dem wichtigsten finnischen Auftragsforschungszentrum) in der Ausrichtung des VTT-Biotechnology-Instituts.

Bei der Finnische Akademie der Wissenschaften sind die Biowissenschaften und der Umweltschutz zu einem Fördergebiet zusammengeschlossen und mit einem Budget von 40 Mio € p. a. (Stand 2001) ausgestattet. Damit wurden die hierfür bereitgestellten Mittel seit 1995 mehr als verdoppelt (Suomen Akatemia 2002).

Neben der Finanzierung zahlreicher Einzelprojekte laufen derzeit 17 größere Forschungsprogramme, beispielsweise das mit 2,5 Mio € ausgestattete Programm „Process Technology". In diesem Rahmen werden u. a. bioprozesstechnologische Projekte wie auch Arbeiten im Bereich der Katalysatorforschung durchgeführt. Auch werden verschiedene „Centers of Excellence in Research" gefördert, u. a. von 2000 bis 2005 ein „Technical Research Centre of Finland, Industrial Biotechnologie" mit ca. 30 Mitarbeitern am VTT (s.u.) oder eine „Applied Microbiology Research Unit", die 2002 eingerichtet wurde und bis 2007 an der Universität Helsinki in der Natur vorkommende Mikroben und deren Enzyme auf die Nutzbarkeit in Produktionsprozessen hin untersuchen wird.

Auch bei der nationale Technologieagentur TEKES, die Zuschüsse - vorwiegend des Handels- und Industrieministeriums – für FuE-Maßnahmen in Unternehmen bereitstellt, läuft derzeit (2001 – 2005) ein mit über 50 Mio € ausgestattetes „Neo-Bio – Novel Biotechnology"-Programm, beispielsweise mit Projekten zur Nutzung kristalliner Enzyme als Katalysator oder chemisch-technischen Prozessentwicklungen (TEKES 2002).

Am VTT, einem zu etwa gleichen Teilen aus Wirtschaftserträgen, Forschungsprojekten der öffentlichen Hand und einem Grundzuschuss der Regierung finanzierten Auftragsforschungsinstitut, arbeiten ca. 300 Mitarbeiter mit einem jährlichen Budget von 20 Mio € im Geschäftsbereich „VTT Biotechnology" (VTT 2002a). Hierzu gehört auch das „Technical Research Centre of Finland, Industrial Biotechnologie" der Suomen Akatemia. Ziel der Entwicklung innovativer Prozesse und Produkte auf Basis der Biotechnologie ist gleichermaßen eine nachhaltige Entwicklung als auch die industrielle Wettbewerbfähigkeit zu fördern. Die prozesstechnologischen FuE-

Arbeiten decken dabei Fermentationsverfahren, mikrobielle Prozesse und die industrielle Anwendung von Enzymen ab. Als Anwender wird dabei für die Lebensmittelindustrie, die Papier- und Zellstoffindustrie, die Chemiebranche und die Textilindustrie gearbeitet (VTT 2002b). Dazu kommen weitere für PIUS-BT relevante Aktivitäten beispielsweise in der Mikrobiologie.

Norwegen:

Auch beim norwegischen Forschungsrat (Norges Forskningsråd), der die Regierung in Fragen der Forschungspolitik berät und etwa ein Drittel der gesamten öffentlichen FuE-Fördermittel in Norwegen vergibt, liegt einer der thematischen Schwerpunkte auf biotechnologischen Produktionsverfahren und Prozessen (Forskningsråd 2002). Hierfür werden jährlich ca. 650 Mio nkr (ca. 90 Mio €) bereitgestellt, zu drei Vierteln aus Mitteln der Ministerien für Fischerei und für Landwirtschaft.

Die Projektförderung konzentriert sich schwerpunktmäßig auf Anwendungen in Branchen von großer Bedeutung für die einheimische Wirtschaft: Neben Nutzungen der Biotechnologie in Aquakulturen, in Landwirtschaft und Nahrungsmittelindustrie gehört hierzu auch die Papier- und Zellstoffindustrie, in der die Umweltbelastung durch biotechnologische Verfahren deutlich gesenkt werden kann.

Andere europäische Länder:

Selbstverständlich werden auch andernorts – zumeist im Rahmen der allgemeinen Förderung von Umwelttechnologien – PIUS-BT-Projekte gefördert.

So unterstützt beispielsweise das niederländische „Ministerie van Economische Zaken“ umweltschonende Investitionen in KMUs mit zwischen 25 % und 62,5 % der Projektkosten (MINEZ 2000). In Belgien konzentrieren sich mehrere Abteilungen des VITO (Vlaamse instelling voor technologisch onderzoek) – eines Auftragsforschungsinstituts, das seinen Etat von ca. 40 Mio € p. a. zu gut der Hälfte aus Mitteln der flämischen Regierung bestreitet, den Rest aus Drittmitteln der Industrie erwirtschaftet – auf Arbeiten im Bereich der Umwelt- und Prozesstechnologien (VITO 2002).

In Schweden fördert die Stiftung MISTRA, die 2001 auf ein Stiftungskapital von 4,7 Mrd SEK zurückgreifen konnte mit jährlich 250.000 SEK Forschungen im Umweltsektor. Dabei wird eine Vernetzung der Förderaktivitäten von der Grundlagenforschung bis zur industriellen Kommerzialisierung angestrebt.

USA:

In den USA gibt es zwei Institutionen, deren Auftrag es ist, zu einem Wandel zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise beizutragen. Beide, die U.S. Environmental Protection Agency (EPA) und die Biomass Initiative des National Biomass Coordination Office beschäftigen sich in diesem Zusammenhang mit biotechnologischen Verfahren für den produktionsintegrierten Umweltschutz.

Die U.S. Environmental Protection Agency (EPA) fördert über verschiedene Projekte und Programme die Entwicklung einer „grünen Chemie". Nach deren Grundprinzipien (Anastas et al. 1998) sollen problematische Abfälle nicht nachträglich behandelt, sondern von vornherein vermieden werden, wobei – möglichst spezifische, katalytische Verfahren und eine Reaktionsführung bei moderaten Temperaturen und Drücken generell als vorteilhaft gesehen werden.

Entsprechend wurden im „Presidential Green Chemistry Challenge Awards Program" verschiedene biotechnologische Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes ausgezeichnet. In den vergangenen Jahren waren dies: die fermentative Gewinnung von PLA-Kunstfasern (2002), ein enzymatisches Verfahren zur Behandlung von Baumwolltextilien (2001) oder im Jahr 2000 die Entwicklung neuer, effizienterer Enzyme und Verfahren zu deren Nutzung in der industriellen Synthese verschiedener organischer Chemikalien und Pharmazeutika(2000) (U.S. Environmental Protection Agency 2002a). Ferner werden (potenzielle) Anwender in ihrer Ausbildung oder – soweit sie schon im Berufsleben stehen – auf Konferenzen oder in Workshops mit den Möglichkeiten, die sich infolge der neuen Technologien bieten, vertraut gemacht (U.S. Environmental Protection Agency 2002b). Des Weiteren wird von der EPA das der American Chemical Society (ACS) angegliederte Green Chemistry Institute (GCI) unterhalten. Dieses fördert z.Zt. einzelne Arbeiten und soll zu einem mit mehreren Mio US$ jährlich ausgestatteten Forschungsförderprogramm ausgebaut werden (American Chemical Society 2002).

Das National Biomass Coordination Office, das dem Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) des U.S. Department of Energy (DOE) angegliedert ist und zusätzlich vom U.S. Department of Agriculture (USDA) personell mit ausgestattet wird, befasst sich mit allen Aspekten der Nutzung von Biomasse. Entsprechend der „Executive Order 13134: DEVELOPING AND PROMOTING BIOBASED PRODUCTS AND BIOENERGY" vom August 1999 und dem „Biomass Research and Development Act of 2000" soll in der „Biomass Research and Development Initiative" alle nationalen FuE-Maßnahmen zur Nutzung von Biomasse gebündelt und koordiniert werden (U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy 2002).

Zur Erweiterung der Möglichkeiten zur Nutzung nachwachsender Rohstoffe sollen dabei gezielt fermentative und enzymkatalysierte Verfahren zur Produktion sowohl

von Energieträgern als auch chemischer und pharmazeutischer Grundstoffe entwickelt werden (U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy 2001).

Japan:

Die japanischen Aktivitäten im Bereich biotechnologischer Verfahren des produktionsintegrierten Umweltschutzes können derzeit auf Grund der jüngsten Restrukturierungen im MEXT (Ministerium für Erziehung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie) und im METI (Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie) nur begrenzt eingeschätzt werden. Angesichts der neuen Verteilung der Zuständigkeiten ist aber mit einer Intensivierung der Aktivitäten zu rechnen.

Am METI, bzw. dem hierzu gehörigen „Basic Industries Bureau“, wurde eine „Biochemical-Industry Division“ zur Förderung der Entwicklung der Biotechnologie eingerichtet. Zugleich soll hier auch nach Lösungen für Umwelt- und Sicherheitsprobleme in der Chemie gesucht werden (Ministry of Economy , Trade and Industry 2002).

Beiden Bereichen wird hohe Priorität zugeschrieben: Die biochemische Industrie gilt als führende Branche des 21. Jahrhunderts, so dass deren Entwicklung in Japan besonders gefördert werden soll. Mit der Lösung technologischer Probleme im Umweltschutzbereich wurde, angesichts der noch großen Risiken und der noch anstehenden langen Vorlaufforschung, das National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) beauftragt. Dieses ging im April 2001 aus der „Agency of Industrial Science and Technology“ hervor und wurde dem METI eingegliedert. Gute anderthalb Jahre später lassen sich die hier laufenden Arbeiten natürlich noch nicht umfassend bewerten, erste Berichte über Entwicklungsarbeiten enzymatischer Syntheseverfahren liegen aber bereits vor (AIST 2002).

Als nicht-gewinnorientierte Forschungseinrichtung wurde 1990 das „Research Institute of Innovative Technology for the Earth“ durch das Ministry of Economy Trade and Industry etabliert. Rund 200 Mitarbeiter befassen sich in fünf Forschungsgruppen der Grundlagenforschung (Systemanalyse, Pflanzenphysiologie, Mikrobiologie, Chemie, Kohlendioxid-Haushalt) und der angewandten Forschung u. a. mit Fragen der produktionsintegrierten Umweltschutzes. In den 1990er-Jahren waren dies u. a. Themen zur Wasserstoff-Bioproduktion, zu biologisch abbaubaren Polymeren und die Entwicklung von Hochleistungsbioreaktoren. Derzeit fokussieren sich Forschungsarbeiten auf die Entwicklung umweltfreundlicher Katalysatoren und in Kooperation mit japanischen Unternehmen beispielsweise auf die Wasserstoff-Speicherung und die Stromerzeugung mittels Biomasse.

Weitere nationale Aktivitäten:

Die beschriebenen Aktivitäten der USA und Japans zur Biotechnologie im produktionsintegrierten Umweltschutz wurden auf Grund der ökonomischen Bedeutung dieser beiden Volkswirtschaften ausgewählt und näher untersucht. Selbstverständlich bieten viele weiteren Staaten entsprechende Programme und Fördermöglichkeiten an.

So fördert das australische Department of Industry, Tourism and Resources genauso wie das kanadische Umweltministerium gezielt den Einsatzes biotechnologischer Verfahren in der Industrie, zumindest auch zum Zwecke des Umweltschutzes (Department of Industry, Tourism and Resources 2000; Environmental Technology Advancement Directorate 2002). In Kanada wird zusätzlich eine Datenbank zur branchenspezifischen Suche nach Umweltschutztechnologien angeboten (Canadian Pollution Prevention Information Clearinghouse 2002). Diese enthält rund 1200 Referenzen (Datenblätter, Fallstudien, weiterführende Internet-Adressen) mit Anregungen zur Reduzierung von Umweltverschmutzung. So findet sich beispielsweise im Falle der Papier- und Zellstoffindustrie Information über bioverfahrenstechnische Substitutionsmöglichkeiten für konventionelle Prozesse.

Eine umfassende Übersicht aller nationalen Aktivitäten weltweit kann hier jedoch aus Platzgründen leider nicht erfolgen.

6.2.2 Länderübergreifende Fördermaßnahmen

Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD):

Im Rahmen der OECD bilden knapp 50 Vertreter aus Industrie, Forschung und Lehre sowie Politik, zusammen mit einigen Mitarbeitern der „Biotechnology Unit“ des OECD-Sekretariats, eine „Task Force on Biotechnology for Sustainable Industrial Development“. Deren Mitglieder kommen aus verschiedensten Ländern der Europäischen Union, Tschechien und der Schweiz, den führenden asiatischen Industrienationen Japan und Korea, den USA und Kanada, sowie Australien und Südafrika.

Diese verfolgt die aktuellen Möglichkeiten zur Nutzung biotechnologischer Verfahren für PIUS. Mit der Zusammenstellung verschiedenster BT-Anwendungen in Produktionsverfahren (OECD 2001) werden dem potenziellen Anwender die Möglichkeiten moderner biotechnologischer Verfahren in der industriellen Nutzung dargestellt.

United Nations:

Die Vereinten Nationen fördern im Rahmen des Förderprogramms United Nations Environmental Programme (UNEP) innerhalb der *Division of Technology, Industry and Economics* (DTIE) einen Wechsel hin zu umweltverträglicheren Praktiken in verschiedenen Bereichen, u. a. auch der industriellen Produktion.

Dazu werden, neben der – von Norwegen unterstützten – Lenkung von Investitionen in sauberere Produktionstechniken in Entwicklungsländern (UNEP DTIE 2001), Fachtagungen organisiert (UNEP DTIE 2002) und mit dem Journal „UNEP Industry and Environment" ein Forum zur Diskussion verschiedenster relevanter Themen geboten.

Biotechnologische Verfahren stehen hier nicht speziell im Vordergrund, werden aber mit abgedeckt (Jaworski 2001).

Europäische Union:

Bei der Forschungsförderung durch die Europäische Union gibt es keine speziellen Programme zur Entwicklung biotechnologischer PIUS-Verfahren. Diese werden aber in – allgemeiner gefassten – Forschungsförderprogrammen mit abgedeckt (CORDIS 2002):

Im 3. und 4. Rahmenprogramm wurden mit dem BIOTECH 1- bzw. dem BIOTECH 2-Programm – u. a. mit Unterprogrammen „Microbial factories" und „Cell factories" – gezielt Arbeiten zur Entwicklung biotechnologischer Produktionsverfahren finanziert. Auch in thematisch offenen Programmen für internationale Forschungskooperationen wurden verschiedene PIUS-BT-Projekte durchgeführt.

Hier wurde beispielsweise an biologischen bzw. enzymatischen Verfahren zum Abbau von Ligninen in der Papierindustrie, an der Nutzung von Extremophilen und an Biotransformationen in der Produktion von Feinchemikalien gearbeitet.

Im 5. Rahmenprogramm (Laufzeit 1998 - 2002) wurden in Programmen wie LIFE QUALITY (Quality of life and management of living resources) oder GROWTH (Competitive and sustainable growth) – unter Fortführung beispielsweise des „Cell factory"-Unterprogramms, PIUS-BT-Projekte primär aus ökologischen Gründen gefördert.

Dabei wurden u. a. Alternativen zu verschiedenen ökologisch problematischen Verfahren in der Textilverarbeitung entwickelt (z. B. in der Vorbehandlung von Cellulose-Fasern oder in der Veredlung von Wolle) und verschiedenste biokatalytische

Verfahren (weiter)entwickelt, auch für die ökonomisch wettbewerbsfähige enantioselektive Synthese chiraler Produkte. Insbesondere in den Projekten des 5. Rahmenprogramms sind auch regelmäßig Industrieunternehmen mit eingebunden.

Im 6. Rahmenprogramm werden 7 „vorrangige Themenbereiche der Forschung“ vorgegeben (Kommission der EG 2001a). Für die Entwicklung biotechnologischer PIUS-Verfahren werden dabei voraussichtlich Priorität 3 „Nanotechnologien, intelligente Werkstoffe, neue Produktionsverfahren“, Priorität 5 „Lebensmittelqualität“ und Priorität 6 „Nachhaltige Entwicklung und globale Veränderungen“ mit Schwerpunkten in umweltverträglicheren Energieversorgungs- und Verkehrssystemen relevant sein.

Bei Priorität 3 sollen im Bereich „New Production Processes and Devices“ laut dem vorab veröffentlichten Konzeptpapier (KoWi 2002c) in den Grundstoffindustrien innovative Technologien, speziell auch die Biotechnologie, integriert werden. Damit soll auch die technologische Basis für den „EU Environmental Technologies Action Plan“ geschaffen werden. In diesem dürften gemäß dem Überblick der Europäischen Kommission zu den „Umwelttechnologien von morgen“ (Kommission der EG 2002) neue Anwendungen der Biotechnologie, insbesondere biokatalytische Verfahren, eine wichtige Rolle spielen.

Auch im Bereich der Lebensmittelverarbeitung wird speziell auf die Nutzung der Möglichkeiten der Biotechnologie verwiesen (KoWi 2002a).

Welche Fördermöglichkeiten sich im 6. Rahmenprogramm der EU für biotechnologische PIUS-Verfahrensentwicklungen letztendlich bieten werden, kann aber erst beurteilt werden, wenn die endgültigen Ausschreibungen publiziert werden. Erste Ausschreibungen werden für Ende Dezember 2002 erwartet.

Unabhängig von diesen Prioritäten sollen weitere „Maßnahmen unter der Überschrift ‚Planung im Vorgriff auf den künftigen Wissenschafts- und Technologiebedarf der Europäischen Union’ [... im Zusammenhang mit den Politiken der Gemeinschaft“ durchgeführt werden (Kommission der EG 2001a, S.6). So soll ausdrücklich „zur Unterstützung [... des [noch nicht rechtskräftig beschlossenen 6. Umweltaktionsprogramms“ geforscht werden (Kommission der EG 2001a, S.47). Die hiervon bereits vorliegende Vorlage sieht u. a. „die Kofinanzierung der Erforschung und Entwicklung sauberer, innovativer Verfahrenstechnologien sowie die Förderung [deren Verbreitung“ vor (Kommission der EG 2001c, S.60).

Dies steht in Übereinstimmung mit der Strategie der EU-Kommission für die künftige Chemikalienpolitik (Kommission der EG 2001b). Diese umfasst auch – soweit möglich – gefährliche Chemikalien durch wenig bedenkliche Substanzen zu substituieren und entsprechende FuE-Arbeiten zu sauberen chemischen Produktionsprozessen unter Verzicht auf gefährliche Substanzen zu unterstützen.

In der ersten, für den 17.12.2002 geplanten, Ausschreibung sind dabei Projekte zur Identifikation von Barrieren, die der Entwicklung und Verbreitung sauberer integrierter Technologien u. a. in der industriellen Produktion entgegenstehen sowie von Maßnahmen.

Der Kommission der Europäische Union zugeordnet ist das Institute for Prospective Technological Studies (IPTS) in Sevilla, das eines von sieben Instituten des Joint Research Centre ist. Das IPTS hat die Aufgabe, techno-ökonomische Analysen zur Unterstützung europäischer Entscheidungsträgern bereitzustellen. Dazu werden wissenschaftliche und technische Trends analysiert und ihr Einfluss auf künftige Politikentwicklungen bewertet. Im Rahmen seiner Forschungsaktivitäten zu „Greening of Industry“ hat das IPTS seit vielen Jahren Studien zu Stand von Wissenschaft und Technik sowie zur Bewertung biotechnologischer Verfahren im produktionsintegrierten Umweltschutz durchgeführt.

7. Glossar

Batch-Kultivierung/Batch-Fermentation	Fermentation in einem abgeschlossenen Reaktionsgefäß, bei dem zu Beginn Mikroorganismen und Nährmedium zusammengegeben werden und nach Beendigung der Fermentation das Produkt aus der Kulturbrühe aufgereinigt wird
Biochips	wird in zweierlei Bedeutung verwendet 1. kleine Träger aus der elektronischen Chiptechnologie, auf denen biologische Moleküle (DNA, Peptide, Antikörper) befestigt (=immobilisiert) wurden 2. Bauteile, bei denen Komponenten der Mikroelektronik und biologische Moleküle (z. B. Proteine) miteinander gekoppelt sind.
Biotransformation	Einsatz von isolierten Enzymen oder ganzen Mikroorganismen, um Ausgangssubstrate in ein gewünschtes Produkt umzuwandeln
BOD	biological oxygen demand, Maß für die biologische Belastung eines Abwassers, bezeichnet die Menge an Sauerstoff, die zur vollständigen Oxidation aller im Wasser befindlichen organischen Substanzen durch Bakterien und Protozoen benötigt würde
chiral	spiegelsymmetrisch
Coenzym, Cofaktor	ein organisches Molekül, das für die Wirksamkeit eines Enzyms benötigt wird
Enantiomere	Moleküle mit gleicher Struktur und spiegelbildlicher Symmetrie
Enzym	Protein mit katalytischen Eigenschaften
Fermentation, fermentativ	Kultivierung von Mikroorganismen in einem Bioreaktor zum Zwecke der Produktion oder Stoffumwandlung
filamentös	fadenförmig
Genom	Der einfache Satz der Erbsubstanz eines Organismus
Genomics	alle FuE-Aktivitäten, die sich mit dem Genom, d. h. der Gesamtheit aller Gene und ihrer Regulation beschäftigt
Hefe	einzelliger Pilz, häufig Bäckerhefe, wird häufig zur Produktion von Proteinen oder anderen organischen Molekülen eingesetzt
In-silico-Biologie	Simulation biologischer Prozesse am Computer

kontinuerliche Kultivierung/ Fermentation	Fermentation in einem Reaktionsgefäß/ Bioreaktor, der es erlaubt während des gesamten Prozesses frisches Nährmedium zuzuführen und verbrauchtes Nährmedium inklusive Produkt und Mikroorganismen zur weiteren Verarbeitung abzuführen
Nanotechnologie	Technik, die sich mit Systemen beschäftigt, deren neue Funktionen und Eigenschaften allein von nanoskaligen Effekten ihrer Komponenten abhängig sind. Gegenstand der Nanotechnologie ist es, im Größenmaßstab von unter 50 Nanometern (= 50 Milliardstel Meter), die chemischen Eigenschaften und das physikalische Verhalten von Einzelatomen und -molekülen zu identifizieren, zu nutzen und zu beeinflussen.
Proteomics	Untersuchungen zur Expression, Funktion und Wechselwirkungen von miteinander verschalteten Proteinen auf der Basis eines Gemoms
Racemat	optisch inaktives Gemisch einer chemischen Verbindung, das aus gleichen Teilen ihrer beiden enantiomeren (=optisch aktiven) D- und L-Konfigurationen zusammengesetzt ist

8. Literatur

AIST (japanisches „National Institute of Advanced Industrial Science and Technology“): AIST Today Vol. 2, No.5 (2002) 12, 13 http://www.aist.go.jp/aist_e/aist_today/2002_05/2002_05_main.html

Amann, M. (2001): The Lignozym-process –from concept to pilot plant. Conference documentation of EU conference „Biotechnology: environmental technology of the future. The role of biotechnology and genetic engineering in integrated product policy.“, 30th –31st October 2000, Stuttgart. Ed. Ministry of the Environment and Transport Baden-Wuerttemberg

American Chemical Society (ACS) (2002): Green Chemistry Research http://www.chemistry.org/portal/Chemistry?PID=acsdisplay.html&DOC=greenchemistryinstitute\research.html

Anastas, Paul T.; Warner, John C. (1998): Green Chemistry Theory and Practice. New York: Oxford University Press

Anonymous (1996): Neue Aktivitäten bei Biopolymeren. In: Kunststoffe 86, S. 918

Banister, N. E. (2000): Vanilla flavours and biotechnology: A success story. Food Infos

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (BayLfU) (2002): Tätigkeitsbericht 2001

Beilen, J. B. van, Zhi, L. (2002): Enzyme technology: an overview. In: Current Opinion in Biotechnology 13, S. 338-344

Bhat, M. K. (2000): Cellulases and related enzymes in biotechnology. In: Biotechnology Advances 18, S. 355-383

Bollschweiler, C. (2002): With biocatalysis en route to Industrial Sustainability. Vortrag auf der Konferenz „ The Role of Biotechnology in Industrial Sustainability“ 16./17. Mai 2002, Antwerpen, Belgien

Boudouropoulos, I. D.; Arvanitoyannis, I. S. (1999): Current state and advances in the implementation of ISO 14000 by the food industry. Comparison of ISO 14000 and ISO 9000 to other environmental programs. In: Trends in Food Science and Technology 9, S. 395-408

Bruggink, A. (2002): Process technology in fine chemikal industry: a missing link for a sustainable future? ESCAPE, Industrial Forum 28. 5. 2002

Bundesministerium für Bildung und Forschung. Förderrichtlinien zur BMBF-Förderaktivität „Nachhaltige BioProduktion“ im Förderprogramm Biotechnologie 2000. Bekanntmachung vom 20.4.2000 / Pressemitteilung vom 12.7.2000

Bundesministerium für Bildung und Forschung: Pressemitteilung 126/2002 vom 20.6.2002

Busquin, P.; Vandenberghe, K. (2002): The Role of Biotechnology in Industrial Sustainability. Vortrag auf der Konferenz „ The Role of Biotechnology in Industrial Sustainability“ 16./17. Mai 2002, Antwerpen, Belgien

Cammack, R., Frey, M., Robson, R. (2001): Hydrogen as a fuel. Learning from nature. London: Taylor and Francis

Canadian Pollution Prevention Information Clearinghouse (CPPIC) (2002): http://www3.ec.gc.ca/cppic/en/index.cfm

Carparelli, A. (2002): Biotechnology and Sustainable Development. Vortrag auf der Konferenz „ The Role of Biotechnology in Industrial Sustainability“ 16./17. Mai 2002, Antwerpen, Belgien

Claassen, P. A.; Budde, M. A.; López-Contreras, A. M. (2000): Acetone, Butanol and Ethanol production from domestic organice waste by solventogenic clostridia. In: Journal of Molecular Microbiology 2(1), S. 39-44

Community Research & Development Information Service (CORDIS) der Europäischen Kommission: Projects Database (Stand Oktober 2002) http://dbs.cordis.lu/search/en/simple/EN_PROJ_simple.html

De Baets, S.; Vandedrinck, S.; Vandamme, E. J. (2000): Vitamins and related biofactors, microbial production. In: Encyclopedia of Microbiology 4, S. 837-853

Department of Industry, Tourism and Resources (ITR) (2000): National Biotechnology Strategy. Canberra 2000

Department of Trade and Industrie (1999): BIO-WISE - An Introduction to the Programme http://www.biowise.org.uk/docs/1999/publications/Intro_to_Programme.pdf

Department of Trade and Industrie (2000): Some Datasources for UK Suppliers of Industrial Biotechnology Products and Services. http://www.biowise.org.uk/docs/2000/publications/datasources.pdf

Department of Trade and Industrie: BIO-WISE Newsletter Issue 10 Dez. 2001

Effizienzagentur NRW (2002): Biotechnologie: natürlich wirtschaften. Prozesse mit Potenzial. Informationsschrift (www.efanrw.de)

Environmental Technology Advancement Directorate (ETAD) (2002): http://www.ec.gc.ca/etad/Assets/Factsheetsenglishpdfs/FS-01_ETAD.PDF

Etschmann, M.; Gebhardt, P.; Sell, D. (1999): Ökonomische und ökologische Vorteile durch die industrielle Anwendung biotechnologischer Verfahren. Herausgegeben vom Karl-Winnacker-Institut. http://kwi.dechema.de/biovt/deutsch/textber.htm

Faaij, A.; Patel, M.; Lewandowski, I. (2002): Biotechnology for Energy. Vortrag auf der Konferenz „ The Role of Biotechnology in Industrial Sustainability“ 16./17. Mai 2002, Antwerpen, Belgien

Fladung, M. (2000): Hilft die Gentechnik der Forstpflanzenzüchtung. Stellungnahme des Instituts für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung. www.rrz.uni-hamburg.de/GeneTree/2000_graupa.pdf

Forskningsråd (2002): About the Research Council of Norway / The Bioproduction and Processing Division. http://www.forskningsradet.no/english/

Fraunhofer-Gesellschaft (2002): Die Fraunhofer-Gesellschaft von A bis Z.

Gerday, C.; Aittaleb, M.; Bentahir, M.; Chessa, J.-P. et al. (2000): Cold-adapted enzymes: from fundamentals to biotechnology. In: TIBTECH 18(3), S. 103-107

Griffiths, M. (2002): The application of biotechnology to industrial sustainability – an OECD study. Vortrag auf der Konferenz „ The Role of Biotechnology in Industrial Sustainability“ 16./17. Mai 2002, Antwerpen, Belgien

Grothe, E. (2000): Konzeption und Wirtschaflichkeit der industriellen Glycerinvergärung zu 1,3-Propandiol. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 17: Biotechnik/Medizintechnik. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH

Hartmans, S. (2002): Removal of chlorinated residuals from wet-strength paper additives using micro-organisms and enzymes. Vortrag auf der Konferenz „ The Role of Biotechnology in Industrial Sustainability“ 16./17. Mai 2002, Antwerpen, Belgien

Heiden; Bock; Antranikian (Hrsg.): Industrielle Nutzung von Biokatalysatoren. Berlin 1999

Hofvendahl, K.; Hahn-Hägerdal, B. (2000): Factors affecting the fermentative lactic acid production from renewable resources. In: Enzyme and Microbial Technology 26 (2-4), S. 87-107

Holbert, A. (1997): Cargilss, CSM´s PURA hold groundbreaking for lactoc acid plants. www.cargil.com

Hu, W.-J.; Harding, S. A.; Lung, J.; Popko, J. L.; Stokke, D. D.; Tsai, C.-J.; Chiang, V. L. (1999): Repression of lignin biosynthesis promotes cellulose accumulation and growth in transgenic trees. In: Nature Biotechnology 17, S. 808-812

Huismanm, G. W.; Gray, D. (2002): Towards novel processes for the fine-chemical and pharmaceutical industries. In: Current Opinion in Biotechnology 13, S. 352-258

Hüsing, B. (1998): International Collaboration on Bio-Hydrogen R&D. Report for the Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE), Tokyo, Japan. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research

Hüsing, B.; Angerer, G.; Gaisser, S.; Marscheider-Weidemann, F. (2002): Biotechnologische Herstellung von Wertstoffen unter besonderer Berücksichtigung von Energieträgern und Biopolymeren aus Reststoffen. Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben FKZ 200 66 301 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (noch nicht zur Veröffentlichung freigegeben)

Hüsing, B.; Gießler, S.; Jaeckel, G. (1998): Stand der Möglichkeiten von prozessintegrierten Präventivtechniken zur Vermeidung bzw. Verringerung von Umweltentlastungen. UBA-Texte 68/98. Umweltbundesamt 1998

Hüsing, B.; Jaeckel, G.; Marscheider-Weidemann, F. (1997): Potenziale und Entwicklungen im Bereich der Katalysatoren- und Enzymtechnik. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung

Hüsing, B.; Jaeckel, G.; Wörner, S.; Würth, A. (2000): The introduction of process-integrated biocatalysts in companies – effect of dynamics in internal and external networks. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS) Sevilla

Jaworski, J. F.; Minns, D. E. (2001): Technology innovations and Cleaner Production: possibilities and limitations. In: UNEP Industry and Environment, Vol. 24, N°1-2 – Cleaner Production

Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2001a): Vorschläge für ENTSCHEIDUNGEN DES RATES über die spezifischen Programme zur Durchführung des Rahmenprogramms 2002-2006 der Europäischen Gemeinschaft im Bereich der Forschung, technologischen Entwicklung und Demonstration. Brüssel, 30.5.2001

Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2001b): WHITE PAPER Strategy for a future Chemicals Policy. Brussels, 27.2.2001

Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2001c): Sechstes Umweltaktionsprogramm – Vorschlag für einen Beschluss des Europäischen Parlaments und des Rates über das Umweltaktionsprogramm 2001-2010 der Europäischen Gemeinschaft. KOM (2001) 31, Brüssel, 24.1.2001

Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2002): Umwelttechnologie für eine nachhaltige Entwicklung. KOM (2002) 122, Brüssel, den 13.03.2002 http://europa.eu.int/eur-lex/de/com/cnc/2002/com2002_0014de01.pdf

KoWi – Koordinierungsstelle EG der Wissenschaftsinformationen (2002a): Infos zum 6. Rahmenprogramm – Priority 5: Food Quality and Safety – Draft Workprogramme 23/10/02. http://www.kowi.de/rp6/dokumente/download/WP_5_23102002.pdf

KoWi – Koordinierungsstelle EG der Wissenschaftsinformationen (2002b)). Infos zum 6. Rahmenprogramm – Specific support to policies – Working draft document 08/10/02. http://www.kowi.de/rp6/dokumente/download/SP1-SSPs_draft.pdf

KoWi – Koordinierungsstelle EG der Wissenschaftsinformationen (2002c): Infos zum 6. Rahmenprogramm – Thematic Area 3: Nanotechnology and nanosciences, knowledge-based multifunctional materials, new produktion processes and devices – Draft Workprogramme – Draft 6 November. http://www.kowi.de/rp6/dokumente/download/wp_3_02-11-06.pdf

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA) (2002): Anlagen/Umwelttechnik. http://www.lua.nrw.de/themen/home06anlagen.htm

Liese, A.; Seelbach, K.; Wandrey, C. (2000): Industrial Biotransformation. Weinheim, New York: Wiley-VCH, ISBN 3-527-30094-5

Menrad, K.; Gaisser, S.; Hüsing, B.; Menrad, M. (2002): Gentechnik in der Landwirtschaft, Pflanzenzucht und Lebensmittelproduktion – Stand und Perspektiven. Physika Verlag 2002

Ministerie van Economische Zaken (MINEZ) (2000): Schone technologie bevorderen. http://www.minez.nl/publicaties/pdfs/24B105.pdf

Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) (2002): Basic Industries Bureau. http://www.meti.go.jp/english/aboutmeti/data/a227004e.

Novo Nordisk (1995): Environmental performance of industrial enzymes. EcoDoc May 1995, Bagasvaerd (DK): Novo Nordisk A/S 1995

Novo Nordisk (1997): Biotechnology for cleaner production. Written information

O´Brien, M. (2000): Cargill Dow LLC Breaks Ground on First World-Scale PLA Facility. www.cargildow.com

OECD (1998): Biotechnology for clean industrial products and processes. Towards industrial sustainability. ISBN 92-64-16102-3

OECD (2001): The Application of Biotechnologie to Industrial Sustainability. Paris: OECD Publications

OECD (2001): The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability. ISBN 92-64-195646-7

Ohman, J. (2000): Kunststoffe aus natürlichen Pflanzenzuckern werden weltweit Realität. www.cdpoly.com

Rabenhorst, J. (2002): Biotechnological production of natural Vanillin. Vortrag auf der Konferenz „The Role of Biotechnology in Industrial Sustainability“ 16./17. Mai 2002, Antwerpen, Belgien

Ranta, B.; Pajunen, E. (2002): Immobilized yeast systems in beer production. Vortrag auf der Konferenz „The Role of Biotechnology in Industrial Sustainability“ 16./17. Mai 2002, Antwerpen, Belgien

Reiß, T.; Hüsing, B. (Bdhrsg.) (1993): Biologische Wasserstoffgewinnung – Forschungsperspektiven und Technikfolgen. Köln: Verlag TÜV Rheinland (Schriftenreihe Zukunft der Technik)

rubitec – Gesellschaft für Innovation und Technologie der Ruhr-Universität Bochum mbH (2001): Potenzial der Biotechnologie im produktionsintegrierten Umweltschutz an den Hochschulen und Forschungseinrichtungen des Landes Nordrhein-Westfalen. Bochum, April 2001

Rüdiger, C. (2000): Synthesen und Untersuchungen zum Polymerisationsverhalten von Itaconsäurederivaten. Dissertation. Wuppertal: Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG) (2001): Umweltforschungsplan des LfUG für 2001/2002 – Forschung in den Bereichen Umwelt und Gentechnik/Biotechnologie, Stand Juli 2002

Sauter, A. (1996): Monitoring „Stand und Perspektiven der Katalysatoren- und Enzymtechnik“ Sachstandsbericht. Arbeitsbericht Nr. 46, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Bonn

Schell von, T.; Mohr, H. (1995): Biotechnologie - Gentechnik, Eine Chance für neue Industrien. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag

Schiraldi, C.; De Rosa, M. (2002): The production of biocatalysts and biomolecules from extremophiles. In: Trends in Biotechnology 20(12), S. 515-521

Schmid, A.; Hollmann, F.; Park, J. B.; Bühler, B. (2002): The use of enzymes in the chemical industry in Europe. In: Current Opinion in Biotechnology 13, S. 359-366

Schmidt, K.; Ronning, A.; Karlsson, M (2002): Efficient life cycle based communication on the market. Präsentation Euro Environment Conference 21.-25.10.2002

Schönberger, H. (1994): Reduktion der Abwasserbelastung in der Textilindustrie. UBA-Texte 3/94. Umweltbundesamt, Berlin

Sharma, R.K., Yadav, K.R., Maheshwari. V.L., Kothari, R.M. (2000): Bagasse proeservation: a need for a biotechnological approach. In: Critical Reviews in Biotechnology 20(4), S. 237-263

Sorup, P.; Tils, C.; Wolf, O. (1998): Biocatalysis: state of the art in Europe. Economic and environmental benefits of a process integrated technology. European Commission, Joint Research Centre (DG JTC), Institute of Prospective Technological Studies. Report EUR 18680 EN

Suomen Akatemia (2002): http://222.aka.fi

Sutherland, I. W. (2001): Microbial polysaccharides from Gram-negative bacteria. In: International Dairy Journal, S. 663-674

TEKES (2002): Tekes Technology Programmes. Bio- and Chemical Technologie: NeoBio - Novel Biotechnology 2001-2005. http://akseli.tekes.fi/Resource.phx /bike/neobio/en/index.htx

Thoresen, J. (1999): Environmental performance evaluation – a tool for industrial improvement. In. Journal for Cleaner Production 7, S. 365-370

Thoresen, J. (2001): Evaluation and Monitoring of eco efficiency – Ora Ecopark example. Präsentation ISIE-Conference 12-14.11.2001

Tzanov, T.; Calafell, M.; Guebitz, G. M.; Cavaco-Paulo, A. (2001): Bio-preparation of cotton fabrics. In: Enzyme and Microbial Technology 29, S. 357-362

U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), National Biomass Coordination Office (2001): Biomass R & D Technical Advisory Committee Recommendations. http://www.bioproducts-bioenergy. gov/pdfs/AdvisoryCommitteeRDRecommandations.pdf

U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), National Biomass Coordination Office (2002): Biomass Research & Development Initiative – About the Initiative. http://www.bioproducts-bioenergy.gov/about.asp

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2002a): Past Award Entries and Recipients http://www.epa.gov/greenchemistry/past.html

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2002b): Educational Activities. http://www.epa.gov/greenchemistry/educat.html

Umweltforschungszentrum Leipzig - Halle GmbH (UFZ) (2002): Umweltbiotechnologisches Zentrum (UbZ). http://www.ufz.de/(de)/spb/ ubz/index.html

UNEP DTIE (2001): Financing Cleaner Production http://www.financingcp.org

UNEP DTIE (2002): 7th High-level Seminar on Cleaner Produktion, Prag, April 2002. http://www.uneptie.org/pc/cp7/

Varadarajan, S.; Miler, D. J. (1999): Catalytic upgrading of fermentation derived organic acids. In: Biotechn. Progs. 15, S. 845-854

Videbaek, T. (1997): persönliche Mitteilung. Abt. Lebensmittelenzyme, Novo Nordisk, Bagsvaerd, Dänemark

Vigsoe, D.; Jürgensen, E.; Kvistgaard, M. (2002): The assessment of future environmental and economic impacts of process-integrated biocatalysts. European Commission, Joint Research Centre (DG JTC), Institute of Prospective Technological Studies. Report EUR 20407 EN

VITO – Vlaamse instelling voor technologisch onderzoek (2002): http://www.vito.be

VTT (2002a): Annual Report 2001. http://www.vtt.fi/annualreport/annual01.pdf

VTT (2002b): Process Technology http://www.vtt.fi/bel/2000process_technology/index.htm

Welter, K. (2000): Biotechnische produktion von Itaconsäure aus nachwachsenden Rohstoffen mit immobilisierten Zellen. Dissertation,. Braunschweig: Technische Universität Carolo-Wilhelmina

Widmann, B.; Stelzer, T.; Remmele, E.; Kaltschmitt, M. (2001): Produktion und Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen. In: (Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Eds.): Energie aus Biomasse. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, ISBN 3-540-64853-4

Willke, T.; Vorlop, K.-D. (2001): Biotechnological production of itaconic acid. In. Applied Microbiology and Biotechnology 56, S. 289-295