

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT
- Vollzugsunterstützung zum Stoffrecht -

Forschungsbericht 298 67 411
UBA-FB 000131



**Substitution chemisch-
technischer Prozesse durch
biotechnische Verfahren am
Beispiel ausgewählter Grund-
und Feinchemikalien**

von

**Andreas Brellochs
Anja Schmolke
Dr. Heimfrid Wolff**

Prognos AG, Basel

Projektleiter:

Klaus Kämpf

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese TEXTE-Veröffentlichung kann bezogen werden bei
Vorauszahlung von DM 20,-- (10,26 Euro)
durch Post- bzw. Banküberweisung,
Verrechnungsscheck oder Zahlkarte auf das

Konto Nummer 4327 65 - 104 bei der
Postbank Berlin (BLZ 10010010)
Fa. Werbung und Vertrieb,
Ahornstraße 1-2,
10787 Berlin

Parallel zur Überweisung richten Sie bitte
eine schriftliche Bestellung mit Nennung
der **Texte-Nummer** sowie des **Namens**
und der **Anschrift des Bestellers** an die
Firma Werbung und Vertrieb.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet II 2.1, Dr. med. habil. Jutta Dürkop
Fachgebiet III 1.1, Dr. Wolfgang Dubbert

Berlin, März 2001

Vorwort

Biotechnologische Verfahren werden von Alters her in der Lebensmittelherstellung angewandt. Unter Nutzung gentechnischer Methoden haben sich diese Verfahren seit etwa 20 Jahren auch in der Pharma- und der Wasch- und Reinigungsmittelindustrie einen festen Platz im produzierenden Bereich erobert. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Biotechnologie nicht nur zu den Technologien mit innovativen Problemlösungen gehört, sondern auch umweltverträgliche Potenziale im Bereich der industriellen Produktion und Umwelttechnik besitzt. Dies geht aus einer Reihe von Vorhaben hervor, die im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt wurden.

Bereits auf dem im Dezember 1996 vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und Umweltbundesamt (UBA) durchgeführten Fachgespräch „Beitrag der Biotechnologie zu einer nachhaltigen, umweltgerechten Entwicklung“ wurde deutlich, dass es auch im Bereich der chemischen Industrie Anwendungen biotechnischer Verfahren gibt. Eine erste Recherche hierzu wurde vom Verein der Bayerischen Chemischen Industrie e.V. vorgetragen. Neben den bestehenden Einsatzgebieten zeichneten sich zusätzliche Substitutionspotenziale in diesem Industriezweig ab.

Vor diesem Hintergrund hat das UBA das Forschungsvorhaben „Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren am Beispiel ausgewählter Grund- und Feinchemikalien“ initiiert, in welchem beispielhaft zu untersuchen war, ob und inwieweit biotechnische Verfahren die traditionellen chemisch-technischen Verfahren insbesondere zur Herstellung chlororganischer und sauerstoffhaltiger Grundchemikalien und Feinchemikalien (möglichst jenseits „Life Sciences“), einschließlich solcher Chemikalien, die mittels chlornutzender Verfahren hergestellt werden, ablösen können.

Die Prognos AG Basel hat dieses Vorhaben im Auftrag des UBA mit Mitteln des BMU bearbeitet und nunmehr einen Bericht vorgelegt, den wir der wissenschaftlichen und interessierten Öffentlichkeit vorlegen möchten.

Wenngleich wir nicht in allen Punkten die Auffassungen der Autoren teilen und ihren Empfehlungen folgen können, so erhoffen wir uns doch eine rege Diskussion. Das von den Autoren zusammengestellte Material bietet zahlreiche Anregungen. Es kann daher eine Grundlage für weiterführende Arbeiten sein, die der Biotechnologie auch im Bereich der chemischen Industrie zu einem weiteren Durchbruch verhelfen können.

Dr. med. habil. Jutta Dürkop und Dr. Wolfgang Dubbert

Umweltbundesamt

Berlin, im Februar 2001

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 000131	2.	3.
4. Titel des Berichts Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren am Beispiel ausgewählter Grund- und Feinchemikalien		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Kämpf, Klaus; Brelochs, Andreas; Schmolke, Anja; Wolff, Heimfrid	8. Abschlußdatum Oktober 2000	
	9. Veröffentlichungsdatum	
	10. UFOPLAN-Nr. 298 67 411	
	11. Seitenzahl 203	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Prognos AG Missionsstr. 62 CH-4012 Basel	12. Literaturangaben 185	
	13. Tabellen und Diagramme 7	
	14. Abbildungen 9	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Postfach 33 00 22 D-14191 Berlin		
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Biotechnische Prozesse zur Herstellung von Chemikalien gelten im Vergleich zu den herkömmlichen chemisch-technischen Prozessen als umweltverträglicher. Über den Einsatz biotechnischer Verfahren im Bereich Grund- und Feinchemikalien lagen bislang nur verstreute Einzelinformationen vor. In diesem Forschungsbericht wird der Stand von Entwicklung und Anwendung biotechnischer Verfahren dargestellt. Untersuchungsbereich sind Grund- und Feinchemikalien, die in grosstechnischem Maßstab mit chemisch-technischen Verfahren hergestellt werden. Es erfolgt eine Abschätzung des Umweltentlastungs- bzw. -belastungspotentials, das mit dem Einsatz biotechnischer Verfahren verknüpft wäre. Anhand der Fallbeispiele Aceton/Butanol, 1,3-Propandiol, Vitamin C und Adipinsäure werden ökologische, ökonomische und rechtliche Aspekte der Anwendung biotechnischer Verfahren herausgearbeitet. Es werden die Voraussetzungen für den Einsatz biotechnischer Verfahren sowie Hemmnisse benannt. Ferner enthält dieser Bericht Hinweise zur Gestaltung von öffentlich geförderten Demonstrationsvorhaben.		
17. Schlagwörter Biotechnologie, Grundchemikalien, Feinchemikalien, Chemische Industrie, Umweltentlastung, Hemmnisse, Forschungsbedarf, Demonstrationsanlage		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 000131	2.	3.
4. Report Title Substitution of chemical processes for the production of selected bulk and fine chemicals by biotechnological processes		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Kämpf, Klaus; Brellochs, Andreas; Schmolke, Anja; Wolff, Heimfrid	8. Report Date October 2000	
	9. Publication Date	
	10. UFOPLAN-Ref. No. 298 67 411	
	11. No. of Pages 203	
6. Performing Organisation (Name, Address) Prognos AG Missionsstr. 62 CH-4012 Basel	12. No. of References 185	
	13. No. of Tables, Diagrams 7	
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt Postfach 33 00 22 D-14191 Berlin	14. No. of Figures 9	
	15. Supplementary Notes	
16. Abstract Compared to current chemical processes, biotechnological processes for the production of chemicals are considered environmentally friendly. Hitherto there was no complete overview on the use of biotechnological processes for the production of bulk and fine chemicals. This study considers bulk and fine chemicals which are produced on industrial scale by chemical processes. The report describes the present state of process development and current use of biotechnology. The potential positive and negative environmental effects of a substitution of chemical processes by biotechnological processes are estimated. Acetone/butanol, 1,3-propanediol, ascorbic acid, and adipic acid are considered in detail regarding ecological, economic, and legal aspects of biotechnological production. Requirements are pointed out for the use of biotechnological processes as well as hindrances. The report contains hints for the design of model plants supported by public money.		
17. Keywords Biotechnology, bulk chemicals, fine chemicals, chemical industry, environmental protection, hindrances, research needs, model plant		
18. Price	19.	20.

Inhalt

Inhaltsverzeichnis	1
Verzeichnis der Abbildungen	3
Verzeichnis der Tabellen	4
Glossar (Fachbegriffe und Abkürzungen)	5
Kurzfassung	13
Executive Summary	17
1. Einleitung	21
2. Stand der Entwicklung und Anwendung biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien	26
3. Abschätzung des Umweltentlastungspotentials durch den Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien	38
4. Fallbeispiele	49
4.1 Aceton/Butanol	50
4.2 1,3-Propandiol	84
4.3 Vitamin C	99
4.4 Adipinsäure	112
4.5 Schlußfolgerungen aus der Betrachtung der Fallbeispiele	122
5. Voraussetzungen für den Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien	127
6. Hinweise zur Gestaltung von Demonstrationsvorhaben	137
7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	142
Literatur	155

Anhang

A.1	Charakterisierung ausgewählter Verfahren (Kennblätter)	171
A.2	Liste der im Zuge der Untersuchung kontaktierten Unternehmen und Institutionen	199
A.3	Programm des Workshops vom 8. Juli 1999	201
A.4	Teilnehmer des Workshops	202

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1:	Chemisch-technische Herstellung von Aceton (Hockverfahren)	54
Abbildung 2:	Chemisch-technische Herstellung von Butanol (Oxoverfahren)	55
Abbildung 3:	Biotechnische Herstellung von Aceton und Butanol (Technische Universität Wien)	61
Abbildung 4:	Chemisch-technische Herstellung von 1,3-Propandiol (Acrolein-Verfahren)	86
Abbildung 5:	Biotechnische Herstellung von 1,3-Propandiol aus Rohglycerin (Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft)	88
Abbildung 6:	Reichstein-Synthese zur Herstellung von Vitamin C	102
Abbildung 7:	Herstellung von Vitamin C nach Ning	103
Abbildung 8:	Chemisch-technische Herstellung von Adipinsäure	114
Abbildung 9:	Biotechnische Herstellung von Adipinsäure (Purdue-Universität)	115

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe – Gruppe 1a: Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang üblich	31
Tabelle 2:	Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe – Gruppe 1b: Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang geplant	33
Tabelle 3:	Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe – Gruppe 2: Biotechnisches Verfahren durch chemisch-technisches abgelöst	33
Tabelle 4:	Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe – Gruppe 3: Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium	34
Tabelle 5:	Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe – Gruppe 4: Realisierungsstatus des biotechnischen Verfahrens unklar	36
Tabelle 6:	Vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung: Bewertung der Umweltentlastungs- bzw. -belastungspotentiale im direkten Vergleich zwischen chemisch-technischen und biotechnischen Verfahren (Tendenzen)	46
Tabelle 7:	Typische Stoff- und Energiebilanz für den Weizmann-Prozeß mit <i>Clostridium acetobutylicum</i> (Substrat Glucose)	57

Glossar: Fachbegriffe und Abkürzungen¹

Aerob	In Anwesenheit von Sauerstoff
Anaerob	Unter Ausschluß von Sauerstoff
Aufarbeitung	Verfahrensschritte, die ausgehend von der Fermentationsbrühe (bzw. bei trägergebundenen Zellen/Enzymen von der umgesetzten Lösung) zum Endprodukt führen. Die Aufarbeitung umfaßt Abtrennung, Reinigung und Konzentration des Produkts.
Ausbeute	Menge der Produkte einer Reaktion in Bezug auf die Menge der Eingangsstoffe [g Produkte/g Edukte]
Batchverfahren	Diskontinuierliches Verfahren: Chargenweise Umsetzung der Edukte
Biogen	Biologischen Ursprungs
Biokatalysatoren	Innerhalb oder außerhalb von lebenden oder abgetöteten Zellen befindliche Enzyme, die Stoffumwandlungen katalysieren
Biomasse	Lebende und tote Organismen bzw. Teile davon, einschließlich der von Organismen produzierten organischen Stoffe
Bioreaktor	Reaktionsgefäß für biotechnische Prozesse
Biotechnik	"Technische Nutzung des Potentials von Mikroorganismen, pflanzlichen und tierischen Zellen sowie Teilen dieser zum Zweck der Produktsynthese oder Stoffwandlung" (Definition der European Federation of Biotechnology). Vgl. Biotechnologie
Biotechnologie	Biotechnik (als Gesamtheit der technischen Kenntnisse, Fähigkeiten und Möglichkeiten zur Nutzung biologischer Systeme) und ihre gesellschaftlichen Zusammenhänge. Vgl. Biotechnik
Biotransformation	Stoffumwandlung unter Nutzung biotechnischer Methoden
Bioverfahrenstechnik	Verfahrenstechnik zur Umsetzung biologischer Prozesse in biotechnische Prozesse. Siehe Verfahrenstechnik

¹ Abkürzungen für Gesetze und Verordnungen finden sich im Literaturverzeichnis.

Bulkchemikalien	Synonym für Grundchemikalien (siehe dort)
Chirale Verbindungen	Synonym für Enantiomere (siehe dort)
Chlororganisch	Unter Beteiligung von chlorhaltigen organischen Verbindungen
CO₂	Kohlendioxid. Klimarelevantes Gas
Degeneration	Teilweiser oder vollständiger Verlust der Fähigkeit eines Mikroorganismus zur Herstellung eines Produkts über mehrere Generationen.
Diskontinuierliche Verfahren	Synonym für Batchverfahren (siehe dort)
DNA	Desoxyribonucleinsäure. Erbsubstanz (Träger der Erbinformation)
Edukt	Eingangsstoff einer Stoffumwandlung
Emission	Eintrag von Stoffen, Mikroorganismen oder Energie in die Umwelt
Enantiomere	Stereoisomere, die sich zueinander wie Bild und Spiegelbild verhalten. Enantiomere haben ähnliche physikalische Eigenschaften, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer biologischen Eigenschaften
Endotherme Reaktion	Reaktion, die Wärme benötigt
Enzymatisch	Definition im Rahmen dieser Untersuchung: Nutzung von aus dem Zellverband isolierten oder in abgetöteten Zellen belassenen Enzymen
Enzyme	Proteine (Eiweiße), die Stoffumwandlungen katalysieren
Erneuerbare Rohstoffe	Synonym für Nachwachsende Rohstoffe (siehe dort)
Exotherme Reaktion	Reaktion, bei der Wärme frei wird
Exposition	Art, Intensität und Dauer einer Immission
Extremophile Organismen	Organismen, die unter extremen Bedingungen (z.B. bezüglich Temperatur, pH, Schwefelgehalt) lebens- und vermehrungsfähig sind. Vgl. Mesophile Organismen, Thermophile Organismen
Feedstock	Eingangsstoffe (Edukte) einer Stoffumwandlung

Feinchemikalien	Uneinheitlich verwendeter Marketingbegriff. Definition im Rahmen dieser Untersuchung: Stoffe, die in kleineren Mengen hergestellt werden und eine höhere Wertdichte (über ca. 2 bis 5 DM/kg) aufweisen als Grundchemikalien. Die Begriffe Spezialitäten und Feinchemikalien werden häufig synonym gebraucht
Fermentation	Mikrobiologisches oder enzymatisches Verfahren
Fermentationsbrühe	(In der Regel wäßriges) Gemisch aus Edukten, Biokatalysatoren und Produkten, in dem Fermentationen ablaufen
Fossile Rohstoffe	Rohstoffe fossilen Ursprungs (Kohle, Erdöl, Erdgas)
Freisetzung	Im Sinne des GenTG: Gezieltes Ausbringen gentechnisch veränderter Organismen in die Umwelt
Genom	Erbinformation eines Organismus
Gentechnik	"Erzeugung gentechnisch veränderter Organismen sowie Verwendung, Vermehrung, Lagerung, Zerstörung oder Entsorgung sowie der innerbetriebliche Transport gentechnisch veränderter Organismen, soweit noch keine Genehmigung für die Freisetzung oder das Inverkehrbringen zum Zweck des späteren Ausbringens in die Umwelt erteilt wurde" (GenTG)
Gentechnische Methoden	Im Sinne des GenTG: Methoden zur Veränderung des genetischen Materials in einer Weise, wie sie unter natürlichen Bedingungen durch Kreuzen oder natürliche Rekombination nicht vorkommt
Großtechnischer Maßstab	Bezeichnung Anlagen, die der Produktion von Stoffen dienen (und nicht der Weiterentwicklung des Prozesses)
Grundchemikalien	In großen Mengen hergestellte Stoffe von geringer Wertdichte (maximal ca. 2 bis 5 DM/kg), die in der Regel als Eingangs- oder Hilfsstoffe in der chemischen Industrie dienen. Synonyme: Bulkchemikalien, Massenchemikalien
GVO	Gentechnisch veränderte Organismen
Immission	Einwirkung von (ggf. im Zuge der Ausbreitung umgewandelten) Emissionen auf Mensch oder Umwelt. Vgl. Exposition
Immobilisierte Enzyme	An ein Trägermaterial fixierte Enzyme. Gegensatz: Freie Enzyme

Immobilisierte Zellen	An ein Trägermaterial fixierte Zellen. Gegensatz: Suspendierte Zellen
Immobilisierung	Verfahren zur Fixierung von Zellen oder Enzymen an ein Trägermaterial
In vitro	Außerhalb von lebenden Zellen
In vivo	Innerhalb von lebenden Zellen
Inhibition	Hemmung der Fermentation, z.B. aufgrund der Giftigkeit von Edukten (Eduktinhibition) oder Produkten (Produktinhibition) für die verwendeten Mikroorganismen. Zumeist durch unphysiologisch hohe Konzentrationen hervorgerufen
Katalysatoren	Stoffe, die die Geschwindigkeit von Stoffumwandlungen erhöhen, ohne selbst verbraucht zu werden
Klassische Biotechnik	Biotechnische Verfahren, die keine gentechnischen Methoden verwenden
Kleintechnischer Maßstab	Synonym für Pilotanmaßstab (siehe dort)
Kontinuierliche Verfahren	Gegensatz: Diskontinuierliche Verfahren (siehe Batchverfahren)
Kuppelproduktion	Verfahren, die mehrere nutzbringend verwendbare Produkte liefern
Kurzfristig	Im Rahmen dieser Untersuchung: Zeithorizont etwa 5 Jahre
Labormaßstab	Erstes Stadium einer Verfahrensentwicklung
Langfristig	Im Rahmen dieser Untersuchung: Zeithorizont etwa 20 bis 50 Jahre
Life science	(Marketing-)Sammelbegriff für Pharma-, Pflanzenschutz- und Tiergesundheitsprodukte
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration (vgl. DFG 1998)
Massenchemikalien	Synonym für Grundchemikalien (siehe dort)
Mesophile Organismen	Organismen, die bei gemäßigten Temperaturen (ca. 20 bis 37°C) leben und vermehrungsfähig sind

Mikrobiologische Verfahren	Nutzung des Stoffwechsels lebender Mikroorganismen (wachsende oder ruhende Zellen)
Mikroorganismen	"Zelluläre oder nichtzelluläre mikrobiologische Einheiten, die zur Vermehrung oder zur Weitergabe von genetischem Material fähig sind" (BioStoffV)
Mittelfristig	Im Rahmen dieser Untersuchung: Zeithorizont etwa 10 bis 20 Jahre
MJ	Megajoule (10^6 Joule). Maß für Energie
Moderne Biotechnik	Biotechnische Verfahren, die gentechnische Methoden verwenden
Mutation	Plötzlich auftretende Veränderungen im Erbgut von lebenden Organismen
N₂O	Distickstoffoxid (Lachgas). Klimarelevantes und zum Abbau stratosphärischen Ozons beitragendes Gas
Nachhaltige Entwicklung	Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen (Definition der Brundtland-Kommission)
Nachwachsende Rohstoffe	Land- oder forstwirtschaftlich gewonnene Rohstoffe. Vgl. Nicht-erneuerbare Rohstoffe
Nicht-erneuerbare Rohstoffe	Mineralische und fossile Rohstoffe. Vgl. Nachwachsende Rohstoffe
NO_x	Sammelbezeichnung für Stickoxide (NO, NO ₂ , etc.). Stickoxide sind an der Bildung von Sommersmog beteiligt und sind teilweise toxisch
Ökotoxikologie	Wissenschaft von den Auswirkungen von Stoffen auf die belebte Natur
Pflanzen-biotechnologie	Veränderung von Nutzpflanzen, sowie Schädlingsbekämpfung oder Düngung unter Nutzung biotechnischer Methoden
pH	Maß für die Konzentration an Wasserstoffionen in einer Flüssigkeit ("Säure-/Alkaligehalt") [Dimensionslos]

Pilotanlage	Anlage, die hinsichtlich Größe und Entwicklungsstadium über den Labormaßstab hinausgeht und der verfahrenstechnischen Weiterentwicklung dient
Pilotmaßstab	Zweites Stadium einer Verfahrensentwicklung (vgl. Pilotanlage). Synonym: Kleintechnischer Maßstab
Produkt	Endstoff einer Stoffumwandlung
Produktabtrennung	Siehe Produktisolation
Produktisolation	Gewinnung der Produkte aus einem Reaktionsgemisch (im Fall fermentativer Verfahren: aus der Fermentationsbrühe). Synonym: Produktabtrennung.
Produktivität	Synonym für Umsatzungsrate (siehe dort)
PTT	Polytrimethylenterephthalat (Polyester auf der Basis von 1,3-Propandiol)
Racematen	Gemische gleicher Mengen optisch aktiver Substanzen. Vgl. Enantiomere
Racematentrennung	Trennung eines racemischen Gemisches. Vgl. Racematen
Rekombinante DNA	DNA-Molekül, die sich aus DNA-Abschnitten von verschiedenen Spezies zusammensetzt
Ruhende Zellen	Lebende, aber sich nicht vermehrende Zellen
Scale up	Maßstabsvergrößerung: Übertragung eines Verfahrens aus dem Labor- über den Pilot- auf den großtechnischen (Produktions-)Maßstab
Schlempe	Rückstand aus vergorener Maische nach Abtrennung des Produkts
Screening	Systematische Suche nach geeigneten Mikroorganismen für einen biotechnischen Prozeß
Sicherheitsstufen	Im Sinne des GenTG: Gruppen gentechnischer Arbeiten nach ihrem Gefährdungspotential
Stereoisomere	Verbindungen mit derselben Summenformel und Konstitution, deren Atome sich hinsichtlich der räumlichen Anordnung unterscheiden. Kennzeichnung durch vorangestelltes R,S oder D,L

Substrate	Eingangsstoffe (Edukte) für biotechnische Prozesse
Suspendierte Zellen	Zellen, die sich frei (nicht an ein Trägermaterial fixiert) in der Fermentationsbrühe befinden. Gegensatz: Immobilisierte Zellen
Synthese	Gewinnung von Stoffen mit verfahrenstechnischen Methoden
Thermophile Organismen	Organismen, die bei extremen Temperaturen (deutlich über 37°C) leben und vermehrungsfähig sind
Umsetzungsrate	Pro Zeit- und (Fermenter-)Volumeneinheit umgesetzte Menge Substrat [g/(l h)]. Maß für die (räumlich-zeitliche) Produktivität eines Syntheseverfahrens
Verfahrensparameter	Den Ablauf eines verfahrenstechnischen Prozesses bestimmende Meßgrößen (insbesondere Druck, Temperatur, pH, Stoffkonzentrationen)
Verfahrenstechnik	Wissenschaft von der Umsetzung chemischer/physikalischer Prozesse in den technischen Maßstab. Auch Bezeichnung für die Technologie bzw. die Apparaturen zur Umsetzung der Prozesse
Wachsende Zellen	Sich vermehrende Zellen
WGK	Wassergefährdungsklasse (gemäß VwVwS)

Kurzfassung

(1) Die Biotechnik wird als Schlüsseltechnologie betrachtet und verspricht eine teilweise Umwälzung herkömmlicher chemisch-technischer Produktionsverfahren, neuartige Produkte, Analyse- und Diagnosemethoden, Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft usw. Daran knüpfen sich entsprechende Erwartungen hinsichtlich der Sicherung oder Schaffung von Arbeitsplätzen und einer technologischen Spitzenposition Deutschlands. In diesem Sinne werden positive Beiträge von Biotechnik zu allen drei Dimensionen einer Nachhaltigen Entwicklung (ökonomisch – ökologisch – sozial) erwartet.

(2) Biotechnische Verfahren zur Herstellung von Chemikalien unterscheiden sich in vielfältiger Hinsicht von den üblichen chemisch-technischen Prozessen:

- Die Eingangsstoffe (Substrate) sind häufig biologischen Ursprungs.
- Die Prozesse erfolgen in der Regel unter milden Reaktionsbedingungen.
- Der Umgang mit (z.B. hinsichtlich Toxizität) problematischen Stoffen ist seltener.
- Die Produkte und Nebenprodukte sind zumeist gut biologisch abbaubar.

Daher gelten biotechnische Prozesse zur Herstellung von Chemikalien im Vergleich zu chemisch-technische Synthesen im allgemeinen als umweltverträglicher.

(3) Über den Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien lagen bislang nur verstreute Einzelinformationen vor. Gleichzeitig wird vermutet, daß aufgrund der umgesetzten Stoffmengen und der Umweltrelevanz der involvierten Substanzen (Chlor, organische Lösungsmittel, schwermetallhaltige Katalysatoren etc.) hier nennenswerte Potentiale zur Umweltentlastung vorhanden sein könnten.

Daher beauftragte das Umweltbundesamt die Prognos AG mit einer Untersuchung über die "Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren am Beispiel ausgewählter Grund- und Feinchemikalien" (FKZ 298 67 411).

(4) Die Ziele des Forschungsprojekts sind:

- Die Ermittlung, inwieweit die Voraussetzungen für die Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren für die Herstellung ausgewählter Grund- und Feinchemikalien gegeben sind.
- Die Dokumentation des derzeitigen Entwicklungsstandes.

- Die Identifikation von Hemmnissen, die der Anwendung biotechnischer Verfahren im Bereich der Grund- und Feinchemikalien entgegenstehen, und die Untersuchung von Möglichkeiten für deren Abbau.
- Die beispielhafte Prüfung der großtechnischen Umsetzung im Rahmen von Demonstrationsvorhaben und die Erarbeitung von Hinweisen zur Gestaltung möglicher späterer Demonstrationsvorhaben.
- Die Abschätzung des Umweltentlastungspotentials durch den Einsatz biotechnischer Verfahren in diesen Bereichen.
- Die Prüfung, ob die Umweltwirkungen biotechnischer Verfahren durch die bestehenden Regelwerke (BImSchG, UVPG, GenTG etc.) ausreichend erfaßt werden.

(5) Betrachtet werden nur solche Stoffe, die aktuell auf chemisch-technischem Weg in industriellem Maßstab hergestellt werden und die auch biotechnisch gewonnen werden können. "Neue" (d.h. bislang nicht in industriellem Maßstab hergestellte) Produkte werden nicht untersucht. Es werden ferner nur solche Verfahren verglichen, die zu bezüglich ihrer chemischen Struktur identischen Stoffen führen. Eine Gegenüberstellung von Produkten, die hinsichtlich ihrer Funktion vergleichbar, aber in ihrer chemischen Struktur unterschiedlich sind, erfolgt nicht.

Diese Abgrenzung des Untersuchungsbereichs wurde aus Gründen des Untersuchungsaufwands getroffen und bedeutet keineswegs, daß in den hier nicht untersuchten Bereichen keine nennenswerten Umweltentlastungen durch biotechnische Verfahren zu erwarten sind.

(6) Zunächst wurden der Stand der Entwicklung und Anwendung biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Stoffen aus dem Untersuchungsbereich ermittelt (Kapitel 2). Es wurden insgesamt 54 Stoffe aus dem Untersuchungsbereich ermittelt, für deren Herstellung biotechnische Verfahren publiziert sind. Die biotechnischen Verfahren befinden sich auf unterschiedlichem Entwicklungs- bzw. Realisierungsstand. Dieser reicht vom Nachweis der prinzipiellen Durchführbarkeit einer biotechnischen Synthese im Labormaßstab über den Pilotmaßstab bis zur großtechnischen Nutzung.

Es gibt Hinweise, daß in der Industrie über die veröffentlichten Aktivitäten hinaus weitere Entwicklungen und Planungen biotechnischer Verfahren bzw. Anlagen verfolgt werden, über die jedoch aus legitimen Geheimhaltungsgründen keine näheren Informationen erhältlich sind.

(7) Die heute in industriellem Maßstab sowohl chemisch-technisch als auch biotechnisch produzierten Stoffe aus dem Untersuchungsbereich sind überwiegend Alkohole, organische Säuren, Aminosäuren und Vitamine. Die biotechnische Variante wurde aus wirtschaftlichen und/oder Marketinggründen gewählt.

Es sind nur wenige Fälle von konkreten Planungen für die zukünftige großtechnische Nutzung weiterer biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Stoffen aus dem Untersuchungsbereich bekannt.

(8) Zur Ermittlung des Umweltentlastungspotentials durch biotechnische Herstellung von Chemikalien wurde eine vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung für 23 als besonders relevant anzusehende Stoffe durchgeführt (Kapitel 3). Die betreffenden Verfahren sind in Anhang 1 im Überblick charakterisiert.

Es zeigt sich, daß die betrachteten biotechnischen Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien im Vergleich zu chemisch-technischen Synthesen häufig umweltseitige Vorteile bieten. Diese bestehen überwiegend in der Einsparung fossiler Ressourcen, die bei vielen chemisch-technischen Verfahren als Eingangsstoffe und zur Erzeugung der erforderlichen Prozeßenergie benötigt werden, sowie im reduzierten Einsatz gefährlicher Stoffe.

Hinsichtlich Emissionen toxischer Stoffe und des Anfalls toxischer Abfälle haben biotechnische Verfahren insbesondere dann Vorteile, wenn sie auf im chemisch-technischen Verfahren benötigte toxische Stoffe verzichten.

Auch biotechnische Verfahren benötigen Prozeßenergie – insbesondere zur Isolation und Aufbereitung der Produkte. In einigen Fällen ist der Prozeßenergiebedarf insgesamt jedoch geringer als bei den entsprechenden chemisch-technischen Verfahren. In diesen Fällen sind die biotechnischen Verfahren auch mit einer Reduktion der CO₂-Emissionen aus der Energieumwandlung verbunden.

(9) Auch biotechnische Verfahren sind mit Umweltbelastungen verbunden. Oft fallen große Mengen Reststoffe und unerwünschte Nebenprodukte an. Trotz prinzipieller biologischer Abbaubarkeit ist die Verwertung biologischen Materials als Dünger aufgrund der Stickstoff- und Phosphorfrachten umweltseitig nicht unproblematisch. Eine Verwertung als Dünger oder Viehfutter ist aufgrund beschränkter Aufnahmekapazitäten nicht immer möglich.

Viele der betrachteten biotechnischen Verfahren gehen von nachwachsenden Rohstoffen aus. Aus deren Anbau resultieren in der Regel zusätzliche Umweltbelastungen aufgrund der erforderlichen Düngung und durch den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln.

(10) Zur vertieften vergleichenden Betrachtung hinsichtlich verfahrenstechnischer, ökologischer und ökonomischer Aspekte wurden gemeinsam mit dem Umweltbundesamt vier biotechnische Verfahren als exemplarische Fallbeispiele ausgewählt. Es handelt sich um Verfahren zur Herstellung von Aceton/Butanol, 1,3-Propandiol, Vitamin C und Adipinsäure. Die Fallbeispiele sind detailliert in Kapitel 4 beschrieben.

(11) Die in Deutschland vorhandenen gesetzlichen Regelungen bieten – soweit dies anhand der in dieser Untersuchung betrachteten Fallbeispiele beurteilbar ist – ausreichend Vorsorge bzw. Schutz vor den mit biotechnischen Verfahren zur Herstellung von Chemikalien verbundenen potentiellen Umweltwirkungen und stellen keine Hemmnisse für den Einsatz der biotechnischen Verfahren dar.

(12) Die Analyse der Voraussetzungen und Hemmnisse für den Einsatz biotechnischer Verfahren (Kapitel 5) zeigt, daß der Startvorteil bestehender chemisch-technischer Anlagen das wichtigste Hemmnis ist, welches einer Verfahrensumstellung entgegensteht: Erfolgreich praktizierte Verfahren haben den Vorteil der nachgewiesenen Zuverlässigkeit und Produktqualität. Der Entwicklungsaufwand ist bereits geleistet und das Anlagevermögen teilweise bereits abgeschrieben.

Bei der Herstellung von Grund- und Feinchemikalien konkurrieren biotechnische mit chemisch-technischen Herstellungsverfahren. Die jeweils vorteilhafte Variante ist eine Frage der Optimierung unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten und ändert sich im Zeitverlauf mit sich wandelnden Rahmenbedingungen (z.B. Rohstoffkosten, technische Entwicklungen). Bei eindeutigen Kostenvorteilen eines biotechnischen Verfahrens kann es bei Feinchemikalien zur Ersetzung eines chemisch-technischen Verfahrens kommen.

(13) Die Herstellungskosten von Grundchemikalien werden durch die Rohstoffpreise dominiert. Biotechnische Verfahren sind trotz des gegenwärtig vergleichsweise hohen Preisniveaus für petrochemische Rohstoffe der chemisch-technischen Verfahren ökonomisch zumeist unattraktiv. In Europa liegt das Potential für biotechnische Verfahren zur Herstellung von Grundchemikalien in der Verwendung von Reststoffen anderer Prozesse als Substrate (z.B. Rohglycerin aus der Fettspaltung).

(14) Im Bereich der biotechnischen Herstellung von Stoffen gibt es umfangreichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei der Grundlagenforschung (Entwicklung von Prozessen), der Prozeßoptimierung und der Übertragung auf den großtechnischen Maßstab.

Die chemische Industrie betreibt die Entwicklung und Anwendung biotechnischer Verfahren mit eigenen Mitteln nur dort, wo kosten- oder marketingseitige Vorteile zu erwarten sind. Durch öffentlich geförderte Demonstrationsanlagen im großtechnischen Maßstab ist ein Anschub umweltverträglicherer Verfahren möglich. Ziel von Demonstrationsvorhaben kann auch der Nachweis der Machbarkeit, sowie die Optimierung bzgl. Technik und Umweltwirkungen sein.

Von den betrachteten Fallbeispielen eignen sich aus Sicht der Autoren dieses Berichts Aceton/Butanol und 1,3-Propandiol für solche Demonstrationsvorhaben.

Executive Summary

(1) Biotechnology is considered a key technology and promises a partial revolution of current chemical processes, new products, new methods in analysis and diagnosis, improved output in farming etc. These developments are linked with expectations regarding the creation of jobs and a leading position of the German Industry in biotechnology. In this respect biotechnology can contribute to the three dimensions of sustainable development (economic – ecological – social).

(2) Biotechnological processes for the production of chemicals differ from current chemical processes in various respects:

- In many cases renewable biological sources provide the input material.
- The processes usually employ mild reaction conditions.
- There are less harmful substances involved.
- The products and by-products are biodegradable.

Compared to chemical processes biotechnological processes for the production of chemicals are therefore considered environmentally friendly.

(3) Hitherto there was no complete overview on the use of biotechnological processes for the production of bulk and fine chemicals. Since the chemical production of bulk and fine chemicals involves huge material flows and toxic substances (e.g. chlorine, organic solvents, heavy metal catalysts) there are high potentials for environmentally sound processes.

Therefore, the German Federal Environmental Protection Agency (Umweltbundesamt) commissioned a study on the "Substitution of chemical processes for the production of selected bulk and fine chemicals by biotechnological processes" (FKZ 298 67 411).

(4) The goals of this research project are:

- Determine to which degree the requirements for the substitution of chemical processes for the production of selected bulk and fine chemicals by biotechnological processes are fulfilled.
- Documentation of the present state of biotechnological process development.
- Identification of impediments for the use of biotechnological processes for the production of bulk and fine chemicals and ways to approach these factors.

- Check of the possibilities for the use of biotechnology in industrial scale by exemplary plants employing financial support by Public Authorities. Suggestions regarding the execution of such projects.
- Estimation of the potential environmental effects of the use of biotechnological processes for the production of chemicals.
- Examination of the suitability of the existing environmental regulations for the control of the environmental effects of the biotechnological processes under consideration.

(5) By definition, this study refers to substances that are presently produced in industrial scale employing chemical processes. "New" substances (which are hitherto not produced in industrial scale) are not subject of this study. The comparison is restricted to chemical and biotechnological processes that lead to chemically identical products. Processes that lead to products which are not identical but are yet comparable with respect to their function are beyond the scope of this study.

These definitions were necessary in order to restrict the study and are not meant to imply that there are no positive environmental effects of biotechnology in industrial domains other than the ones considered here.

(6) In chapter 2 of this report the state of the art regarding development and application of biotechnological processes for the production of chemicals is investigated. In the field under consideration there are 54 substances for which biotechnological processes are reported in the literature. The stage of research and development of the corresponding biotechnological processes varies from first steps in the laboratory to commercial use on industrial scale.

There are indications about further activities of commercial players that are hitherto unpublished for secrecy reasons.

(7) Chemicals within the scope of this study that are currently produced by both chemical and biotechnological processes are mainly alcohols, organic acids, amino acids, and vitamins. The biotechnological route was chosen for economic or marketing reasons, respectively.

There are only few definite plans of the Chemical Industry for the future use of further biotechnological processes for the production of bulk and fine chemicals published.

(8) For the determination of the environmental effects connected with the biotechnological production of chemicals 23 environmentally relevant chemical processes were compared to corresponding biotechnological processes (chapter 3). An overview of the respective processes is given in annex 1.

The considered biotechnological processes for the production of bulk and fine chemicals generally provide positive environmental effects compared to the corresponding chemical processes. This refers to the use of fossile resources for feedstock and process energy and to reduced use of harmful substances.

Regarding toxic substances and hazardous waste the biggest advantages arise when toxic substances involved in a chemical process are not involved in the biotechnological alternative.

Biotechnological processes need process energy, particularly for the isolation and processing of the products. In many cases the overall demand for process energy is lower than in the corresponding chemical processes. In these cases the biotechnological process leads to a reduction of carbon dioxide emissions.

(9) Biotechnological processes are not entirely free of environmental effects. They often lead to unwanted byproducts and residues. Though the residues are in general biodegradable the use of residues as fertilizers can be limited by their content of nitrogen and phosphorus. Further restrictions for the use of residues as fertilizers or animal food arise from limited capacities of the farming sector.

Many of the biotechnological processes under consideration use renewable resources as feedstock. The production of this feedstock is often connected with environmental effects due to fertilization and the use of pesticides.

(10) Together with the Federal Environmental Protection Agency four biotechnological processes were selected for a deeper consideration of ecological, economic, and engineering aspects. The processes chosen lead to acetone/butanol, 1,3-propanediol, ascorbic acid, and adipic acid. These examples are considered in chapter 4.

(11) The current legal framework in Germany covers – as far as can be concluded from the consideration of the above-mentioned examples – the environmental effects and risks connected with the use of biotechnological processes. There are no obvious hindrances for biotechnological processes arising from the legal framework.

(12) The analysis of requirements and hindrances for the use of biotechnological processes in chapter 5 shows that the advanced state of current chemical processes is the most important hindrance for new biotechnological alternatives: working chemical processes have the advantage of proven reliability and product quality. Furthermore, the costs for the development of the chemical process and the investment in the plant are in most cases already depreciated.

There is a competition between chemical and biotechnological process alternatives for the production of chemicals. The respective method of choice is selected for technical, economic, and ecological reasons. With changing framework (e.g. regarding costs for feedstock, technical development) the method of choice can change in the course of time. In case of clear economic advantages of a biotechnological process for the production of fine chemicals a change from the existing chemical plant towards a biotechnological plant can occur.

(13) The production costs of bulk chemicals are determined by the costs for the feedstock. Despite the latest sharp rise in crude oil prices – the main feedstock for the chemical production of bulk chemicals – the biotechnological processes for bulk chemicals are in general still too expensive. The potential for biotechnological processes in the field of bulk chemicals in Europe arises mainly from the use of organic residues from other industrial processes for feedstock, e.g. raw glycerol from the processing of vegetable or animal oils and fats.

(14) Regarding biotechnological processes for the production of chemicals there is a demand for research and development with respect to basic research, optimization of processes, and scale up.

The chemical industry invests in R&D for such biotechnological processes that exhibit economical or marketing-wise advantages compared to the corresponding chemical process alternative. A push for environmentally sound but – without start-up support – uneconomic biotechnological processes can be achieved by exemplary plants with public financial support. Further goals of such projects are the demonstration of technical feasibility, and the optimization with respect to technical and environmental aspects.

From the point of view of the authors of this report the biotechnological processes for acetone/butanol and 1,3-propanediol are candidates for such exemplary plants.

1. Einleitung

"Biotechnologie ist die technische Nutzung des Potentials von Mikroorganismen, pflanzlichen und tierischen Zellen sowie von Teilen dieser zum Zweck der Produktsynthese oder Stoffwandlung."

So lautet die Definition der European Federation of Biotechnology.¹ Die Biotechnik² ist eine anwendungsorientierte, interdisziplinäre Wissenschaft mit enger Verknüpfung verschiedener Natur- und Ingenieurwissenschaften. Charakteristisch für biotechnische Prozesse ist, daß Stoffumwandlungen bzw. -synthesen im oben genannten Sinne biologischer Natur sind. Bierbrauen und die Herstellung von Sauerkraut werden ebenso unter Biotechnik subsumiert wie die Herstellung neuartiger Substanzen mit Hilfe gentechnisch veränderter Organismen.

(1) Es gibt verschiedene Einsatzfelder biotechnischer Verfahren:

- **"Nachsorgende/reinigende Biotechnik"**: Nachgeschaltete Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen verfahrenstechnischer Prozesse ("end of pipe", z.B. Abwasserreinigung), Sanierung belasteter Umweltbereiche
- **"Produzierende Biotechnik"**: Herstellung/Verarbeitung von Lebensmitteln, Synthese von Chemikalien (ggf. als Teilschritt in Kombination mit chemisch-technischen Syntheseschritten), biologische Erzlaugung (Metallanreicherung)
- **Analytik/Diagnostik** ("Biosensoren").

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Synthese von Chemikalien unter Nutzung biotechnischer Verfahren.

(2) Biotechnische Verfahren zur Herstellung von Chemikalien unterscheiden sich in vielfältiger Hinsicht von entsprechenden chemisch-technischen Prozessen:

- Die Eingangsstoffe (Substrate) sind in vielen Fällen **biologischen Ursprungs**.
- Die Prozesse erfolgen in der Regel unter milden **Reaktionsbedingungen** (Druck, Temperatur, pH etc.).
- Der Umgang mit (z.B. hinsichtlich Toxizität oder Explosionsgefahr) **problematischen Stoffen** ist seltener.
- Die Produkte und Nebenprodukte sind zumeist **gut biologisch abbaubar**.

¹ Zitiert nach Leuchtenberger 1998.

² Während sich der Begriff "Biotechnik" auf die technischen Kenntnisse, Fähigkeiten und Möglichkeiten bezieht, umfaßt der Begriff "Biotechnologie" auch die gesellschaftlichen Dimensionen. Diese Verwendung des Begriffs "Technologie" folgt dem Sprachgebrauch aus dem Bereich der Technikfolgenabschätzung.

Daher gelten biotechnische Prozesse zur Herstellung von Stoffen im Vergleich zu chemisch-technische Synthesen im allgemeinen als besser umweltverträglich.

(3) Im Bereich "Life science", der Pharma-, Pflanzenschutz- und Tiergesundheitsprodukte umfaßt und sich durch Produkte mit sehr hoher Wertdichte auszeichnet (oftmals mehrere 1.000 DM/kg), erleben biotechnische Syntheseverfahren eine stürmische Entwicklung und sind inzwischen weit verbreitet. Insbesondere durch den Einsatz gentechnischer Methoden konnten hier zahlreiche Prozesse erheblich optimiert werden bzw. wurden überhaupt erst möglich. Viele Produkte aus dem Bereich Life science sind mit vertretbarem Aufwand nur biotechnisch zugänglich.

Aufgrund des fortgeschrittenen Entwicklungsstandes und der tatsächlichen Verbreitung ist das Wissen um den Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Stoffen und um die damit verbundenen Vor- und Nachteile im Bereich Life science vergleichsweise groß. In anderen Bereichen der chemischen Industrie ist der Einsatz biotechnischer Verfahren zur Synthese von Chemikalien weniger verbreitet.

(4) Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden im Umfeld des Themenkomplexes "Biotechnologie und industrielle Produktion" die Forschungsprojekte

- **"Stand und Möglichkeiten von prozeßintegrierten biotechnischen Präventiv-techniken zur Vermeidung bzw. Verringerung von Umweltbelastungen"** (FKZ 296 94 902; Bearbeiter: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe) und
- **"Gentechnisch veränderte Organismen zur Reduktion von Umweltbelastungen"** (FKZ 108 02 903; Bearbeiter: Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA), Frankfurt/M.)

durchgeführt. Die vorliegende Untersuchung der Prognos AG befaßt sich mit der

- **"Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren am Beispiel ausgewählter Grund- und Feinchemikalien".**

Diese Studie wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Umweltforschungsplanes – Förderungskennzeichen 298 67 411 – erstellt und mit Bundesmitteln finanziert.

(5) Die **Ziele** des Forschungsprojekts sind:

- Die Ermittlung, inwieweit die Voraussetzungen für die Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren für die Herstellung ausgewählter Grund- und Feinchemikalien und deren Einsatz in ausgewählten Industriezweigen gegeben sind.

- Die Dokumentation des derzeitigen Entwicklungsstandes.
- Die Identifikation von Hemmnissen, die der Anwendung biotechnischer Verfahren im Bereich der Grund- und Feinchemikalien entgegenstehen, und die Untersuchung von Möglichkeiten für deren Abbau.
- Die beispielhafte Prüfung der großtechnische Umsetzung im Rahmen von Demonstrationsvorhaben und die Erarbeitung von Hinweisen zur Gestaltung möglicher späterer Demonstrationsvorhaben.
- Die Abschätzung des Umweltentlastungspotentials durch den Einsatz biotechnischer Verfahren in diesen Bereichen.
- Die Prüfung, ob die Umweltwirkungen biotechnischer Verfahren durch die bestehenden Regelwerke (BImSchG, UVPG, GenTG etc.) ausreichend erfaßt werden.

(6) Die **Untersuchungsbereiche** dieses Forschungsprojekts sind

- Grundchemikalien³ – hier insbesondere sauerstoffhaltige Stoffe und chlororganische Synthesen⁴ – und
- Feinchemikalien (mit Priorität auf dem Bereich jenseits Life science).

Bislang lagen über biotechnische Verfahren in den genannten Segmenten nur verstreute Einzelinformationen vor. Gleichzeitig wird vermutet, daß aufgrund der umgesetzten Stoffmengen und der Umweltrelevanz der involvierten Substanzen (Chlor, organische Lösungsmittel, schwermetallhaltige Katalysatoren etc.) hier nennenswerte Potentiale zur Umweltentlastung vorhanden sein könnten.

(7) Betrachtet werden nur solche Stoffe, die aktuell **auf chemisch-technischem Weg in industriellem Maßstab hergestellt** werden und die auch biotechnisch gewonnen werden können. "Neue" (d.h. bislang nicht in industriellem Maßstab hergestellte) Stoffe werden **nicht** betrachtet, da es in dieser Untersuchung auftragsgemäß auf die möglichen Umweltentlastungen durch die Substitution praktizierter chemisch-technischer durch biotechnische Verfahren ankommt. Es geht hier also um die Gegenüberstellung von chemisch-technischen und biotechnischen Verfahrensalternativen.

³ Grundchemikalien (häufig auch als Massen- oder Bulkchemikalien bezeichnet) sind in großen Mengen hergestellte Substanzen, die in der Regel als Eingangs- oder Hilfsstoffe in der chemischen Industrie dienen. Der Begriff "Feinchemikalien" wird seinem Charakter als Marketingbegriff gemäß uneinheitlich verwendet. In letzter Zeit wird synonym häufig der Begriff "Spezialitäten" bzw. "Spezialitätenchemikalien" gebraucht. Im Rahmen dieser Untersuchung definieren wir Feinchemikalien als Stoffe, die in kleineren Mengen hergestellt werden und eine höhere Wertdichte (über ca. 2 bis 5 DM/kg) haben als Grundchemikalien. Feinchemikalien weisen oft eine komplexe chemische Struktur auf.

⁴ Chlororganische Synthesen sind Verfahren, bei denen chlorhaltige organische Substanzen verwendet werden. Die hergestellten Produkte müssen selbst nicht chlorhaltig sein, z.B. Propylenoxid.

Aufgrund der erforderlichen Eingrenzung des Untersuchungsbereichs werden nur solche Verfahren verglichen, die zu chemisch **identischen Produkten** führen. Es erfolgt also **keine** Gegenüberstellung von Stoffen, die nicht identisch, aber hinsichtlich ihrer Funktion vergleichbar sind (z.B. ein für den Einsatz als Verpackungsfolien geeigneter biotechnisch gewonnener Kunststoff im Vergleich zu dem üblicherweise für diese Zwecke eingesetzten Standardkunststoffen).⁵

Es werden sowohl Zwischen- als auch Endprodukte betrachtet (die Übergänge sind ohnehin häufig fließend).

(8) Die untersuchten biotechnischen Verfahren können in der Nutzung **lebender oder abgetöteter Zellen** sowie vom Zellverband isolierter **Enzyme** bestehen. Sie können **vollständige Synthesen** sein, die vom Ausgangsstoff unmittelbar zum gewünschten Endprodukt führen, oder einzelne biotechnische Schritte in Kombination mit chemisch-technischen Syntheseschritten. Auch solche gemischten Verfahren sind Gegenstand dieser Untersuchung. Betrachtet werden sowohl Verfahren der "modernen" Biotechnik, die sich gentechnischer Methoden bedient, als auch "klassisch"-biotechnische Verfahren.

(9) Die Isolation der Produkte aus dem Reaktionsgemisch erfolgt auch bei biotechnischen Verfahren in der Regel unter Nutzung gängiger physikalisch-chemischer Methoden (z.B. Destillation, Membranverfahren). Die Weiterverarbeitung biotechnisch gewonnener **(Zwischen-)Produkte** zu Endprodukten erfolgt meistens mit chemisch-technischen Verfahren.

(10) Die **Informationsbeschaffung** für diese Untersuchung erfolgte durch

- Literaturrecherchen,
- Datenbankrecherchen,
- Patentrecherchen und
- Fachgespräche und Korrespondenz mit Unternehmen, Verbänden und Forschungseinrichtungen.⁶

Die ermittelten Informationen wurden nach Möglichkeit durch Vergleich verschiedener Quellen und durch Abwägung ihrer Plausibilität geprüft.

⁵ Selbstverständlich kann die biotechnische Herstellung "neuer" bzw. hinsichtlich ihrer Funktion mit gängigen Produkten vergleichbarer, jedoch chemisch nicht identischer Stoffe ebenso zu Umweltentlastungen beitragen wie die (in der vorliegenden Untersuchung betrachtete) biotechnische Produktion von bislang üblicherweise chemisch-technisch hergestellten identischen Stoffen (vgl. Ast 1998).

⁶ Die kontaktierten Unternehmen und Institutionen sind in Anhang 2 aufgelistet.

(11) Im Rahmen eines **Arbeitsgesprächs** am 8. Juli 1999 beim Umweltbundesamt in Berlin wurden die wichtigsten bis dahin gefundenen Ergebnisse des Projekts präsentiert und zur Diskussion gestellt. Teilnehmer waren Experten verschiedener relevanter Gebiete aus Industrie, Wissenschaft, Verbänden und Behörden. Die Ergebnisse der Diskussionen sind in den vorliegenden Bericht eingeflossen. Das Programm der Veranstaltung sowie die Liste der Teilnehmer sind in den Anhängen 3 bzw. 4 wiedergegeben.

(12) Der vorliegende Untersuchungsbericht ist folgendermaßen aufgebaut:

- ☐ Kapitel 2 vermittelt einen Überblick über den **Stand** der Entwicklung und industriellen Anwendung biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Chemikalien aus dem Untersuchungsbereich.
- ☐ Stoffe, deren biotechnische Herstellung im Vergleich zur chemisch-technischen Herstellung nach erster Sichtung potentiell Umweltvorteile bietet, wurden anschließend näher betrachtet. Eine darauf basierende Abschätzung des **Umweltentlastungspotentials** durch den Einsatz biotechnischer Verfahren ist in Kapitel 3 dargestellt. Die betrachteten Stoffe und ihre biotechnischen und chemisch-technischen Herstellungsverfahren sind in Form von Kennblättern im Anhang 1 charakterisiert.
- ☐ Aus der Vielzahl der biotechnischen Verfahren wurden vier Verfahren als **Fallbeispiele** ausgewählt, die im Hinblick auf die Fragestellungen der Untersuchung näher zu betrachten sind. Diese Fallbeispiele werden in Kapitel 4 behandelt.
- ☐ In Kapitel 5 werden **Voraussetzungen** für den Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien und **Hemmnisse** benannt.
- ☐ Kapitel 6 enthält Hinweise zur Gestaltung von **Demonstrationsvorhaben** zur Verminderung der Umweltbelastungen.
- ☐ Das abschließende Kapitel 7 enthält eine **Zusammenfassung und Schlußfolgerungen**.

Erklärungsbedürftige Fachbegriffe und Abkürzungen werden im **Glossar** erläutert.

2. Stand der Entwicklung und Anwendung biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Chemikalien

(1) Zunächst gilt es, einen Überblick über den Stand von Entwicklung und Anwendung (im Sinne von großtechnischer Nutzung) biotechnischer Verfahren im Bereich der zu untersuchenden Grund- und Feinchemikalien zu erlangen. Hierzu liegen zahlreiche Einzelinformationen vor, es fehlte jedoch bislang an einem systematischen Überblick. Es sei an dieser Stelle nochmals betont, daß sich die Untersuchung nur auf solche Stoffe bezieht, die aktuell in industriellem Maßstab auf chemisch-technischem Weg hergestellt werden (vgl. Kapitel 1).

Definitionen

(2) Der Stand der Entwicklung und Anwendung biotechnischer Verfahren variiert sehr stark von Stoff zu Stoff. Hinsichtlich des gegenwärtigen **Realisierungsstatus** können folgende Stadien unterschieden werden:

- 1a Die biotechnische Herstellung erfolgt in **industriellem Umfang**.
- 1b Eine biotechnische Produktionsanlage befindet sich in **Planung/im Bau**.
- 2 Die biotechnische Herstellung wurde früher in industriellem Umfang praktiziert, ist jedoch inzwischen **durch eine chemisch-technische Synthese abgelöst** (Historisches Verfahren).
- 3 Ein biotechnisches Verfahren befindet sich im **Entwicklungsstadium** (vom Labormaßstab bis zur Pilotanlage).
- 4 Der Realisierungsstatus ist unklar.

Zur letztgenannten Gruppe zählen Verfahren, die nach den vorliegenden Informationen von den betreffenden Akteuren nicht weiterverfolgt werden bzw. auf die nur vage, nicht eindeutig belegbare Hinweise vorliegen.

(3) In dieser Untersuchung wird folgende Abgrenzung der Arten biotechnischer Verfahren benutzt:

- M **Mikrobiologische Verfahren:** Nutzung des Stoffwechsels lebender – ggf. gentechnisch oder durch konventionelle Züchtungsmaßnahmen modifizierter – Organismen (*in vivo*).
- E **Enzymatische Verfahren:** Verwendung von aus dem Zellverband isolierten – ggf. unter Nutzung gentechnischer Methoden hergestellten – Enzymen (*in vitro*) oder von in abgetöteten Zellen belassenen Enzymen.

Vorgehen

(4) Die Informationsbeschaffung zur Identifikation von Stoffen, die biotechnisch hergestellt werden können bzw. bereits biotechnisch hergestellt werden, erfolgte unter Nutzung verschiedenartiger Quellen: Zunächst wurden einschlägige Nachschlagewerke, Lehrbücher und Übersichtsartikel ausgewertet. Parallel wurden Fachgespräche mit Experten aus Forschungseinrichtungen und Unternehmen, die potentiell biotechnische Verfahren entwickeln/nutzen, und Institutionen, die potentiell biotechnische Verfahren fördern, durchgeführt.⁷

Die so gefundenen Hinweise wurden durch Recherchen in Datenbanken sowie im Internet vertieft und ergänzt. Es wurden folgende Datenbanken benutzt: Biosis Previews, BioBusiness, Biocommerce Abstracts & Directory, Current Biotechnology Abstracts, Derwent Biotechnology Abstracts.⁸ Die Suche erfolgte anhand der Stoffbezeichnungen sowie ggf. unter Nutzung weiterer Suchbegriffe (z.B. Unternehmen).

Ergänzend – d.h. über die durch den o.g. Ansatz bereits ermittelten biotechnischen Verfahren hinaus – wurden folgende Stoffgruppen durch Datenbankrecherchen auf biotechnische Herstellungsverfahren untersucht:

- Stoffe, deren chemische Herstellung bezüglich der damit verbundenen Umweltwirkungen problematisch ist (und deren biotechnische Herstellung daher möglicherweise wünschenswert erscheint). Hierfür wurden auch entsprechende Angaben des Umweltbundesamtes herangezogen. Dies betrifft u.a. chlororganische Verfahren (z.B. Epichlorhydrin, Ethylenchlorid), Aromaten und sauerstoffhaltige Verbindungen.
- In größeren Mengen produzierte Stoffe ("Topseller"). Dieser Ansatz wurde bereits vom Expertenkreis Bio- und Gentechnik des Vereins der Bayerischen Chemischen Industrie e.V./Landesverband Bayern des Verbands der Chemischen Industrie e.V. verfolgt. Ausgehend von dessen Zwischenbericht (VCI 1996) wurde für die dort angegebenen Stoffe nach neueren Quellen und Hinweisen auf die tatsächliche Nutzung der angegebenen Verfahren gesucht.
- In der Natur vorkommende Stoffe und ihre Derivate (z.B. Zimtsäure, Oxalsäure), da es für solche Stoffe biologische Synthesewege gibt.

(5) Die aus der Literatur und aus Fachgesprächen mit Experten erhaltenen Informationen wurden nach Möglichkeit durch Vergleich verschiedener Quellen und durch Abwägung ihrer Plausibilität geprüft. Angaben, die nach gutachterlicher Einschätzung der Autoren dieses

⁷ Die angesprochenen Unternehmen bzw. Institutionen sind in Anhang 2 aufgeführt.

⁸ Für Patentrecherchen wurde die Datenbank von Derwent benutzt. Daher werden Patentrecherchen hier unter dem Begriff Datenbankrecherche subsumiert. Bei Patentrecherchen ist zu berücksichtigen, daß die Veröffentlichung einer Patentanmeldung durch das Patentamt erst 18 Monate nach der Anmeldung erfolgt.

Berichts unplausibel erscheinen und nicht durch weitere Quellen bestätigt werden konnten, wurden nicht aufgegriffen.

(6) Es wurde nach biotechnischen Verfahren zur Herstellung von solchen Stoffen gesucht, die in den in Kapitel 1 definierten Untersuchungsbereich fallen. Diese Stoffe sollten in industriellem Maßstab produziert werden, da das Umweltentlastungspotential durch Nutzung eines biotechnischen Verfahrens anstelle der chemisch-technischen Variante bei geringfügigen Produktionsmengen in der Regel gering sein dürfte. Hierfür wurde seitens der Autoren dieser Untersuchung zunächst eine Grenze bei einer jährlichen weltweiten Produktionsmenge von 1.000 Tonnen gesetzt. Es stellt sich im weiteren Verlauf der Untersuchung jedoch heraus, daß es interessante biotechnische Verfahren für Stoffe gibt, die in geringeren Mengen hergestellt werden. Diese Fälle wurden auch in die Untersuchung einbezogen.

(7) Die in diesem Bericht enthaltenen Informationen stellen nach Ansicht der Autoren den aktuellen publizierten Stand der Entwicklung und Anwendung biotechnischer Verfahren im Untersuchungsbereich dar. Ältere Literaturzitate bedeuten, daß bei den Recherchen keine relevanten neueren Veröffentlichungen gefunden wurden.

Es gibt Hinweise auf Entwicklungen, die aus Gründen der Geheimhaltung nicht publiziert sind. Es ist also davon auszugehen, daß in Einzelfällen die tatsächliche Entwicklung weiter fortgeschritten ist als hier dargestellt. Das tatsächliche Ausmaß geheimer Verfahrensentwicklungen ist naturgemäß nicht abschätzbar.

Ergebnisse

(8) Es wurden insgesamt 54 Stoffe ermittelt, die in den Untersuchungsbereich fallen und biotechnisch herstellbar sind. Teilweise existieren für einen Stoff mehrere biotechnische Herstellungsverfahren, die sich in der Regel durch die benutzten Substrate und/oder Mikroorganismen unterscheiden.

(9) Es gibt eine Reihe von Feinchemikalien, die **ausschließlich biotechnisch** hergestellt werden (Lysin, Glutamin, Glutaminsäure, Carnitin, Itaconsäure, Sorbinsäure, Vitamin B₁₂). Solche Stoffe sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

(10) Bei den **heute** in industriellem Maßstab sowohl chemisch-technisch als auch biotechnisch produzierten Stoffen aus dem Untersuchungsbereich handelt es sich überwiegend um **Alkohole, organische Säuren, Aminosäuren und Vitamine** (Tabelle 1).

Die biotechnische Herstellungsverfahren wurde aus wirtschaftlichen und/oder Marketinggründen gewählt. Letzteres spielt insbesondere bei Aromastoffen eine wichtige Rolle: Nur

Aromastoffe, die aus Naturprodukten isoliert wurden oder die auf der Basis eßbarer Naturprodukte biotechnisch hergestellt wurden, dürfen lebensmittelrechtlich als "natürlich" deklariert werden. Chemisch-technisch hergestellte Aromastoffe müssen hingegen als "naturidentisch" bezeichnet werden. Der Wunsch der Konsumenten nach "natürlichen" Bestandteilen von Lebensmitteln rechtfertigt die zumeist teurere biotechnische Herstellung von Aromastoffen.

(11) Es sind nur wenige Fälle von konkreten **Planungen für die großtechnische Nutzung** weiterer biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Stoffen aus dem Untersuchungsbereich bekannt (Tabelle 2). Es gibt Hinweise, daß es in Unternehmen konkrete Planungen zur industriellen biotechnischen Produktion von höherwertigen Stoffen gibt, die aus Gründen der Geheimhaltung noch nicht an die Öffentlichkeit gedrungen sind. Insofern spiegelt die hier getroffene Abgrenzung zwischen Verfahren im Entwicklungsstadium und konkret geplanten großtechnischen Umsetzungen den Stand der zugänglichen Informationen wider. Hinweise auf Planungen, die sich nicht hinreichend belegen ließen und die demnach den Charakter von Gerüchten haben, sind nicht in der Tabelle 2 wiedergegeben.

(12) Es gibt biotechnische Verfahren zur Herstellung von Grundchemikalien, die in der **Vergangenheit** industrielle Bedeutung hatten (Tabelle 3). Diese konnten mit dem Aufkommen der Petrochemie allenfalls in Nischen bestehen. Bereits in der Vergangenheit gab es in Europa und den USA in gewissen Bereichen eine Konkurrenz zwischen biotechnischen und chemisch-technischen Verfahrensalternativen, die schließlich zu einer **Substitution** biotechnischer durch chemisch-technische Verfahren führte.

Die angesprochenen Nischen existieren in Ländern, die aufgrund von Devisenmangel, Verfügbarkeit billiger heimischer Rohstoffe, aus innenpolitischen Gründen oder aufgrund von Boykottsituationen eine heimische biotechnische Produktion aufrechterhalten. Es sind verschiedene solcher Fälle – z.B. aus Indien, Brasilien, Südafrika und China – belegt oder als Gerücht im Umlauf.

(13) Eine Reihe von Verfahren befindet sich im **Entwicklungsstadium** (Tabelle 4). Der Entwicklungsstand variiert von der Verfahrensentwicklung im Labor bis zur Pilotanlage (Optimierung des Prozesses, Klärung verfahrenstechnischer Details).

Teilweise wurden entwickelte Verfahren nicht weiterverfolgt. Solche Verfahren sind also bislang nicht über das Entwicklungsstadium hinausgekommen, könnten aber ggf. zukünftig wieder aufgegriffen und weiterentwickelt werden.

Es ist zu vermuten, daß im Bereich höherwertiger Feinchemikalien biotechnische Verfahren entwickelt werden, die aufgrund legitimer Unternehmensinteressen **geheimgehalten** werden.

(14) Bei einer Reihe von Stoffen ist der Realisierungsstatus **unklar**. In diesen Fällen existieren nur vage Hinweise, die nicht präzisiert werden konnten (Tabelle 5). Dabei handelt es sich überwiegend um Grundchemikalien. Häufig gibt es hier ältere Patente, für deren tatsächliche Nutzung oder Weiterentwicklung es jedoch keine Anhaltspunkte gibt.

Bei den Grundchemikalien ist zu vermuten, daß aufgrund der billigen petrochemischen Rohstoffbasis der chemisch-technischen Verfahren die Weiterentwicklung bzw. Nutzung biotechnischer Verfahren aus wirtschaftlichen Gründen nicht erfolgt. In einem Fall (organische Peroxide) wurde das Entwicklungsvorhaben nach Auskunft eines der beteiligten Unternehmen aufgrund von Problemen bei der Beschaffung von Fördermitteln eingestellt.

(15) Es gibt Stoffe, die chemisch-technisch so günstig hergestellt werden, daß die Entwicklung eines biotechnischen Verfahrens von vorneherein **ökonomisch uninteressant** ist (z.B. Glycin, Harnstoff, Zimtsäure).

Bei einigen Stoffen ist eine biotechnische Gewinnung im Vergleich zur **Extraktion** ökonomisch uninteressant, solange der pflanzliche Rohstoff in ausreichenden Mengen verfügbar ist (z.B. der Farbstoff Carthamin).

(16) Bei der Herstellung von neuen (bislang nicht großtechnisch produzierten und daher nicht zum Untersuchungsbereich gehörenden) Substanzen wird **häufig die biotechnische Variante vorgezogen**. Dies betrifft insbesondere den Pharmabereich. Teilweise sind die neuen Substanzen von vorneherein mit vertretbarem Aufwand **nur biotechnisch zugänglich**. Insbesondere gilt dies für Stereoisomere und selektive Reaktionen an wenig reaktiven Stellen.

(17) Es sei abschließend nochmals darauf hingewiesen, daß in dieser Untersuchung nur Verfahrensalternativen betrachtet werden, die zu **gleichen Produkten** führen. Es gibt darüber hinaus jedoch biotechnische Verfahren zur Gewinnung von Stoffen, die zu **funktionsäquivalenten Produkten** führen (z.B. Kunststoffe auf Milchsäurebasis als Ersatz für Polyethylen).

(18) Die biotechnisch herstellbaren Stoffe aus dem Untersuchungsbereich sind – getrennt nach Realisierungsstatus – in den Tabellen 1 bis 5 wiedergegeben. Dort sind ferner die Art des Verfahren sowie die wichtigsten **Akteure** (Forschungseinrichtungen, an denen das biotechnische Verfahren entwickelt wird; Unternehmen, die das biotechnische Verfahren entwickeln oder praktizieren) aufgeführt.

Einige Verfahren nutzen gentechnische Methoden zur Modifikation der benutzten Organismen oder zur Herstellung der benötigten Enzyme. Hierbei sind zwei Fälle zu unterscheiden: Es gibt Verfahren, für welche die Nutzung gentechnischer Methoden **unabdingbar** ist. Dies

ist dann der Fall, wenn das biotechnische Verfahren nicht natürliche Stoffwechselwege der betreffenden Organismen nutzt, sondern transgene Organismen zwingend erforderlich sind. Solche Verfahren sind in den Tabellen 1 bis 4 durch *kursiv* gedruckte Stoffbezeichnungen gekennzeichnet.

Ferner werden gentechnische Methoden zur Optimierung klassisch-biotechnischer Verfahren benutzt (z.B. Erhöhung der Ausbeute). Solche Fälle sind **nicht** durch kursiv gedruckte Stoffbezeichnungen gekennzeichnet.

(19) 23 der in den Tabellen 1 bis 5 genannten biotechnischen Verfahren aus dem Untersuchungsbereich bieten potentiell umweltseitige Vorteile gegenüber der gängigen chemisch-technischen Synthese.⁹ Diese Verfahren wurden im Rahmen einer ökologischen Wirkungsabschätzung bezüglich ihrer Umweltwirkungen näher betrachtet (Kapitel 3). Die Stoffe und die chemisch-technischen und biotechnischen Herstellungsverfahren werden in Anhang 1 in Form von Kennblättern beschrieben.

Tabelle 1: Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe

Gruppe 1a: Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang üblich

Stoffbezeichnung ¹⁰	Art des Verfahrens ¹¹	Wichtige Akteure	Wichtige Quellen; Anmerkungen
Acrylamid	E	Nitto Chemical Company Ltd. (Yokohama, Japan)	Siehe Anhang 1
Äpfelsäure	E	Tanabe Seijanu (Japan)	Siehe Anhang 1
Aromastoffe (z.B. Fruchtester, cis-3-Hexenol, L-Menthol)	E, M	Haarmann & Reimer GmbH (Holzminden), Givaudan Roure Aromen AG (Dübendorf, Schweiz)	I.d.R. geringe Produktionsmengen. Biotechn. Herstellung häufig teurer als chemisch-technische. Biotechnisch hergestellte Aromen gelten als "natürlich". Vgl. Muheim 1999
Asparaginsäure	M	Ajinomoto Ltd. (Japan), Tanabe Seiyaku Ltd. (Japan)	Chem.-techn. Herstellung wenig umweltrelevant (vgl. Renneberg 1990, Wandrey 1998)

(Fortsetzung nächste Seite)

⁹ Stoffe wie Asparaginsäure, deren chemisch-technische Herstellung als wenig umweltrelevant gilt, wurden nicht weiterverfolgt.

¹⁰ Stoffbezeichnung *kursiv* → Nutzung gentechnischer Verfahren zur Erschließung eines nicht natürlicherweise vorkommenden Stoffwechselweges der benutzten Mikroorganismen bzw. zur Herstellung des benutzten Enzyms erforderlich.

¹¹ M mikrobiologisches Verfahren, E enzymatisches Verfahren (siehe Text).

Tabelle 1: Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe – Fortsetzung
Gruppe 1a: Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang üblich

Stoffbezeichnung	Art des Verfahrens	Wichtige Akteure	Wichtige Quellen; Anmerkungen
Aspartam	E	Toyo Soda Manufacturing Ltd. (Japan), DSM (Geleen, NL)	Chem.-techn. Herstellung wenig umweltrelevant (siehe Oyama 1984, Cheetham 1994)
Essigsäure	M	Zahlreiche Unternehmen der Lebensmittelbranche	Siehe Anhang 1
Ethanol	M	Zahlreiche kleinere Brennereien	Siehe Anhang 1
Ethylenglykol (Glykol; 1,2-Ethandiol)	M	Industrial Development Corporation (Südafrika)	Biotechnische Herstellung unwirtschaftlich (vgl. Propylenglykol)
Fumarsäure	M	Diverse Unternehmen in USA	Siehe Anhang 1
Gluconsäure	M, E	Diverse Unternehmen in USA und Japan, Gesellschaft für Biotechnologische Forschung (Braunschweig), Universität für Bodenkultur Wien	Chem.-techn. Herstellung wenig umweltrelevant (siehe Ullmann's). Gemeinsame biotechnische Herstellung mit Sorbit (siehe Jonas 1998) bzw. Mannitol (siehe UBA Wien 1997a)
L-Methionin	E (Racematentrennung) bzw. M (vollst. Synthese)	Degussa-Hüls AG, Tanabe Seiyaku (Japan), Universität Granada (Spanien)	Chem.-techn. Racematentrennung wenig umweltrelevant (siehe Beyer 1998). Biotechn. <i>de novo</i> -Synthese offenbar im Entwicklungsstadium (vgl. González-López 1995).
L-Milchsäure	M	Archer Daniels Midland (ADM, USA), Cargill (Blair/Nebraska, USA)	In EU ausschließlich biotechnische Herstellung (Präve 1994, Ward 1994)
Propylenglykol	E	Industrial Development Corporation (Südafrika)	Biotechnische Herstellung unwirtschaftlich (vgl. Ethylenglykol)
Vitamin B ₂ (Riboflavin)	M	BASF AG, Rhône-Poulenc S.A., Hoffmann-La Roche AG	Siehe Anhang 1
Zitronensäure	M	Archer Daniels Midland (ADM, USA)	In EU ausschließlich biotechn. Herstellung (Ward 1994)

Tabelle 2: Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe

Gruppe 1b: Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang geplant

Stoffbezeichnung	Art des Verfahrens	Wichtige Akteure	Wichtige Quellen; Anmerkungen
Glycerin	M	Archer Daniels Midland (ADM, USA)	Siehe Anhang 1
Indigo	M	Genencor International (Rochester/N.Y., USA)	Siehe Anhang 1
Ketogulonsäure	M	Keto-Gulonsäure Produktions GmbH (Krefeld)	Zwischenprodukt bei der Herstellung von Vitamin C. Siehe Vitamin C (Kapitel 4.3)
Niacinamid	E	Lonza AG (Basel)	Teilschritt Hydrolyse von Cyanopyridin zu Niacinamid. Produktion in China geplant (McCoy 1998a)
Vitamin C (Ascorbinsäure)	M	Keto-Gulonsäure Produktions GmbH (Krefeld) u.a.	Siehe Kapitel 4.3 und Anhang 1

prognos 2000

Tabelle 3: Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe

Gruppe 2: Biotechnisches Verfahren durch chemisch-technisches abgelöst

Stoffbezeichnung	Art des Verfahrens	Wichtige Akteure	Wichtige Quellen; Anmerkungen
Aceton	M	Technische Universität Wien u.a.	Siehe Kapitel 4.1 und Anhang 1
1-Butanol	M	Technische Universität Wien u.a.	Siehe Kapitel 4.1 und Anhang 1
2-Propanol (Isopropanol)	M	Technische Universität Wien u.a.	Siehe Anhang 1
Oxalsäure	M	-	Biotechnische Herstellung unrentabel (Römpp, Ullmann's)

prognos 2000

Tabelle 4: Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe

Gruppe 3: Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium

Stoffbezeichnung	Art des Verfahrens	Wichtige Akteure	Wichtige Quellen; Anmerkungen
<i>Adipinsäure</i>	M	Purdue University (West Lafayette/ Indiana, USA), Genencor International (Rochester/ N.Y., USA)	Siehe Kapitel 4.4 und Anhang 1
Bernsteinsäure	E	unklar (wird offenbar nicht weiterverfolgt)	Chem.-techn. Herstellung wenig umweltrelevant (vgl. Römpp, Kirk-Othmer)
2,3-Butandiol	M	Rensselaer Polytechnic Institute (New York), Universität Faizabad (Indien)	Siehe Anhang 1
Buttersäure	M	unklar	Siehe Anhang 1
Epichlorhydrin	E	Dow Chemicals und Diversa (San Diego, USA), Cetus Corporation (USA)	Siehe Anhang 1
Mannitol (D-Mannit)	M	Universität für Bodenkultur, Wien	Siehe Anhang 1
<i>Muconsäure</i>	M	Purdue University (West Lafayette/ Indiana, USA), Genencor International (Rochester/ N.Y., USA)	Siehe Adipinsäure
L-Phenylalanin	M	Tokio Research Laboratory; Ajinomoto (Japan)	Siehe Anhang 1
1,3-Propandiol	M	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (Braunschweig), Gesellschaft für Biotechnologische Forschung GmbH (Braunschweig)	Siehe Kapitel 4.2 und Anhang 1

(Fortsetzung nächste Seite)

Tabelle 4: Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe – Fortsetzung
Gruppe 3: Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium

Stoffbezeichnung	Art des Verfahrens	Wichtige Akteure	Wichtige Quellen; Anmerkungen
Propionsäure	M	Gesellschaft für Biotechnologische Forschung mbH (Braunschweig)	Siehe Anhang 1
Propylenoxid	E	Diverse Universitäten	Siehe Anhang 1
Sorbit	E	Universität für Bodenkultur, Wien	Siehe Anhang 1
Vanillin	M	Givaudan Roure Aromen AG (Dübendorf, Schweiz), Michigan State Univ. (East Lansing/ Michigan, USA), Haarmann & Reimer GmbH (Holzminden)	Siehe Anhang 1
Vitamin B ₁ (Thiamin)	M	unklar (wird offenbar aus wirtschaftlichen Gründen nicht weiterverfolgt)	Biotechnische Produktion unwirtschaftlich wegen geringer Produktkonzentrationen (Kirk-Othmer)
Vitamin B ₅ (Pantothersäure)	M	Technische Universität München	Teilschritt Reduktion von Ketopantoat (siehe Ullmann's, Eck 1994)
Vitamin Niacin	M	Technische Universität München	Teilschritt Fermentation von 3-Picolinnitril zu Niacinamid (siehe Eck 1994, Mathew 1988). Chem.-techn. Synthese billiger als biotechn. (siehe Ullmann's)
Vitamin E (Tocopherol)	E	Hoffmann-La Roche AG (Basel)	Teilschritt Cyclisierung (siehe Stocker 1994)

prognos 2000

Tabelle 5: Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe

Gruppe 4: Realisierungsstatus des biotechnischen Verfahrens unklar

Stoffbezeichnung	Art des Verfahrens	Wichtige Akteure	Wichtige Quellen; Anmerkungen
Acrylsäure	M	Keine Hinweise auf Nutzung des biotechn. Verfahrens	Aus (biotechn. herstellbarer) Milchsäure chemisch-technisch herstellbar (vgl. Milchsäure).
Aromaten	M	Genencor International (Rochester/N.Y., USA), Universität Budapest	Biotechn. Verfahren nicht näher definiert. Vgl. Berry 1996, Lázlo 1992
Carotinoide	E	Central Laboratories for Key Technology (Japan)	Biotechn. Verfahren nicht näher spezifiziert (es liegen nur vage Hinweise vor). Vgl. Misawa 1990
Dichlorethan	E	Cetus Corporation (USA)	Patent (vgl. VCI 1996 ¹²), keine weiteren Hinweise
Ethylenoxid	unklar	Cetus Corporation (USA)	Patent (vgl. VCI 1996), keine weiteren Hinweise
Formaldehyd	unklar	Wird offenbar nicht weiterverfolgt	Patente (vgl. VCI 1996), keine weiteren Hinweise
Menthol	unklar	unklar	Biotechn. Verfahren nicht näher spezifiziert (Rennberg 1990). Chem.-techn. Herstellung wenig umweltrelevant (vgl. Ullmann's)
Methanol	unklar	Wird offenbar nicht weiterverfolgt	Diverse Patente (vgl. VCI 1996), keine weiteren Hinweise
Nucleotide	E	NIGU-Chemie GmbH (Waldkraiburg)	Stand des Forschungsvorhabens (vgl. N.N. 1998a) unklar
Peroxide, organische	unklar	Peroxid-Chemie GmbH (Pullach), Boehringer Mannheim GmbH (Penzberg)	Forschungsvorhaben (vgl. N.N. 1998a) eingestellt
Propen	unklar	Wird offenbar nicht weiterverfolgt	Patent (vgl. VCI 1996), keine weiteren Hinweise

(Fortsetzung nächste Seite)

¹² Für die in VCI 1996 angegebenen Stoffe Dichlorethan, Ethylenoxid, Formaldehyd, Methanol und Propen ergaben die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung durchgeführten Recherchen keinerlei Anhaltspunkte für eine Weiterentwicklung oder Nutzung der biotechnischen Verfahren.

Tabelle 5: Übersicht über biotechnisch herstellbare Stoffe – Fortsetzung
Gruppe 4: Realisierungsstatus des biotechnischen Verfahrens unklar

Stoffbezeichnung	Art des Verfahrens	Wichtige Akteure	Wichtige Quellen; Anmerkungen
Vitamin A (Retinol)	-	Keine Hinweise auf Nutzung (vgl. Misawa 1990)	Biosynthese partiell bekannt
Vitamin B ₆ (Pyridoxin)	unklar	BASF	Biotechn. Verfahren behauptet, keine weiteren Hinweise

prognos 2000

Zusammenfassung

(20) Es wurden insgesamt 54 Stoffe ermittelt, die in den Untersuchungsbereich fallen und biotechnisch herstellbar sind.

Bei den **Grundchemikalien**, für die es biotechnische Verfahren gibt, handelt es sich überwiegend um **sauerstoffhaltige Stoffe** (z.B. Alkohole, organische Säuren, Propylenoxid).

Im Bereich **chlororganische Stoffe** wurde nur für Epichlorhydrin ein biotechnisches Verfahren identifiziert.

Die synthetische Herstellung von Glycerin über Allylchlorid und Epichlorhydrin ist ein Chlornutzendes Verfahren, für das es eine biotechnische Alternative (und die chemisch-technische Variante Fettspaltung) gibt. Ferner nutzen die chemisch-technische Synthesen folgender Stoffe, für deren Herstellung es auch biotechnische Varianten gibt, ebenfalls Chlor: Propylenoxid (Chlorhydrinverfahren), Vitamin B₂, 2,3-Butandiol, L-Phenylalanin.

(21) Im Bereich der Feinchemikalien, die in den Untersuchungsbereich fallen, werden biotechnische Verfahren insbesondere zur Herstellung von Aromastoffen, Aminosäuren und Vitaminen eingesetzt bzw. entwickelt. Gerade in diesem Segment ist davon auszugehen, daß es geheime Verfahrensentwicklungen gibt.

3. Abschätzung des Umweltentlastungspotentials durch den Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien

Überblick

(1) Es wurden insgesamt 54 Stoffe aus dem Untersuchungsbereich identifiziert, die biotechnisch hergestellt werden können. Der Stand von Entwicklung und industrieller Anwendung der entsprechenden biotechnischen Verfahren variiert von Fall zu Fall zwischen Labormaßstab (Entwicklungsstadium) und bereits praktizierter großtechnischer Nutzung (vgl. Kapitel 2). Zur Abschätzung des Umweltentlastungspotentials durch den Einsatz dieser biotechnischen Verfahren wurden zunächst solche Stoffe identifiziert, deren biotechnische Herstellung **potentiell** mit umweltseitigen Vorteilen gegenüber den gängigen chemisch-technischen Produktionsverfahren verbunden ist. Biotechnische Verfahren, die keine umweltseitigen Vorteile erwarten lassen (z.B. weil nur unproblematische Teilschritte des chemisch-technischen Verfahrens ersetzt werden), wurden nicht weiterverfolgt. Es wurden nur solche Stoffe näher untersucht, die in industriellem Maßstab auf chemisch-technischem Weg produziert werden.

(2) Kriterium für das erwähnte Auswahlverfahren war, ob durch das biotechnische Verfahren nach erster Sichtung Umweltentlastungen im Vergleich zum gängigen chemisch-technischen Verfahren möglich sind. Es ist also zunächst folgende Frage zu betrachten:

Frage 1: Ist das chemisch-technische Verfahren umweltrelevant?

Ein Stoff wurde **nicht** weiterverfolgt, wenn die Frage 1 für das entsprechende chemisch-technische Herstellungsverfahren eindeutig mit "nein" beantwortet werden konnte. Für die übrigen Stoffe ist zu prüfen:

Frage 2: Sind vom biotechnischen Alternativverfahren potentiell umweltseitige Vorteile zu erwarten?

Stoffe, für welche die Frage 2 klar mit "nein" beantwortet werden konnte, wurden **nicht** weiterverfolgt.

Bei dieser Selektion flossen folgende Informationen ein:

Zu Frage 1:

- Konkrete Hinweise auf besondere Umweltrelevanz des chemisch-technischen Verfahrens (aus der Literatur und aus Fachgesprächen)
- Beteiligung von Stoffen, die aus Umweltsicht potentiell problematisch sind (z.B. Benzol, Chlor) und Hinweise auf potentielle Emissionen (Luft, Wasser, Abfälle)

- Verbrauch fossiler Rohstoffe als Eingangsstoffe und/oder für Prozeßenergie.

Zu Frage 2:

- Konkrete Hinweise auf Umweltvorteile des biotechnischen Verfahrens (aus der Literatur und aus Fachgesprächen)
- Ersetzung umweltseitig problematischer Schritte bzw. Stoffe des chemisch-technischen Verfahrens.

(3) Auf diese Weise wurden 23 potentiell für eine nähere vergleichende Betrachtung der Umweltauswirkungen alternativer biotechnischer Herstellungsverfahren interessante Stoffe identifiziert. Diese Stoffe und die chemisch-technischen und biotechnischen Herstellungsverfahren wurden einheitlich in Form von Kennblättern charakterisiert. Die Kategorien der Kennblätter sind:

- **Verwendung**
- **Herstellungsmenge**
- **Prinzip der Verfahren**
- **Wichtige Akteure**
- **Gegenüberstellung der wichtigsten Umweltschutzaspekte** (Emissionen, Risikopotential, Verbrauch fossiler Rohstoffe, Flächenbedarf für den Anbau nachwachsender Rohstoffe)
- **Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens**
- **Sonstiges.**

Die Kennblätter sind – geordnet nach Realisierungsstatus der biotechnischen Variante (vgl. Kap. 2) – im Anhang 1 wiedergegeben. Den Kennblättern sind in Anhang 1 Erläuterungen vorangestellt, in denen die o.g. Kategorien näher erklärt werden.

Vorgehen

(4) Die Ermittlung des Umweltentlastungspotentials durch den Einsatz der ausgewählten biotechnischen Verfahren erfolgt durch eine **vergleichende ökologische Wirkungsschätzung** auf der Basis der über die Literatur (einschl. Patente) zugänglichen – und in den Kennblättern in Anhang 1 zusammengefaßten – Informationen. Diese Informationen sind überwiegend qualitativer Natur. Es wurden keine Ökobilanzen (bestehend aus Sachbilanz/Wirkungsermittlung/Bewertung) angestrebt, schon weil dies aufgrund der erforderlichen Primärdatenerhebungen den Rahmen dieser Studie bei weitem überstiegen hätte. Ferner werden nur wenige der zu vergleichenden biotechnischen Verfahren heute bereits großtechnisch angewendet. Bei Verfahren in frühen Entwicklungsstadien sind die Möglich-

keiten zur Ermittlung der Umweltwirkungen begrenzt: Es sind allenfalls überschlägige Abschätzungen der Umweltwirkungen möglich, da viele entscheidende verfahrenstechnische Details erst im Zuge des Scale up festgelegt werden (vgl. Hungerbühler 1999, Heinzle 1998).¹³

(5) Die hier vorgenommene ökologische Wirkungsabschätzung besteht also in einem überwiegend qualitativen Vergleich auf der Basis der in den Stoffkennblättern angegebenen Verfahrensprinzipien (Eingangsstoffe, Reaktionsbedingungen etc.) und der involvierten Stoffe.

Ziel ist die Ermittlung der "Hot spots", also der **wesentlichen** Umweltwirkungen. Es handelt sich um einen **direkten Vergleich** zwischen chemisch-technischen und biotechnischen Verfahren.

(6) Die ökologische Wirkungsabschätzung berücksichtigt folgende **Wirkungskategorien** (vgl. Umweltbundesamt 1999):

- Schutzziel **Menschliche Gesundheit**
 - Humantoxizität
- Schutzziel **Struktur und Funktion von Ökosystemen**
 - Ökotoxizität
 - Aquatische und terrestrische Eutrophierung
 - Naturraumbeanspruchung
 - Photochemische Oxidantienbildung (Beitrag zum Sommersmog)
 - Abbau stratosphärischen Ozons
 - Treibhauswirkung
 - Versauerung.

Den **Verbrauch knapper Rohstoffe** (erneuerbar und nicht-erneuerbar) betrachten wir – abgesehen von den mit Gewinnung und Verarbeitung verbundenen ökologischen Wirkungen – nicht als ökologischen, sondern als (langfristig wirksamen) ökonomischen Faktor. Es ist jedoch auch üblich, diese Wirkungskategorie als eigenständiges ökologisches Schutzziel anzusehen.

¹³ Der beschriebene Zusammenhang zwischen Entwicklungsstadium und Grad der Genauigkeit von Abschätzungen über ökologische Wirkungen besteht analog auch bei den ökonomischen Aspekten (siehe Schembra 1993).

(7) Es erfolgt keine Hierarchisierung¹⁴ der Wirkungskategorien, d.h. die Beiträge zu den verschiedenen Wirkungskategorien werden **nicht** gegeneinander abgewogen. Es erfolgt über die isolierte Betrachtung der einzelnen Wirkungskategorien im Rahmen der ökologischen Wirkungsabschätzung hinaus keine zusammenfassende Bewertung der Umweltentlastungspotentiale.

(8) Die vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung zeigt die **Tendenzen** der möglichen Umweltwirkungen durch den Einsatz der biotechnischen Verfahren in 5 qualitativen **Kategorien** auf:

++	hohes Entlastungspotential
+	mittleres Entlastungspotential
0	neutral
–	mittleres Belastungspotential (zusätzliche Belastung)
– –	hohes Belastungspotential (zusätzliche Belastung).

Bei den Einstufungen wurden folgende **Grundsätze** verfolgt:

- Eine Reduktion des Umgangs mit für den Menschen giftigen Stoffen durch Einsatz des biotechnischen Verfahrens führt in der Kategorie "Humantoxizität" – in Abhängigkeit von der Gefährlichkeit der betreffenden Stoffe – zu einer Einstufung "hohes Entlastungspotential" (++) oder "mittleres Entlastungspotential" (+). Wird der Umgang mit krebserregenden Stoffen vermieden, so erfolgt eine Einstufung "hohes Entlastungspotential" (++).
- Eine Reduktion der Emissionen von ökotoxischen Stoffen (z.B. Chlorid in Gewässern, Stickoxide, Pflanzenschutzmittel) durch Einsatz des biotechnischen Verfahrens führt in der Kategorie "Ökotoxizität" – in Abhängigkeit von der Gefährlichkeit der betreffenden Stoffe – zu einer Einstufung "hohes Entlastungspotential" (++) oder "mittleres Entlastungspotential" (+).
- Häufig gehen biotechnische Verfahren von nachwachsenden Rohstoffen (zumeist Zucker oder Stärke) aus. Es wurde unterstellt, daß diese Rohstoffe in der Regel eigens für die Herstellung von Chemikalien angebaut werden (außer, wenn das Verfahren explizit Reststoffe anderer Prozesse als Substrate nutzt). In der Kategorien "Aquatische und terrestrische Eutrophierung" erfolgt aufgrund der Düngung bei der landwirtschaftlichen Erzeugung der Substrate generell eine Einstufung "mittleres Belastungspotential" (–). Es wird davon ausgegangen, daß das Abwasser biotechnischer Anlagen ggf. so behandelt wird, daß keine nennenswerte eutrophierende Wirkung auftritt. Stickoxide haben über atmosphärische Eintrag in Böden eutrophierende Wirkung.

¹⁴ Es wird beispielsweise keine Aussage darüber getroffen, ob der Treibhauseffekt als gravierender angesehen wird als die Sommersmogbildung.

- Es wird davon ausgegangen, daß die landwirtschaftliche Produktion als Alternative zur Rückführung der Produktionsfläche in "naturnahe bzw. natürliche Räume" bzw. zur Rotationsbrache besteht. In der Kategorie "Naturraumbeanspruchung" führt die Verwendung eigens erzeugter landwirtschaftlicher Produkte als Substrate zu der Einstufung "geringes Belastungspotential" (0/-). Es wird hier seitens der Autoren dieses Berichts kein "hohes Belastungspotential" (- -) gesehen, da beim gegenwärtigen Stand der landwirtschaftlichen Nutzung von Flächen in Deutschland nicht von einer starken Konkurrenz zwischen Landwirtschaft und "naturnahen bzw. natürlichen Räumen" auszugehen ist (vgl. Schütte 1999).
- Der Beitrag zur Sommersmogbildung wurde anhand der zu erwartenden Emissionen von photochemischen Vorläufersubstanzen (im wesentlichen flüchtige Kohlenwasserstoffe und Stickoxide) abgeschätzt.
- Der Beitrag zum Abbau stratosphärischen Ozons wurde anhand der zu erwartenden Emissionen von Ozon-abbauenden Stoffen (z.B. Lachgas) abgeschätzt.
- Der Beitrag zum Treibhauseffekt wurde aufgrund des Verbrauchs fossiler Energieträger zur Prozeßenergieerzeugung (also der damit verbundenen CO₂-Emissionen) sowie anhand der zu erwartenden Emissionen anderer treibhausrelevanter Gase (z.B. Methan) abgeschätzt.

Es wurde vereinfachend davon ausgegangen, daß der Anbau nachwachsender Rohstoffe nur geringfügig zum Treibhauseffekt beiträgt.

- Der Beitrag zur Versauerung wurde anhand der zu erwartenden Emissionen entsprechender Substanzen (z.B. Schwefeldioxid) abgeschätzt.
- Fossile Rohstoffe werden bei der Herstellung von Chemikalien einerseits als Edukte verwendet (Feedstock). Falls durch den Einsatz eines biotechnischen Verfahrens der Einsatz fossiler Rohstoffe als Feedstock nennenswert reduziert wird (also fossile Rohstoffe die wesentlichen Edukte des chemisch-technischen Verfahrens liefern), erfolgt mindestens eine Einstufung "mittleres Entlastungspotential" (+).

Ferner werden fossile Rohstoffe zur Erzeugung der erforderlichen Prozeßenergie eingesetzt. Falls durch den Einsatz eines biotechnischen Verfahrens der Verbrauch fossiler Rohstoffe als Energieträger nennenswert reduziert wird, erfolgt mindestens eine Einstufung "mittleres Entlastungspotential" (+). Die Abschätzung des Prozeßenergiebedarfs beruht auf der Reaktionsenergie (exotherme/endotherme Reaktion) und den Reaktionsbedingungen (Temperatur und Druck).

Sofern durch den Einsatz eines biotechnischen Verfahrens sowohl hinsichtlich Feedstock als auch bezüglich Prozeßenergie nennenswerte Reduktionen des Einsatzes fossiler Rohstoffe zu verzeichnen sind, erfolgt die Einstufung "hohes Entlastungspotential" (++).

Bei sämtlichen Einstufungen handelt es sich um qualitative **gutachterliche Einschätzungen** durch die Autoren dieses Berichts. Dies gilt insbesondere für die Abgrenzung zwischen

"mittlerem" und "hohem" Potential bei den Einstufungen der Beiträge zur Sommersmogbildung, zum Abbau stratosphärischen Ozons und zum Treibhauseffekt.¹⁵

Der Verbrauch an Frischwasser als Prozeßwasser bzw. für Kühlzwecke konnte nicht in die Bilanz einbezogen werden, da diesbezüglich häufig nur ungenaue Angaben vorliegen und der Bedarf für Kühlungs-zwecke (aufgrund von Kreislaufführung) stark von konkreten Standortgegebenheiten abhängt.

(9) Das Risikopotential durch den Umgang mit gefährlichen Stoffen kommt nur im Störfall zum Tragen. In der Regel sind für problematische Stoffe besondere Vorkehrungen erforderlich (z.B. Explosionsschutzmaßnahmen, doppelwandige Tanks für wassergefährdende Stoffe), die das Eintreten von Störfällen verhindern bzw. die Auswirkungen von Störfällen begrenzen.

(10) Die für die getroffenen Einstufungen maßgeblichen Gründe sind in der Kategorie "Gegenüberstellung der wichtigsten Umweltschutzaspekte" in den Kennblättern im Anhang 1 – summarisch unter den Rubriken¹⁶ "Emissionen", "Risikopotential", "Ressourcenverbrauch" und "Flächenbedarf" (für den Anbau nachwachsender Rohstoffe) – aufgeführt. Die entsprechenden Angaben in den Kennblättern sind zum Verständnis der Ergebnisse unabdingbar.

(11) Ziel der Einstufungen ist eine Abschätzung des Umweltentlastungs- bzw. -belastungspotentials im direkten Vergleich zwischen chemisch-technischen und biotechnischen Verfahren zur Herstellung von Chemikalien aus dem Untersuchungsbereich. Die hier getroffene ökologische Wirkungsabschätzung beansprucht nicht mehr als die Ableitung von **Tendenzen** hinsichtlich der möglichen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit der Nutzung biotechnischer Verfahren. Sie kann keinesfalls Ökobilanzen ersetzen.¹⁷ Im Einzelfall – d.h. abhängig von den konkreten Gegebenheiten am Standort einer Produktionsanlage (z.B. Restwärmenutzung) sowie verfahrenstechnischer Details – können detaillierte Untersuchungen zu anderen Ergebnissen führen als das hier notwendigerweise nicht auf Einzelanlagen an bestimmten Standorten zielende Vorgehen.

Insgesamt erscheint den Autoren des vorliegenden Berichts die hier durchgeführte ökologische Wirkungsabschätzung angesichts der Vielzahl der zu betrachtenden Verfahren

¹⁵ Da zumeist keine detaillierten Daten zu den Emissionen der relevanten Stoffe verfügbar sind, war eine quantitative Abgrenzung zwischen "hohem" und "mittlerem" Potential nicht möglich.

¹⁶ Die Kategorien der Kennblätter und die Einstufungen sind in den Erläuterungen zu Beginn des Anhangs 1 erklärt.

¹⁷ Ökobilanzen benötigen Detailinformationen, die nur bei tatsächlich industriell genutzten Verfahren ermittelbar sind. Viele der hier betrachteten biotechnischen Verfahren werden jedoch (noch) nicht großtechnisch angewendet.

und der Datenlage für einen ersten vergleichenden Überblick zwischen chemisch-technischen und biotechnischen Verfahren als bestmögliches und angemessenes Vorgehen.

(12) In Kapitel 4 wird das Vorgehen bei der ökologischen Wirkungsabschätzung im Rahmen der Betrachtung von Fallbeispiele exemplarisch näher dargestellt.

Ergebnisse

(13) Biotechnische Verfahren bringen im Bereich Grund- und Feinchemikalien im Vergleich zu chemisch-technischen Synthesen häufig umweltseitige Vorteile. Diese bestehen überwiegend im Bereich der **Ressourcenschonung** und im reduzierten Einsatz **gefährlicher Stoffe**. Eine zusammenfassende Übersicht über die Ergebnisse der ökologischen Wirkungsabschätzung bietet Tabelle 6.

Hinsichtlich **Emissionen toxischer Stoffe** im bestimmungsgemäßen Betrieb haben biotechnische Verfahren insbesondere dann Vorteile, wenn sie auf toxische Stoffe verzichten, die im chemisch-technischen Verfahren benötigt werden. Teilweise sind bei biotechnischen Verfahren **diffuse Emissionen** flüchtiger Produkte (z.B. Lösungsmittel aus der Aceton/Butanol-Fermentation) über die Reststoffe möglich, die im Zuge der Übertragung auf den großtechnischen Maßstab durch technische Maßnahmen möglichst reduziert werden müssen.

(14) Viele der betrachteten biotechnischen Verfahren gehen von landwirtschaftlichen Erzeugnissen aus. Sofern diese eigens für die Produktion von Chemikalien angebaut werden, erfolgen in der Regel zusätzliche Umweltbelastungen durch die Verwendung von Pflanzenschutzmitteln sowie hinsichtlich **Eutrophierung** (terrestrisch und aquatisch). Die genaue Art und der Grad der Belastung hängen natürlich von den benutzten Pflanzen, den Anbaumethoden und der Verwertung landwirtschaftlicher Nebenprodukte ab.

Die prinzipielle **biologische Abbaubarkeit** der Reststoffe biotechnischer Verfahren darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß die Verwertung biologischen Materials als Dünger – dies zeigt auch beispielsweise die Gülleverwertung – aufgrund der Stickstoff- und Phosphorfrachten umweltseitig nicht immer unproblematisch ist. Die Verwertung der Reststoffe in Biogasanlagen ist häufig nicht wirtschaftlich, eine Verwertung von Reststoffen als Viehfutter ist aufgrund beschränkter Aufnahmekapazitäten nicht grundsätzlich zu gewährleisten.

(15) Knapp 10% der fossilen Rohstoffe werden zur Herstellung von Chemikalien eingesetzt (nicht-energetischer Verbrauch als Feedstock). Die Verwendung **nachwachsender Rohstoffe** zur Produktion von Chemikalien leistet einen Beitrag zur Schonung fossiler Ressourcen, der allerdings im Vergleich zu den bei der energetischen Nutzung vorhandenen Einsparpotentialen gering ist (Schlesinger 2000). Biotechnische Verfahren sind jedoch nicht

grundsätzlich ressourcenschonend. Beispielsweise ist die Energiebilanz der Herstellung von Ethanol aus Weizen (Nutzung fossiler Energieträger versus gewonnene Energiemenge) ungünstig (Kaltschmitt 1997).

Zur Verbesserung der Umweltbilanz bei der Verwendung nachwachsender Rohstoffe ist eine möglichst **vollständige Nutzung der Pflanzen** (z.B. Verwendung von Weizenstärke und Stroh) anzustreben.¹⁸

Bei fermentativen Verfahren entstehen häufig nennenswerte Mengen unerwünschter **Nebenprodukte** (z.B. Wasserstoff). Deren Nutzung steht oft der erhebliche Aufwand für die Aufbereitung entgegen.

Verfahren, die **Reststoffe anderer Prozesse** als Eingangsstoffe nutzen, sind hinsichtlich Ressourcenschonung als besonders vorteilhaft einzustufen (siehe Kapitel 4.1 und 4.2, Fallbeispiele Aceton/Butanol und 1,3-Propandiol).

(16) Es besteht (auch in Deutschland) in einzelnen Fällen weiterhin ein Spielraum zur **Optimierung der chemisch-technischen Verfahren** hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen. Die Nutzung dieses Potentials kann die umweltseitigen Vorteile der biotechnischen Verfahren insbesondere hinsichtlich Emissionen reduzieren (z.B. Lachgas aus der Adipinsäureherstellung, Abfälle). Die möglichen Beiträge von Optimierungen chemisch-technischer Verfahren zur Ressourcenschonung sind aufgrund des bereits erreichten Stands eher gering.

(17) Im Zuge der großtechnischen Umsetzung biotechnischer Verfahren ist auf eine möglichst **umweltverträgliche Gestaltung** zu achten. Dies betrifft die umweltverträgliche Erzeugung der landwirtschaftlichen Rohstoffe, verfahrenstechnische Aspekte (z.B. Optimierung des Energieverbrauchs für die Produktisolierung und –aufbereitung) sowie die Nutzung der Reststoffe (vgl. Fallbeispiele in Kapitel 4).

(18) Die in Tabelle 6 dort wiedergegebenen Tendenzen können sich – insbesondere im Zuge der Konkretisierung verfahrenstechnischer Details bei der großtechnischen Umsetzung von Verfahren, die sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden – in die eine oder andere Richtung ändern. Auch können die Verhältnisse für einzelne Anlagen in Abhängigkeit von den Gegebenheiten am konkreten Standort (z.B. hinsichtlich Energieerzeugung, Restwärmenutzung, Kuppelproduktnutzung, Abfallbeseitigung) von den hier getroffenen Einschätzungen abweichen.

¹⁸ Damit ist nicht die vollständige Nutzung verschiedener Pflanzenbestandteile in *einem* biotechnischen Verfahren gemeint. Vielmehr werden für die verschiedenen zusammengesetzten Bestandteile der Pflanzen in der Regel unterschiedliche Nutzungen ökologisch sinnvoll sein.

Tabelle 6: Vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung: Bewertung der Umweltentlastungs- bzw. -belastungspotentiale im direkten Vergleich zwischen chemisch-technischen und biotechnischen Verfahren (Tendenzen)

Produkt- bezeichnung	Wirkungskategorie									Verbrauch fossiler Rohstoffe
	Human- toxizität	Ökotoxizität	Eutroph. (aquatisch/ terrestrisch)	Naturraum- bean- spruchung	Beitrag zur Sommer- smogbildung	Abbau strato- sphärischen Ozons	Treibhaus- effekt	Versauerung		
Gruppe 1a: Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang üblich										
Acrylamid	++	0/+	0	0	0	0	+	0	+	
Äpfelsäure	+	0	0	0	0	0	+	0	+	
Essigsäure [Verf. a]	0/+	-	-	0/-	0	0	+	0	+	
Ethanol	0	-	-	0/-	0	0	0	0	+	
Fumarsäure	+	-	-	0/-	0	0	+	0	+	
Vitamin B ₂	++	0	-	0/-	0	0	+	0	+	
Gruppe 1b: Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang geplant										
Glycerin (synthetisch)	++	0	-	0/-	0	0	+	0	+	
Glycerin (natürlich)	0	0	-	0	0	0	+	0	+	
Indigo	+	0/+	-	0/-	0	0	+	0	+	

Hinweis: Die Bewertungen in den einzelnen Wirkungskategorien können nicht zu einer Gesamtbewertung "aufsummiert" werden.
Legende siehe Seite 48

(Fortsetzung nächste Seite)

Tabelle 6: Vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung: Bewertung der Umweltentlastungs- bzw. -belastungspotentiale im direkten Vergleich zwischen chemisch-technischen und biotechnischen Verfahren (Tendenzen) – Fortsetzung

Produkt- bezeichnung	Wirkungskategorie								
	Human- toxizität	Ökotoxizität	Eutroph. (aquatisch/ terrestrisch)	Naturraum- bean- spruchung	Beitrag zur Sommer- smogbildung	Abbau strato- sphärischen Ozons	Treibhaus- effekt	Versauerung	Verbrauch fossiler Rohstoffe
Gruppe 2: Biotechnisches Verfahren durch chemisches abgelöst									
Vitamin C	+	0/+	0	0	0/+	0	+	0	+
Aceton	0 (bzw. -)*	0/-	0	0	0 (bzw. -)*	0	0	0	+
1-Butanol	0 (bzw. -)*	0	0	0	0 (bzw. -)*	0	0/-	0	+
2-Propanol	0 (bzw. -)*	0	0	0	0 (bzw. -)*	0	0	0	+
Gruppe 3: Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium									
Adipinsäure [Verf. 1]	++	0/+	-	0/-	0	0 (bzw. +)**	+	0	++
2,3-Butandiol [Verf. 2]	+	0/+	-	0/-	0	0	+	0	++
Buttersäure	0	-	-	0/-	0	0	+	0	++
Epichlorhydrin [Verf. 2]	++	+	0	0	0	0	+	0	+

Hinweis: Die Bewertungen in den einzelnen Wirkungskategorien können nicht zu einer Gesamtbewertung "aufsummiert" werden.
Legende siehe Seite 48

* Ohne technische Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen über Reststoffe (vgl. Kap. 4.1)

** Ohne thermische Lachgasreduktion (siehe Kap. 4.2)

(Fortsetzung nächste Seite)

Tabelle 6: Vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung: Bewertung der Umweltlastungs- bzw. -belastungspotentiale im direkten Vergleich zwischen chemisch-technischen und biotechnischen Verfahren (Tendenzen) – Fortsetzung

Produkt- bezeichnung	Wirkungskategorie								Verbrauch fossiler Rohstoffe
	Human- toxizität	Ökotoxizität	Eutroph. (aquatisch/ terrestrisch)	Naturraum- bean- spruchung	Beitrag zur Sommer- smogbildung	Abbau strato- sphärischen Ozons	Treibhaus- effekt	Versauerung	
Gruppe 3: Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium (Fortsetzung)									
Mannitol	0	0	0	0	0	0	0	0	+
L-Phenylalanin [Verf. 1]	0	-	-	0/-	0	0	0/+	0	+ / ++
1,3-Propandiol	+	0	0	0	0	0	+	0	+ + / +
Propionsäure	0	-	-	0/-	0	0	+	0	++
Propylenoxid [Verf. a]	++	+	0	0	0	0	0	0	0
Sorbit [Verf. 1]	0	0	-	0/-	0	0	+	0	++
Vanillin [Verf. b, 2]	0	0	0	0	0	0	0	0	0 / +
Hinweis: Die Bewertungen in den einzelnen Wirkungskategorien können nicht zu einer Gesamtbewertung "aufsummiert" werden. proanos 2000									

Hinweis: Die Bewertungen in den einzelnen Wirkungskategorien können **nicht** zu einer Gesamtbewertung "aufsummiert" werden.

Legende: ++ hohes Entlastungspotential durch biotechnisches Verfahren
 + mittleres Entlastungspotential
 0 neutral
 - mittleres Belastungspotential
 -- hohes Belastungspotential

Im Fall mehrerer chemisch-technischer bzw. biotechnischer Varianten werden die für den Vergleich herangezogenen Verfahren in eckigen Klammern (z.B. [b]) angegeben, siehe jeweilige Kennblätter.

Stoffbezeichnung **fett**. Fallsbeispiele (siehe Kapitel 4)

Stoffbezeichnung *kursiv*. Nutzung gentechnischer Verfahren zur Erschließung eines nicht natürlicherweise vorkommenden Stoffwechselweges der Mikroorganismen bzw. zur Herstellung des benutzten Enzyms erforderlich.

4. Fallbeispiele

(1) Im folgenden werden vier biotechnische Verfahren zur Herstellung von Chemikalien beispielhaft näher untersucht und mit den entsprechenden chemisch-technischen Syntheseverfahren verglichen. Ziel dieser exemplarischen Betrachtungen ist die Ableitung eines Spektrums verfahrenstechnischer, ökologischer und ökonomischer Vergleichsaspekte chemisch-technischer und biotechnischer Alternativen. Ferner sollen Aussagen über Hemmnisse, die einer großtechnischen Umsetzung entgegenstehen, über juristische Aspekte der biotechnischen Herstellung von Chemikalien, sowie über Umsetzungsperspektiven, Forschungs- und Förderungsbedarf abgeleitet werden.

(2) Die Festlegung der Auswahlkriterien für die Fallbeispiele und die Auswahl erfolgte gemeinsam mit dem Umweltbundesamt. Die näher zu betrachtenden biotechnischen Verfahren sollten gegenüber den chemisch-technischen Verfahren möglichst Vorteile hinsichtlich Ressourcenschonung und Emissionen erwarten lassen. Es sollten fermentative und enzymatische Verfahren berücksichtigt werden. Unter den ausgewählten biotechnischen Verfahren sollten auch solche sein, bei denen gentechnische Methoden zum Einsatz kommen.

Wichtig war ferner die Verfügbarkeit ausreichender Informationen über das jeweils gängige chemisch-technische Verfahren und die biotechnische Alternative. Die Informationen zu den chemisch-technischen Verfahren wurden der Literatur entnommen, da Primärerhebungen von Daten bei den einzelnen Herstellern den Rahmen dieser Untersuchung bei weitem überschritten hätten.

Aufgrund der unterschiedlichen Informationsverfügbarkeit wurde von vornherein nicht der Anspruch erhoben, alle ausgewählten Verfahren in der gleichen Tiefe zu betrachten.

Es wurden ausgewählt:	Fallbeispiel 1:	Aceton/Butanol
	Fallbeispiel 2:	1,3-Propandiol
	Fallbeispiel 3:	Vitamin C
	Fallbeispiel 4:	Adipinsäure.

Die wichtigsten Auswahlgründe waren:

Aceton/Butanol:	Beitrag zur Ressourcenschonung, fortgeschrittener Stand der Entwicklung (und damit gute Informationsverfügbarkeit).
1,3-Propandiol:	Verwertung von Reststoffen als Substrate, Zukunftsaussichten des Produkts, Informationsverfügbarkeit.
Vitamin C:	Umweltrelevanz des chemisch-technischen Verfahrens.

Adipinsäure: Umweltrelevanz des chemisch-technischen Verfahrens, Herstellungsmenge, Verwendung gentechnischer Methoden.

Dies stellt keine Vorauswahl für mögliche spätere Demonstrationsvorhaben (Kapitel 6) dar.

4.1 Fallbeispiel 1: Aceton/Butanol

Einführung

(1) **Aceton** wird als Grundstoff bei der Kunstharz- und Kunststoffherstellung, als Lösungsmittel in der Kosmetik-, Klebstoff- und Lackindustrie, sowie im Lebensmittel- und Pharmabereich eingesetzt. Es gibt in Deutschland insgesamt 7 Hersteller, die im Jahr 1998 rund 446 kt Aceton produzierten. Weltweit beträgt die jährliche Produktionsmenge ca. 4 Mio. t. Der Preis lag 1998 bei knapp 1 DM/kg (Statistisches Bundesamt 1999).

Etwa 70% des weltweit produzierten Acetons entsteht als Kuppelprodukt bei der Phenolherstellung aus dem Benzol-Derivat Cumol (Hock-Verfahren). Dieses Verfahren wird von den großen deutschen Herstellern von Aceton angewendet. Daneben gibt es verschiedene weitere Verfahren zur Herstellung von Aceton, die nach den vorliegenden Informationen jedoch in Deutschland nicht praktiziert werden. Eine Anlage zur Herstellung von Aceton aus Isopropanol (2-Propanol) wurde 1993 stillgelegt. In den USA wird Aceton weiterhin auch nach diesem Verfahren produziert.

(2) **1-Butanol**¹⁹ wird vorwiegend bei der Lackherstellung (als Lösungsmittel und als Eingangsstoff, z.B. für Acrylester) verwendet. Es gibt in Deutschland insgesamt 5 Hersteller, die 1998 rund 435 kt 1-Butanol produzierten. Über die weltweite Produktionsmenge liegen keine Angaben vor. Der Preis von 1-Butanol lag 1998 zwischen 0,80 und 0,90 DM/kg (Statistisches Bundesamt 1999).

Das wichtigste Herstellungsverfahren ist die Oxo-Synthese aus Propen. Weniger bedeutend ist das Reppe-Verfahren (ebenfalls aus Propen) und die Hydrierung von Crotonaldehyd.

Ethanol entsteht beim biotechnischen Verfahren im Vergleich zu Aceton und Butanol in geringen Mengen und wird demnach hier als Nebenprodukt betrachtet.

¹⁹

Im folgenden oft kurz "Butanol"

Chemisch-technische Herstellung²⁰

a) Aceton (Hock-Verfahren, Kuppelproduktion mit Phenol)

(3) Als chemisch-technisches Vergleichsverfahren zur Herstellung von Aceton wird das Hock-Verfahren herangezogen (siehe Abschnitt ökologische Aspekte). Beim Hock-Verfahren wird Aceton in 3 Stufen hergestellt:

1. Alkylierung von Benzol zu Cumol
2. Oxidation von Cumol zu Cumolhydroperoxid
3. Spaltung von Cumolhydroperoxid zu Aceton und Phenol.

Bei der Alkylierung von Benzol mit Propen werden die Eingangsstoffe zur Verhinderung von Polyalkylierung im Verhältnis von 5:1 eingesetzt. Die Reaktion von Propen mit Benzol ist exotherm (-113 kJ/mol). Die Reaktionswärme wird zum Vorheizen der Edukte verwendet. Die Reaktionsbedingungen sind von dem verwendeten Katalysator abhängig. Überwiegend (90% der Herstellungskapazität) wird Phosphorsäure auf Kieselgur verwendet. Die Reaktion erfolgt bei 200 bis 250°C und 30 bis 40 bar. Bei Verwendung von Fluorwasserstoff als Katalysator erfordert die Reaktion nur 50 bis 70°C und 7 bar.

Die Ausbeute an Cumol beträgt knapp 95 Gew.-%. Als Nebenprodukte entstehen typischerweise Diisopropylbenzol zu 3 Gew.-% und höher alkylierte Aromaten zu 2 Gew.-%. Sie werden aufgrund ihrer hohen Octanzahl als Benzinzusatz verwendet oder mit weiterem Benzol zu Cumol umalkyliert. Zur Reinigung wird zunächst das überschüssige Benzol, dann das Cumol destillativ abgetrennt.

(4) Die Oxidation von Cumol zu Cumolhydroperoxid ist eine radikalische Kettenreaktion, die durch das Produkt initiiert wird. Bei Verwendung von reinem Cumol läuft die Reaktion nur langsam an. Es wird deshalb mit einer Serie kontinuierlich betriebener Reaktoren gearbeitet. Durch die Reaktoren wird (ggf. mit Sauerstoff angereicherte) Luft hindurchgeblasen. Die Reaktionstemperatur liegt zwischen 80 und 130°C. Sie wird von Reaktor zu Reaktor gesenkt, um die temperaturbedingte Zersetzung des Cumolhydroperoxids zu verringern. Der Zusatz von Puffern und die Arbeit unter Druck (6 bar) senkt die Reaktionszeit von 10 bis 20 Stunden auf 4 bis 8 Stunden. Wird ein Puffer zugesetzt, so muß das Produkt vor der Kondensation gewaschen werden.

Eine Erhöhung der Cumolkonzentration begünstigt die Entstehung der Nebenprodukte Dimethylphenylmethanol und Acetophenon. In den meisten Anlagen liegt daher die Produkt-

²⁰

Die Beschreibung des chemisch-technischen Verfahrens basiert auf Römpp und Kirk-Othmer.

konzentration im letzten Reaktor bei höchstens 35 Gew.-%. Im Anschluß an die Oxidation wird Cumolhydroperoxid daher auf 80 Gew.-% konzentriert.

Weitere Nebenprodukte, die in geringen Mengen entstehen, sind Dicumylperoxid, Formaldehyd und Ameisensäure.

Die Oxidation von Cumol ist exotherm (-116 kJ/mol), es ist Kühlung erforderlich. Die verbrauchte Luft enthält organische Verbindungen, die bei Kühlung kondensieren und so entfernt werden können.

(5) Cumolhydroperoxid wird mit Hilfe katalytischer Mengen einer starken Säure zu Phenol und Aceton gespalten. Die Reaktion ist exotherm (-252 kJ/mol). Die entstehende Wärme muß abgeführt werden, da bei Temperaturen über 70°C sich außerdem Dimethylphenylmethanol und Acetophenon bilden. Dimethylphenylmethanol reagiert unter den Reaktions-temperaturen zu α -Methylstyrol oder zu Dicumylperoxid weiter. α -Methylstyrol kann zu Cumol hydriert und wieder dem Prozeß zugeführt oder anderweitig verwendet werden. Dicumylperoxid zersetzt sich durch Erhitzen auf 110 bis 140°C zu Aceton, Phenol und α -Methylstyrol.

Etwa 0,2 bis 0,5% des gebildeten Acetons reagieren mit dem Peroxid zu Hydroxyaceton. Unter den sauren Bedingungen kondensieren bis zu 0,1% des gebildeten Acetons zu Diacetonalcohol und Mesityloxid.

Die Produktabtrennung erfolgt nach Neutralisation durch Destillation.

Die chemisch-technische Herstellung von Aceton nach dem Hock-Verfahren ist in Abbildung 1 im Überblick dargestellt. Wiedergegeben sind typische Verfahrensparameter, die für einzelne Anlagen in Abhängigkeit von den örtlichen Verhältnissen abweichen können. Es werden nur solche Daten angegeben, die als repräsentativ anzusehen sind.

b) 1-Butanol (Niederdruck-Rhodium-Oxo-Synthese aus Propen)

(6) Bei der Oxo-Synthese wird 1-Butanol durch Hydroformylierung von Propen zu Butanal und Hydrierung des Aldehyds zum Alkohol hergestellt (Abbildung 2). Dabei wird Propen mit Wasserstoff und Kohlenmonoxid über einem Katalysator zur Reaktion gebracht.

Beim Niederdruck-Rhodium-Oxoverfahren werden die Ausgangsstoffe vermischt und über einen Zerstäuber dem Reaktor zugeführt. Der Reaktionskessel enthält einen wasserlöslichen Rhodiumkatalysator in der wäßrigen Phase. Die Reaktion erfolgt bei 50 bis 130°C und 10 bis 100 bar. Der Vorteil des wasserlöslichen Katalysators besteht darin, daß die Abtrennung von den nicht wasserlöslichen Produkten durch Dekantieren erfolgen kann und daher keine Verluste des teuren Edelmetallkatalysators auftreten. Außerdem lösen sich die hochsiedenden Kondensations-Nebenprodukte nicht in der wäßrigen Phase, so daß der Katalysator nicht gereinigt werden muß.

Die Reaktion ist exotherm. Die entstehende Wärme kann zur Dampferzeugung genutzt werden. Das verbrauchte Synthesegas kann abhängig von der Reinheit des eingesetzten Propens beträchtliche Mengen nicht umgesetzter Alkene enthalten.

Neben 1-Butanal entsteht zu 5 bis 8 Gew.-% 2-Methylpropanol, das ohne vorherige Trennung zum entsprechenden Alkohol hydriert werden kann.

(7) Die Hydrierung von Butanal erfolgt katalytisch in der Gasphase. Typische Reaktionsbedingungen sind 25 bis 196°C und 7 bar. Als Hydrierungsmittel wird dabei eine Mischung von Wasserstoff und Stickstoff im Verhältnis von 60:40 über einem Kupferoxid-Zinkoxid-Nickeloxid-Katalysator eingesetzt. Dabei entstehen 1-Butanol und 2-Methylpropanol im Verhältnis der eingesetzten Aldehyde. Die Trennung der Alkohole erfolgt destillativ. Aldehydreste sind dabei nur schwer von den Alkoholen zu trennen. Deshalb wird dem Gemisch vor der Destillation zur Entfernung von Aldehydspuren Alkali zugesetzt.

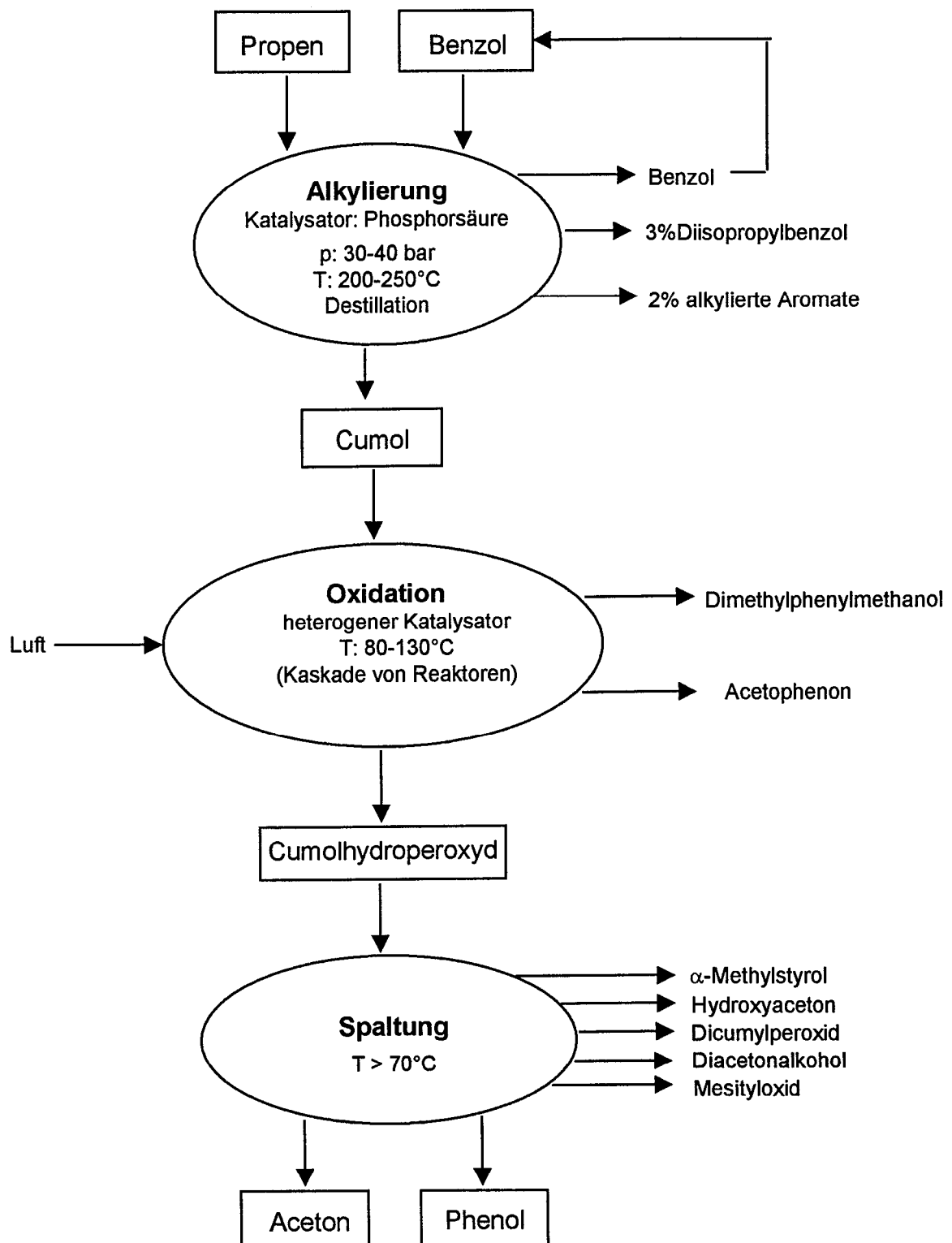


Abb. 1: Chemisch-technische Herstellung von Aceton (Hock-Verfahren)

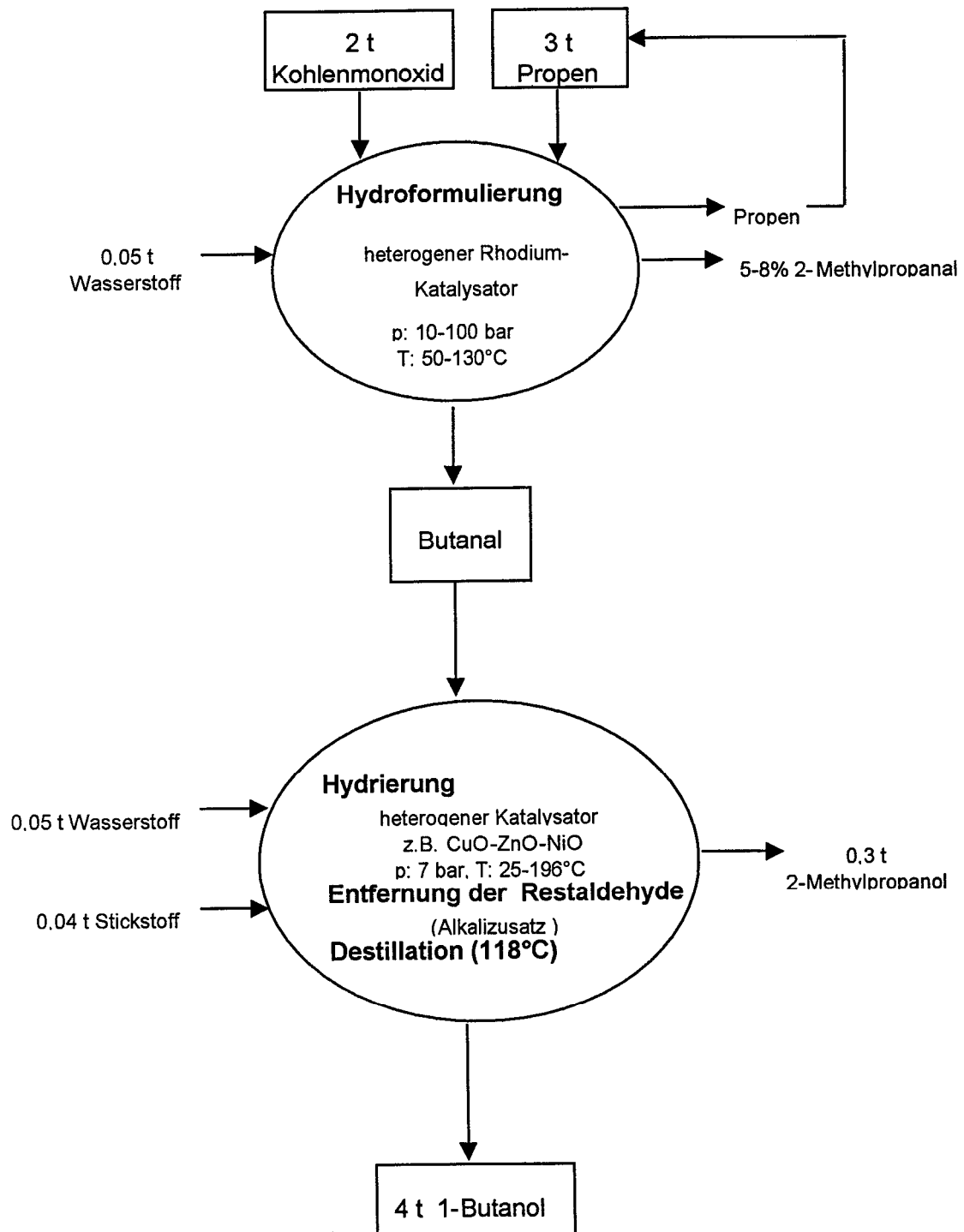


Abb. 2: Chemisch-technische Herstellung von Butanol (Oxoverfahren)

Biotechnische Herstellung (Kuppelproduktion Aceton/Butanol)

Historischer Aufriß²¹

(8) Die Produktion von Butanol durch Mikroorganismen wurde erstmals von Pasteur im Jahr 1861 beschrieben. Etwa 50 Jahre später stieg das Interesse an der fermentativen Herstellung von Butanol aufgrund des zunehmenden Bedarfs zur Herstellung von synthetischem Gummi. Es zeigte sich, daß *Clostridium acetobutylicum* und andere Clostridium-Spezies aus einer Reihe von stärkehaltigen Substraten Butanol – und als Kuppelprodukt Aceton – mit befriedigender Ausbeute liefert. 1913 wurde in England die Produktion nach dem von Weizmann entwickelten und später nach ihm benannten Prozeß aufgenommen. Mit Beginn des Ersten Weltkriegs stieg der Bedarf an Aceton als Lösungsmittel bei der Herstellung von Sprengstoff, und die fermentative Herstellung von Aceton und Butanol (insbesondere in ehemaligen Ethanolbrennereien) nahm einen ersten Aufschwung.

(9) Nach dem Ersten Weltkrieg wurden Aceton und Butanol in zahlreichen Ländern, u.a. in den USA, Indien, Japan, der UdSSR, China und Südafrika, fermentativ produziert. Damit war dies eines der ersten in großtechnischem Maßstab angewendeten industriellen Fermentationsverfahren und rangierte hinsichtlich der Produktionsmenge zeitweise an zweiter Stelle nach der Ethanolherstellung. 1945 wurden zwei Drittel des in den USA hergestellten Butanols fermentativ gewonnen, bei Aceton betrug der Anteil ein Zehntel. In den 50er Jahren wurde die fermentative Herstellung jedoch aus zwei Gründen ökonomisch zunehmend uninteressanter:

1. Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Melasse als Viehfutter stieg der Preis dieses seinerzeit wichtigsten Substrats.
2. Mit dem Aufkommen der Erdölchemie standen billige petrochemische Quellen für organische Lösungsmittel zur Verfügung.

Dies führte schließlich zur fast vollständigen Einstellung der industriellen Aceton/Butanol-Herstellung nach dem klassischen Weizmann-Verfahren.

Beschreibung des klassischen Weizmann-Prozesses

(10) Das konventionelle Verfahren ist die chargenweise anaerobe Fermentation bei ca. 33 bis 37°C über 40 bis 60 Stunden. Ausgangsstoff war zumeist eine Zuckerlösung mit etwa 60 g Zucker pro Liter, die vor dem Start der Fermentation durch Abkochen desinfiziert wurde.

²¹

Die historische Darstellung sowie die Beschreibung des klassischen Weizmann-Prozesses stützen sich weitgehend auf den Übersichtsartikel von Jones und Woods (Jones 1986).

Bei der chargenweisen Fermentation gibt es eine anfängliche Wachstumsphase, während der sich die Mikroorganismen vermehren, der pH-Wert im Medium sinkt und – abgesehen von Wasserstoff – keine nutzbaren Stoffwechselprodukte entstehen. Anschließend folgt die Phase der Lösungsmittelproduktion. Die Details der gut bekannten Stoffwechselprozesse sind in Jones 1986 beschrieben.

(11) Neben Aceton und Butanol entstehen bei der Fermentation mit Clostridien in Abhängigkeit von den benutzten Stämmen und den Verfahrensbedingungen weitere Stoffe, insbesondere Ethanol und Wasserstoff. Ein typisches Produktverhältnis ist 3:10:1 (Massenverhältnis Aceton:Butanol:Ethanol). Anstelle von Aceton kann durch Wahl entsprechender Produktionsstämme (Stämme mit Isopropanol-Dehydrogenase) Isopropanol produziert werden.

Bei Verwendung von Melasse als Substrat werden Lösungsmittel-Ausbeuten²² von 32% (32 g Lösungsmittel pro 100 g Substrat) oder mehr erzielt. Die energetische Ausbeute beläuft sich auf 71% (Tabelle 7). Die stündliche Produktionsrate beträgt bis zu ca. 1 g Lösungsmittel pro Liter Fermentationsbrühe.

Tab. 7 Typische Stoff- und Energiebilanz für den Weizmann-Prozeß mit *Clostridium acetobutylicum* (Substrat Glucose)

Produkt	Stoffliche Ausbeute [g pro g Glucose]*	Energetische Ausbeute (Energiegehalt Produkt/ Energiegehalt Substrat)**
Aceton	0,07	14%
1-Butanol	0,23	53%
Ethanol	0,02	4%
Summe Lösungsmittel	0,32	71%
Wasserstoff	0,015	14%
Organische Säuren	0,07	-
CO ₂	0,54	-

* Quelle: Jones 1986

** Eigene Berechnungen. Bezug: Unterer Heizwert, vgl. Gapes 2000

prognos 2000

²²

"Lösungsmittel" ist in diesem Zusammenhang die zusammenfassende Bezeichnung für die Produkte Aceton, Butanol und Ethanol.

Könnte die Fermentation so gesteuert werden, daß nur Butanol und CO_2 entstünden, so ergäbe sich theoretisch eine maximal mögliche stoffliche Ausbeute von 0,41 g Butanol pro g Glucose (1 mol Butanol pro mol Glucose). Die energetische Ausbeute betrüge in diesem hypothetischen Fall rund 90%.

Die maximal erreichbare Konzentration an Lösungsmitteln in der Fermentationsbrühe beträgt ca. 22 g/l und ist durch die Giftigkeit von Butanol für die Mikroorganismen bestimmt ("Produktinhibition"). Die Produktisolation und -konzentration erfolgte durch Destillation. Im Destillationsrückstand (Schlempe) sind etwa 4 g Feststoffe pro Liter enthalten. Die Feststoffe (nicht verwertbare Substratbestandteile wie Cellulose sowie bei der Fermentation erzeugte Biomasse) enthalten im Trockenzustand ca. 30% Proteine sowie B-Vitamine und können aufgrund ihres Ernährungswertes als Viehfutter oder Dünger verwendet werden. Die flüssigen Bestandteile der Schlempe sind wegen ihres Gehalts an Stickstoff und Phosphor behandlungsbedürftig. Der biologische Sauerstoffbedarf (BSB) des flüssigen Rückstands ist gering.

(12) Der konventionelle Fermentationsprozeß ist mit einer Reihe von spezifischen Nachteilen und Problemen behaftet:

- Butanol ist bereits bei geringen Konzentrationen giftig. Die in der Fermentationsbrühe erreichbaren Konzentrationen sind aufgrund von Produktinhibition gering.
Für die Produktisolation durch Destillation sind daher große Mengen Energie erforderlich.
- Die verwendeten Mikroorganismen sind stark anfällig für Infektionen, insbesondere durch Bakteriophagen. Die Desinfektion der Substrate durch Abkochen ist energieaufwendig.
- Es fallen große Mengen Abwasser an.

(13) Die Kosten der Herstellung von Aceton und Butanol nach dem klassischen Weizmann-Verfahren in Anlagen der seinerzeit üblichen Größe²³ waren mit ca. 60% durch die Substrate dominiert. Weitere 15 bis 20% machten die Energiekosten aus, wobei etwa zwei Drittel des Aufwands für die Destillation erforderlich waren und ein Drittel für die Desinfektion. Die Kapitalkosten der Fermentationsanlagen lagen deutlich unter denen der seinerzeitigen Anlagen zur chemisch-technischen Herstellung von Aceton und Butanol.

²³

Typisch waren Fermenter von 200 bis 800 m³

Das moderne biotechnische Verfahren (Technische Universität Wien)²⁴

(14) Seit der Entwicklung des Weizmann-Verfahrens gab es zahlreiche Versuche zur Eignung verschiedener Substrate und zur Optimierung des Prozesses. Hier sind u.a. zu nennen:

- Optimierung der Prozeßparameter
- Kontinuierliche Prozeßführung
- Suche nach geeigneteren natürlichen Produktionsstämmen ("Screening")
- Erzeugung künstlicher Mutanten mit "klassischen" Methoden (z.B. chemische Mutagenese, UV-Strahlung, Gentransfer durch Bakteriophagen) und gentechnischen Verfahren
- Verwendung immobilisierter Zellen
- Einsatz verschiedener Methoden zur Produktisolation.

Am Institut für Verfahrenstechnik, Brennstoff- und Umwelttechnik der Technischen Universität Wien wurde ein gegenüber dem klassischen Weizmann-Prozeß optimiertes Fermentationsverfahren entwickelt und in Form einer Pilotanlage realisiert.²⁵ Im folgenden wird dieses moderne Verfahren vorgestellt. Einige verfahrenstechnische Details wurden aus Geheimhaltungsgründen noch nicht publiziert und können daher in dieser Untersuchung nicht wiedergegeben werden.

(15) Das weiterentwickelte biotechnische Verfahren besteht in einer kontinuierlichen, zweistufigen Fermentation in einem Turm-Bioreaktor mit immobilisiertem *Clostridium beijerinckii* (oder anderen Clostridien). Als Trägermaterial für die Zellen dient ein synthetischer Bimsstein. Die beiden Fermentationsstufen der Pilotanlage haben 50 bzw. 200 Liter Volumen. Die zweite Stufe ist die eigentliche Produktionsstufe, die erste Stufe dient im wesentlichen der Vorbereitung der Produktionsphase.

Die an der TU Wien gewählte Betriebsweise führt zu verbessertem Stofftransport (Zufluß von Nährstoffen, Abtransport der Metaboliten, Vermeidung von Gasakkumulation) und ermöglicht eine Selbstreinigung bei Verstopfung. Ferner werden die Zellen nur geringen Scherkräften ausgesetzt, wodurch die mechanische Belastung reduziert wird.

(16) Bei der kontinuierlichen Betriebsweise erfolgt eine ständige Zugabe von Substrat. Die Produkte werden ebenfalls laufend abgetrennt (z.B. durch Membranevaporation). Der konti-

²⁴ Die folgenden Aussagen stützen sich auf Gapes 1996, Dürre 1998, Nimcevic 1998 und persönliche Mitteilungen von Dr. R. Gapes, TU Wien.

²⁵ Es wurden dort noch weitere Verfahrensvarianten entwickelt, die hier jedoch nicht näher betrachtet werden.

nuierliche Betrieb ermöglicht längere produktive Anteile (Verhältnis produktiver Zeiten zu Standzeiten), erfordert jedoch einen höheren Meß- und Regelaufwand.

Clostridien neigen in kontinuierlicher Kultur zu metabolischen Oszillationen, die zu Schwankungen der Stoffkonzentrationen in der Fermentationsbrühe im Zeitverlauf führen. Dieses Problem tritt bei diskontinuierlicher Betriebsweise (wie beim klassischen Weizmann-Verfahren) nicht auf. Es wird durch die zweistufige Prozeßführung und andere verfahrenstechnische Maßnahmen reduziert.

(17) Die kontinuierliche Prozeßführung erhöht die Empfindlichkeit für Infektionen der Produktionsstämme mit Bakteriophagen. Durch verfahrenstechnische Maßnahmen läßt sich das Infektionsrisiko zumindest im Pilotmaßstab reduzieren.

(18) Als Substrate kommen verschiedene Kohlenhydrate (z.B. aus Weizen, Kartoffeln, Mais) in Frage. Insbesondere können Clostridien Stärke direkt (also ohne vorherige Spaltung durch Amylase) verwerten. Es wurden auch verschiedene organische Abfälle als Substrate getestet und als geeignet befunden. Interessant sind vor allem solche Abfälle, die in größeren Mengen anfallen und die wegen des hohen Wassergehalts nicht verbrannt werden können bzw. der Abwasserreinigung zugeführt werden müssen (z.B. Rückstände der zucker- oder stärkeverarbeitenden Industrie). Verwertbar sind auch nicht vermarktungsfähige landwirtschaftliche Erzeugnisse (z.B. frostgeschädigte Kartoffeln, verschimmeltes Getreide), die alternativ kompostiert oder zu Ethanol vergoren werden könnten.

Eine Anreicherung des Fermentationsmediums mit Vitaminen und Mineralstoffen ist nicht erforderlich.

(19) Zur Produktabtrennung und –aufbereitung wurden verschiedene gängige Methoden (u.a. Membranevaporation, Flüssig/flüssig-Extraktion, Adsorption) untersucht. Die verschiedenen Methoden haben jeweils spezifische Vor- und Nachteile. Erfolgversprechend ist eine Produktabtrennung und –konzentration durch Membranevaporation mit anschließender Destillation zur Trennung und weiteren Konzentration der Produkte.

(20) Vor Beginn der eigentlichen Fermentation werden die Clostridien-Sporen einem Hitzeschock (z.B. 10 Minuten bei 85°C) ausgesetzt. Auf diese Weise erfolgt eine Selektion von weniger für Degeneration (Verlust der Fähigkeit zur Produktion von Lösemitteln) anfälligen Zellen.

Die Substratkonzentration beträgt ca. 6 Gew.-% Glucose. Die Fermentation erfolgt bei 35°C und ist – wie alle mikrobiellen Fermentationen – exotherm.

(21) Die Produktionsrate beträgt ca. 1 g Lösungsmittel/(h x l), höhere Werte sind erreichbar. Die Ausbeute variiert – je nach Verfahrensbedingungen – und beträgt typischerweise etwa 33% (0,33 g Lösungsmittel pro g Glucose). Die Produktverhältnisse Aceton:Butanol:Ethanol betragen zwischen 5:10:1 und 3:6:1.

Anstelle von Aceton kann durch Wahl entsprechender Produktionsstämme (mit Isopropanol-Dehydrogenase) Isopropanol (2-Propanol) gebildet werden.

Hinsichtlich der bei großtechnischer Produktion zuverlässig erreichbaren Endkonzentrationen an Lösungsmitteln gibt es in Expertenkreisen unterschiedliche Erwartungen. Bei kontinuierlicher Produktabtrennung ist die Endkonzentration kein wesentlicher Verfahrensparameter.

(22) Als Nebenprodukte entstehen bis zu 1,5 Gew.-% Wasserstoff, ca. 7 Gew.-% organische Säuren (insbesondere Essig- und Buttersäure), sowie 54 Gew.-% CO₂.

Als Reststoff fällt eine Schlempe an, deren Menge und Zusammensetzung stark von den eingesetzten Substraten und der konkreten Prozeßführung abhängt.

Das an der TU Wien weiterentwickelte biotechnische Verfahren mit Substrat Glucose ist in Abbildung 3 zusammenfassend dargestellt.

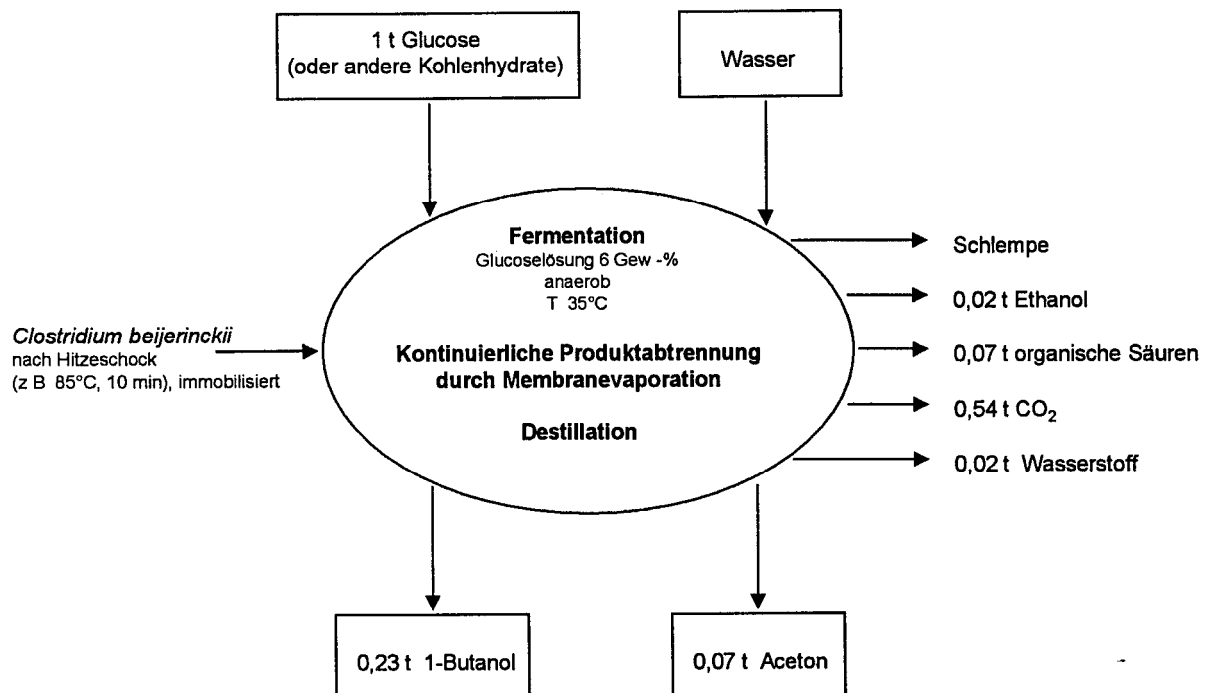


Abb. 3: Biotechnische Herstellung von Aceton und Butanol
(Technische Universität Wien, 1999)

Ökologische Aspekte

Vergleichsverfahren

(23) Für den ökologischen Vergleich zwischen chemisch-technischer und biotechnischer Herstellung von Aceton und Butanol ist zunächst zu definieren, mit welchem chemisch-technischen Herstellungsverfahren verglichen wird. Im Fall von Butanol ist dies die gängige Oxo-Synthese, die bei biotechnischer Herstellung betroffen wäre.

Aceton wird chemisch-technisch hauptsächlich nach dem Hock-Verfahren als Kuppelprodukt bei der Phenolherstellung gewonnen. Phenol ist als das eigentliche Hauptprodukt des Hock-Verfahrens zu betrachten. Die chemisch-technische Herstellung von Aceton aus Isopropanol wird nach den vorliegenden Informationen in Deutschland nicht praktiziert (ist aber z.B. in den USA neben dem Hock-Verfahren ebenfalls üblich).

Im Fall der biotechnischen Herstellung von Aceton wäre – sofern dies Auswirkungen auf die deutsche chemisch-technische Produktion hätte – die Kuppelproduktion im Zuge der Phenolherstellung (und demnach auch Phenol als Hauptprodukt) betroffen. Es ist natürlich ebenso denkbar, daß die deutsche Phenol-/Acetonherstellung im globalisierten Markt der Grundchemikalien von einer biotechnischen Gewinnung von Aceton weitgehend unbeeinflußt bliebe und stattdessen die ausländische Acetonproduktion nach dem Isopropanolverfahren im Sinne einer Substitution betroffen wäre.

(24) Es wird davon ausgegangen, daß **kurz- bis mittelfristig** nur vergleichsweise geringe Mengen Aceton (Größenordnung ca. 5% der deutschen Gesamtproduktion) biotechnisch hergestellt würden (vgl. Abschnitt "Ökonomische Aspekte, unten). Dies bewegt sich im Rahmen der übliche Marktschwankungen bei Grundchemikalien, denen auch die Phenolproduktion unterliegt, und die sich in entsprechend schwankenden Phenol- und Acetonherstellungsmengen nach dem Hockverfahren widerspiegeln.

Mit biotechnischer Herstellung von Aceton in größerem Umfang ist erst längerfristig zu rechnen. Es ist jedoch gegenwärtig nicht absehbar, welche Produktionsstrukturen durch eine **längerfristige** Substitution betroffen wären.

In dieser Untersuchung wird aus den genannten Gründen das in Deutschland übliche **Hock-Verfahren** als chemisch-technisches Vergleichsverfahren herangezogen.

a) Chemisch-technische Herstellung von Aceton (Hock-Verfahren)

(25) Unter Umweltgesichtspunkten sind zunächst die atmosphärischen Emissionen des Hock-Verfahrens zu betrachten. Pro produzierter Tonne wurden 1992 bei einem deutschen Hersteller bei Produktion, Lagerung und Transport im Durchschnitt 100g Aceton emittiert (BUA 1996). Neuere Angaben liegen nicht vor. Ferner erfolgen geringfügige diffuse

Emissionen (aus Ventilen etc.) der übrigen am Prozeß beteiligten Kohlenwasserstoffe (insbesondere Benzol und Benzolderivate, vgl. Abb. 1). Insgesamt belaufen sich die atmosphärischen Kohlenwasserstoff-Emissionen der Acetonherstellung in den USA auf 0,023% der gesamten Emissionen von Kohlenwasserstoffen in den USA.

Im Waschwasser des Prozesses befinden sich Aceton, Phenol, Cumol, α -Methylstyrol und andere Kohlenwasserstoffe, die in der Abwasserreinigung weitgehend entfernt werden.

Es ist davon auszugehen, daß die kohlenwasserstoffhaltigen Rückstände durch Verbrennung entsorgt werden. Über Menge und Zusammensetzung der Abfälle liegen keine Angaben vor.

(26) Der erste Verfahrensschritt, die Alkylierung, ist exotherm (-113 kJ/mol) und erfolgt bei deutlich erhöhten Temperaturen (200 bis 250°C) und Drücken zwischen 30 und 40 bar. Die Reaktionsenergie wird zum Vorheizen der Edukte verwendet. Auch der zweite (Oxidation) und dritte (Spaltung) Reaktionsschritt ist exotherm (-116 bzw. -252 kJ/mol), es ist jeweils Kühlung erforderlich. Über den genauen Prozeßenergiebedarf (unter Berücksichtigung des eingesetzten Katalysators und der Restwärmenutzung am konkreten Standort) liegen in der Literatur keine Angaben vor. Die erforderliche Prozeßenergie wird in der Regel aus fossilen Energieträgern gewonnen und ist mit entsprechenden CO₂-Emissionen verbunden.²⁶

Das Verfahren geht von petrochemischen Rohstoffen aus (Propen und Benzol).

(27) Das Risikopotential durch den Umgang mit gefährlichen Stoffen (Gefahrstoffen) wird anhand der Eigenschaften der Stoffe angegeben. Als Kriterien dienen dabei (vgl. Hörath 1997)

- Gesundheitsrisiko für den Menschen gemäß den Einstufungen der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV): Sehr giftig, giftig, krebserzeugend usw.
- Wassergefährdung gemäß VwVwS: Wassergefährdungsklassen (WGK)
- Brand- und Explosionsrisiko gemäß den Einstufungen der GefStoffV: hochentzündlich, leichtentzündlich usw. (siehe Hörath 1997)

Es sei darauf hingewiesen, daß die Risikopotentiale nur im Störfall zum Tragen kommen. In der Regel sind für problematische Stoffe besondere Vorkehrungen erforderlich, die das Eintreten von Störfällen verhindern bzw. die Auswirkungen von Störfällen begrenzen.

Für den bestimmungsgemäßen Betrieb von Anlagen dienen die maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK-Werte) dem Schutz der Gesundheit am Arbeitsplatz. Der MAK-Wert

²⁶

Die Bereitstellung einer Tonne Prozeßdampf von 15 bar erfordert ca. 3 GJ. Eine erdgasbetriebene Industrie-
feuerungsanlage emittiert bei der Erzeugung etwa 180 kg CO₂.

ist die höchstzulässige Konzentration eines Gefahrstoffes als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft am Arbeitsplatz, die nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnis auch bei wiederholter und langfristiger Exposition im allgemeinen die Gesundheit der Beschäftigten nicht beeinträchtigt und diese nicht unangemessen belastigt (vgl. DFG 1998). Da die MAK-werte in jedem Fall einzuhalten sind, wird hier davon ausgegangen, daß im bestimmungsgemäßen Betrieb von Gefahrstoffen keine gesundheitlichen Risiken für die Beschäftigten ausgehen.

(28) Für das Hock-Verfahren zur Herstellung von Aceton resultiert das Risikopotential überwiegend aus dem krebserregenden (Kategorie 1, siehe DFG 1997) und stark wassergefährdenden Benzol (WGK 3). Benzol ist ferner giftig im Sinne der GefStoffV. Die Zwischen- bzw. Nebenprodukte Cumol und Acetophenon sind schwach wassergefährdend (WGK 1). Von dem Zwischenprodukt Cumolhydroperoxid geht im Störfall ein Gesundheitsrisiko ("gesundheitsschädlich") und eine Wassergefährdung (WGK 2) aus. Der Eingangsstoff Propen ist hochentzündlich. Das neben Aceton als Hauptprodukt anfallende Phenol ist möglicherweise krebserzeugend (Kategorie 3), wassergefährdend (WGK 2) und giftig.

b) Chemisch-technische Herstellung von 1-Butanol (Oxo-Synthese)

(29) Über die atmosphärischen Emissionen des Niederdruck-Rhodium-Oxoverfahrens liegen keine Informationen vor. Aufgrund der Stoffströme und des Prozesses (vgl. Abbildung 2) ist nur mit geringen diffusen Emissionen (Kohlenmonoxid, Propen, 2-Methylpropanol) zu rechnen.

Es fällt kein Prozeß-Abwasser an. Über Menge und Zusammensetzung der Abfälle liegen keine Angaben vor.

(30) Der Energiebedarf des Verfahrens gilt im Vergleich zu anderen chemisch-technischen Syntheseverfahren zur Herstellung von Butanol als gering. Die freigesetzte Reaktionswärme wird durch Wärmetauscher zur Gewinnung von Prozeßdampf genutzt.

Die Eingangsstoffe Kohlenmonoxid, Propen und Wasserstoff stammen aus fossilen Rohstoffen.

(31) Das stoffliche Risikopotential bei der Herstellung von Butanol durch Niederdruck-Oxo-synthese besteht in der hohen Entzündlichkeit von Kohlenmonoxid, Propen und Wasserstoff sowie in der Giftigkeit von Kohlenmonoxid.

c) Biotechnische Herstellung von Aceton und Butanol

(32) Das biotechnische Verfahren zur Herstellung von Aceton und Butanol ist potentiell – ebenso wie die chemisch-technischen Verfahren – mit diffusen atmosphärischen Emissionen von Lösungsmitteln im Zuge von Herstellung und Handhabung der Produkte verbunden (Fermentation, Destillation, Tankatmung).

Die Schlempe aus der zweiten Fermentationsstufe enthält Lösungsmittel. Ohne weitere Maßnahmen beträgt die Konzentration etwa 1 bis 3 g pro Liter. Der Verlust an Lösungsmitteln auf diesem Weg beträgt im Pilotmaßstab 1 bis 2%. Bei Verwertung der Schlempe oder von Bestandteilen der Schlempe als Dünger bzw. Viehfutter ohne vorherige Behandlung erfolgt ein Eintrag von Lösungsmitteln in die Umwelt.

Die genaue Menge an Schlempe, der Feststoffanteil (Rest unverdauten Substrats und bei der Fermentation gebildete Biomasse) und die Zusammensetzung des flüssigen Anteils hängen vom eingesetzten Substrat sowie den Prozeßbedingungen ab. Sie können daher im gegenwärtigen Stadium für eine großtechnische Anlage nicht präzisiert werden.

Der flüssige Anteil der Schlempe muß – sofern er nicht als Dünger verwertet wird – aufgrund seines Stickstoff- und Phosphorgehalts einer Abwasserreinigungsanlage zugeführt werden.

Der Feststoffanteil der Schlempe kann aufgrund seines Nährwerts als Viehfutter eingesetzt werden oder als Dünger verwertet werden. Beides setzt entsprechende Aufnahmekapazitäten voraus. Im Fall des Einsatzes als Viehfutters ist das Aufnahmepotential durch die Viehhaltung (insbesondere im Umfeld einer Fermentationsanlage) und ernährungsphysiologische Gesichtspunkte bestimmt.

Vor Verwendung als Viehfutter oder Dünger in der Umgebung der Anlage dürfte ferner eine Desinfektion erforderlich sein.²⁷ Der Grund hierfür liegt nicht etwa in der Gefährlichkeit der Schlempe für die Umwelt. Vielmehr würde durch Desinfektion die Vermehrung von Bakteriophagen in der Umgebung der Anlage reduziert. Dies ist zur Minimierung des Risikos einer Infektion der Produktionsstämme mit Bakteriophagen wünschenswert.²⁸

(33) Wichtig für die vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung ist die Herkunft der eingesetzten Substrate. Die Clostridien können eine Vielzahl unterschiedlicher Substrate verwerten. Insbesondere ist die Verwendung von stärke- oder zuckerhaltigen Reststoffen aus

²⁷

Ob eventuelle Lösungsmittelreste die Verwertung als Viehfutter einschränken, ist nicht bekannt. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Lösungsmittel im Zuge einer Desinfektion aufgrund ihrer Flüchtigkeit weitgehend aus dem Futter eliminiert werden. Die Abluft der Desinfektionsanlage wäre so zu behandeln, daß keine schädlichen Lösemittelmmissionen auftreten (z.B. durch Nachverbrennung).

²⁸

Es gibt Hinweise, daß die Kontamination der Umgebung mit Bakteriophagen nach Freiwerden von Clostridien aus einer früheren Aceton/Butanol-Fermentationsanlage den weiteren Betrieb der Anlage durch Infektion der Produktionsstämme beeinträchtigte.

der Landwirtschaft (z.B. frostgeschädigte Kartoffeln) oder aus der Stärke- und Zuckerverarbeitung möglich. Es wird hier davon ausgegangen, daß keine eigens zu diesem Zweck angebauten landwirtschaftlichen Erzeugnisse (z.B. Weizen) als Substrate verwendet werden. Unter diesen Umständen entsteht keine zusätzliche Umweltbelastung durch eine landwirtschaftliche Erzeugung der Substrate.

Die Stärke kann von den Produktionsstämmen direkt (ohne vorherige Spaltung) verwertet werden. Dies würde einen energieaufwendigen enzymatischen Aufschluß des Substrats (typisch sind 2 Stufen mit 60 und 80°C) überflüssig machen. Aus verfahrenstechnischen Gründen (Reduktion der Viskosität) kann jedoch eine teilweise Hydrolyse (z.B. in nur einer Stufe) sinnvoll sein.

(34) Bei der Fermentation wird Wärme frei. Abhängig von der Größe der Fermenter und den genauen Prozeßbedingungen kann bei großtechnischer Umsetzung insbesondere im Sommer eine Kühlung erforderlich sein.

Der Prozeßenergiebedarf wird durch die Produktabtrennung und –aufbereitung dominiert. Nach gegenwärtigem Stand bietet sich für eine großtechnische Umsetzung eine Kombination von Membranevaporation und nachfolgender Destillation an. Beide Schritte benötigen Energie. Der genaue Energieverbrauch hängt von der konkreten Ausgestaltung des Verfahrens und den Gegebenheiten am Standort (z.B. Wärmeerzeugung und –rückgewinnung) ab und kann letztlich erst im Zuge des Scale up bestimmt werden.

Die Energiebilanz wird ferner von der Nutzung des bei der Fermentation freiwerdenden Wasserstoffs beeinflusst. Der Brennwert des Wasserstoffs beträgt ca. 10 bis 14% des Brennwertes des eingesetzten Substrats. Diese Größenordnung läßt eine energetische Nutzung (z.B. zur Erzeugung von Prozeßwärme für die Destillation) sinnvoll erscheinen.

(35) Als Nebenprodukte fallen ferner etwa 7 Gew.-% organische Säuren an. Je nach Abtrennmodul können diese gewonnen und verwertet werden. Der Verwertung steht jedoch der Aufwand für die Aufbereitung entgegen, der angesichts der voraussichtlich erzielbaren Erlöse nicht gerechtfertigt erscheint. Wahrscheinlicher ist eine Zuführung in die Abwasserreinigungsanlage. Dazu könnte eine vorherige Neutralisation erforderlich sein. In diesem Fall, der im Zuge der großtechnischen Umsetzung zu prüfen wäre, enthielte das Abwasser entsprechende Neutralisationssalze.

(36) Das Risikopotential des biotechnischen Verfahrens resultiert aus dem hochentzündlichen Nebenprodukt Wasserstoff.

Vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung

(37) Insgesamt ergibt sich aus den zuvor dargelegten Sachverhalten folgende vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung zwischen chemisch-technischer und biotechnischer Herstellung von Aceton und Butanol (vgl. Tabelle 6 in Kapitel 3):²⁹

a) Acetonherstellung³⁰

- **Humantoxizität:** Aufgrund möglicher Emissionen von Lösungsmitteln im Zuge der Verwertung von Reststoffen des biotechnischen Verfahrens wird ein zusätzliches Belastungspotential gesehen, sofern diese Emissionen nicht durch technische Gegenmaßnahmen im Zuge der großtechnischen Umsetzung reduziert werden (– bzw. 0). Das Risiko durch den Umgang mit Benzol und Cumolhydroperoxid beim chemisch-technischen Verfahren kommt nur im nicht-bestimmungsgemäßen Betrieb zum Tragen.
- **Ökotoxizität:** Neutral (0) bis mittleres Belastungspotential (–).
- **Aquatische und terrestrische Eutrophierung:** Neutral (0), sofern das biotechnische Verfahren Reststoffe als Substrate einsetzt.
- **Naturraumbeanspruchung:** Neutral (0), sofern das biotechnische Verfahren Reststoffe als Substrate einsetzt. Es erfolgt im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Verwertung der Reststoffe als Dünger eine „Verrechnung“ wegen des angenommenen Einsatzes von Reststoffen.
- **Photochemische Oxidantienbildung (Beitrag zum Sommersmog):** Aufgrund möglicher Emissionen von Ozon-Vorläufersubstanzen (Lösungsmitteln) bei der Verwertung von Reststoffen des biotechnischen Verfahrens wird ein zusätzliches Belastungspotential gesehen (–). Auch diese Einschätzung gilt nur unter der Maßgabe, daß diese Emissionen bei großtechnischer Umsetzung nicht durch technische Maßnahmen vermieden werden (In diesem Fall: 0).
- **Abbau stratosphärischen Ozons:** Neutral (0)
- **Treibhauswirkung:** Neutral (0)
- **Versauerung:** Neutral (0)
- **Verbrauch fossiler Rohstoffe:** Einsparung von fossilen Rohstoffen, die als Feedstock bei der chemisch-technischen Herstellung verwendet werden (+). Die Bilanz des Prozeßenergieverbrauchs ist aufgrund nicht näher spezifizierter Prozeßparameter nur überschlägig abschätzbar und wird als neutral eingestuft.

²⁹

Legende Im Vergleich zum chemisch-technischen Verfahren ergeben sich für den biotechnischen Prozeß Umweltentlastungen (+), Umweltbelastungen (–) oder keine Auswirkungen.

³⁰

Das chemisch-technische Vergleichsverfahren für die Herstellung von Aceton ist das Hock-Verfahren (vgl. S. 62).

b) Butanolherstellung

- **Humantoxizität:** Aufgrund möglicher Emissionen von Lösungsmitteln im Zuge der Verwertung von Reststoffen des biotechnischen Verfahrens wird ein geringes zusätzliches Belastungspotential gesehen, sofern keine technischen Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen ergriffen werden (– bzw. 0).
- **Ökotoxizität:** Neutral (0).
- **Aquatische und terrestrische Eutrophierung:** Neutral (0), sofern das biotechnische Verfahren Reststoffe als Substrate einsetzt.
- **Naturraumbeanspruchung:** Neutral (0), sofern das biotechnische Verfahren Reststoffe als Substrate einsetzt.
- **Photochemische Oxidantienbildung** (Beitrag zum Sommersmog): Aufgrund möglicher Emissionen von Ozon-Vorläufersubstanzen (Lösungsmitteln) bei der Verwertung von Reststoffen des biotechnischen Verfahrens wird ein geringes zusätzliches Belastungspotential gesehen, sofern keine besonderen technischen Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen getroffen werden (– bzw. 0).
- **Abbau stratosphärischen Ozons:** Neutral (0)
- **Treibhauswirkung:** Neutral bis leicht negativ, sofern die Reaktionswärme des chemisch-technischen Verfahrens zur Substitution fossiler Energieträger für die Erzeugung von Prozeßenergie genutzt werden kann (0/–).
- **Versauerung:** Neutral (0)
- **Verbrauch fossiler Rohstoffe:** Die Einsparung an fossilen Rohstoffen, die als Feedstock bei der chemisch-technischen Herstellung verwendet werden, überwiegt einen eventuellen höheren Prozeßenergiebedarf des biotechnischen Verfahrens (abhängig von Wärmerückgewinnung und Wasserstoffnutzung). Insgesamt ergibt sich hinsichtlich fossiler Rohstoffe ein Einsparungspotential durch Nutzung des biotechnischen Verfahrens (+).

Der Wasserbedarf (Prozeß- und Kühlwasser) für die biotechnische Herstellung von Aceton und Butanol kann auf der Basis der vorliegenden Informationen nicht abgeschätzt werden, da er von zahlreichen, im gegenwärtigen Entwicklungsstadium noch nicht hinreichend spezifizierten Parametern (Substrat, verfahrenstechnische Auslegung) abhängt.³¹

³¹

Bei Nutzung von stärkehaltigen Lösungen, z.B. Reststoffen aus Konservenfabriken, kann der Wasserbedarf sehr gering sein. Der andere Extremfall wäre das Anmaischen von Feststoffen, z.B. Getreide, mit Frischwasser auf eine Konzentration von 6 Gew.-%. Für eine Produktion von 10.000 t Aceton und Butanol wären rund 33.000 t Stärke erforderlich, die mit ca. 560.000 m³ Wasser anzumaischen wären.

Ökonomische Aspekte

(38) Die Kosten der biotechnischen Herstellung von Aceton und Butanol werden wesentlich durch die Substratkosten bestimmt. Bei Verwendung von eigens dafür erzeugten landwirtschaftlichen Produkten (z.B. Weizen oder Mais) betrugen die Substratkosten des historischen Weizmann-Verfahrens etwa 60% der gesamten Herstellungskosten.³² Die übrigen 40% der Kosten verteilen sich auf die Infrastruktur, Betriebsmittel (einschließlich Energie) und Personal.

Die Anlagenkosten könnten durch Nutzung bestehender Infrastruktur wesentlich gesenkt werden. Aufgrund der technischen Ähnlichkeit der Prozesse bieten sich hierfür Anlagen zur fermentativen Erzeugung von Ethanol an, die nach vergleichsweise geringfügigen Umrüstungen (insbesondere hinsichtlich der Produktabtrennung) für die fermentative Herstellung von Aceton und Butanol (wenngleich nicht im selben Maß wie eine speziell errichtete Anlage) geeignet wären. Im Zuge der offenbar bevorstehenden Abschaffung des Branntweinmonopols in Deutschland und des damit voraussichtlich verbundenen Preisverfalls für Ethanol ist zu erwarten, daß gerade kleinere und damit weniger wirtschaftliche Anlagen zur fermentativen Herstellung von Ethanol den Betrieb einstellen.³³

(39) Wie oben dargelegt, wird hier davon ausgegangen, daß als Substrate Reststoffe aus der Landwirtschaft oder der zucker- bzw. stärkeverarbeitenden Industrie eingesetzt werden. Die Kosten für solche Substrate hängen wesentlich von der alternativen Verwendung, der Aufbereitung und dem Transport ab. Werden zucker- oder stärkehaltige Abwässer eingesetzt, die ansonsten einer Abwasserreinigungsanlage zugeführt würden, so entfielen die Kosten der Abwasserreinigung.

Über anfallende Mengen geeigneter Reststoffe und ihre derzeitige Verwertung/Entsorgung liegen keine detaillierten Informationen vor (vgl. Großmann 1998).

(40) Grundsätzlich ist festzuhalten, daß eine hohe räumlich-zeitliche Umsetzungsrate (Menge der stündlich gebildeten Produkte im Verhältnis zur Fermentergröße) für die Wirtschaftlichkeit einer Fermentationsanlage wichtig sein kann, da eine geringe Anzahl von Fermentern geringere Infrastrukturkosten bedeutet. Der tatsächliche Beitrag dieses Faktors für die Wirtschaftlichkeit eines Prozesses kann nur in einer detaillierten Wirtschaftlichkeitsuntersuchung geklärt werden.

³²

Bei einem Zuckerpreis von 0,50 DM/kg und einer stofflichen Ausbeute von 33% (0,33 kg Lösungsmittel pro kg Zucker) betrügen allein die Substratkosten 1,50 DM pro kg Lösungsmittel.

³³

In Österreich ist nach Abschaffung des Branntweinmonopols genau dies erfolgt.

Ferner ist ein möglichst hoher Anteil produktiver Zeiten (in Relation zu Standzeiten) anzustreben. Wichtig für einen wirtschaftlichen Betrieb ist daher die ganzjährige Verfügbarkeit der Substrate, da dies die erreichbare Anlagenauslastung mitbestimmt.

(41) Ein weiterer Kostenfaktor ist der Prozeßenergiebedarf. Dieser hängt wesentlich von der im großtechnischen Maßstab eingesetzten Verfahren zur Produktabtrennung und –aufbereitung ab, da dies die energie-intensivsten Schritte sind. In jedem Fall erfordern die aufgrund der Produktinhibition vergleichsweise geringen Produktkonzentrationen einen hohen Aufwand, der sich kostenseitig entsprechend niederschlägt.

(42) Das Potential an geeigneten Rohstoffen (insbesondere bei Nutzung von Reststoffen als Substrat) und die erforderliche Verwertung von Reststoffen der Fermentation als Dünger oder Viehfutter schränken die Größe von Anlagen zur biotechnischen Herstellung von Aceton und Butanol ein. Eine Kapazität von ca. 10.000 Tonnen Lösungsmitteln pro Jahr könnte eine beiden Aspekten entsprechende Dimension sein.

(43) Über die Beschäftigungswirkungen einer biotechnischen Anlage zur Herstellung von Aceton und Butanol nach dem Verfahren der TU Wien liegen keine Angaben vor. Daher wird hier versucht, durch Analogiebetrachtungen zu einer ersten Abschätzung zu kommen:

Anlagen zur biotechnischen Herstellung von Aceton und Butanol sind den bestehenden Anlagen zur fermentativen Gewinnung von Ethanol hinsichtlich Technik und typischer Größe ähnlich. Da in einer Aceton/Butanol-Anlage aufgrund geringerer Produktkonzentrationen pro Tonne Produkt größere Stoffströme fließen als bei der Ethanolherstellung kann davon ausgegangen werden, daß die Anzahl der in der Produktion Beschäftigten bei der Herstellung von Aceton und Butanol etwas höher liegt als bei einer vergleichbar großen Anlage zur fermentativen Herstellung von Ethanol. Voraussichtlich wäre die Beschäftigungsintensität in einer biotechnischen Aceton/Butanol-Anlage in den ersten Jahren, in denen weitere verfahrenstechnische Optimierungen zu erwarten sind, höher als im späteren Routinebetrieb. In einer modernen Anlage mit einer Kapazität von 10.000 t Aceton und Butanol dürften nach einer ersten Schätzung der Autoren dieses Berichts etwa 10 bis 15 Personen beschäftigt sein. Hinzu kommen die mit dem Transport der Substrate und der Entsorgung der Reststoffe beschäftigten Personen, sowie Verwaltung und Vertrieb. Die Abhängigkeit der Anzahl der in der Anlage Beschäftigten von der Kapazität dürfte eher gering sein.

Unter der Annahme der Verwertung von Reststoffen als Substrate treten in der Landwirtschaft keine direkten Beschäftigungswirkungen auf, da kein Pflanzenanbau zum Zweck der Aceton/Butanol-Herstellung angebaut werden.

Generell ist festzuhalten: Chemisch-technische Anlagen zur Herstellung von Grundchemikalien haben erheblich größere Kapazitäten als eine biotechnische Anlage zur Herstellung von Aceton und Butanol (die – wie oben dargestellt – aufgrund der Rohstoff-

beschaffung und der Reststoffentsorgung vermutlich eine Kapazität von ca. 10.000 t nicht überschreiten würde) und realisieren hinsichtlich des Personalbedarfs deutliche Größeneffekte. Anders ausgedrückt: Die üblichen großen chemisch-technischen Anlagen (mit einer Kapazität von 100.000 t und mehr) benötigen – bezogen auf die Produktionsmenge – weniger Arbeitskräfte als eine biotechnische Anlage mit 10.000 t. Es kann also davon ausgegangen werden, daß die anteiligen Personalkosten für biotechnisch hergestelltes Aceton und Butanol höher liegen als bei der chemisch-technischen Produktion. Quantitative Angaben hierzu liegen nicht vor.

Damit verbunden sind positive Beschäftigungseffekte bei biotechnischer Herstellung von Aceton und Butanol im Vergleich zur chemisch-technischen Produktion. Dies reflektiert den bekannten Zielkonflikt zwischen einer Reduktion der Personalkosten und der Anzahl der Arbeitsplätze.

Es ist zu beachten, daß eine biotechnische Herstellung von Aceton und Butanol voraussichtlich im ländlichen Raum erfolgen würde. Die zu erwartenden Beschäftigungseffekte kommen damit potentiell strukturschwachen Gebieten zugute.

(44) Das Marktaufnahmepotential für Aceton und Butanol kann aufgrund des zunächst geringen Anteils der biotechnischen Produktion an der gesamten Produktionsmenge (deutlich unter 10%) als gegeben angesehen werden. Allerdings ist angesichts des zu erwartenden Preisniveaus für petrochemische Rohstoffe (vgl. Kapitel 5) und der derzeitigen Konkurrenzsituation im Bereich Petrochemikalien weiterhin mit einem vergleichsweise niedrigen Preisniveau für Aceton und Butanol zu rechnen.

Einen nennenswerten Anteil an der Gesamtproduktion von Aceton und Butanol kann das biotechnische Verfahren aufgrund der beschriebenen ökonomischen Rahmenbedingungen voraussichtlich allenfalls langfristig erreichen. Eine spürbare, schnelle Substitution chemisch-technischer Anlagen zur Herstellung von Aceton und Butanol würde es daher nicht geben. Vielmehr würde der kontinuierliche Aufbau von biotechnischen Produktionskapazitäten zu einem allmählichen teilweisen Übergang von der ausschließlich chemisch-technischen Herstellung zur partiellen biotechnischen Gewinnung führen. Die chemisch-technische Kuppelproduktion von Phenol und Aceton – wie oben erwähnt stammen ca. 70% des Acetons aus der Kuppelproduktion mit Phenol – wäre aufgrund des zu erwartenden langsamen Übergangs nicht unmittelbar von einer verstärkten biotechnischen Herstellung von Aceton betroffen. Langfristig (also bei nennenswerter biotechnischer Produktion) würde das biotechnische Verfahren möglicherweise in Konkurrenz zur chemisch-technischen Produktion von Aceton aus Isopropanol treten.

Während eine Substitution von Verfahren vor Ablauf der Abschreibungsfrist der Produktionsanlagen einen Vermögensverlust für das Unternehmen in Höhe des noch nicht abgeschriebenen Wiederbeschaffungswertes bedeutete, tritt ein solcher Vermögensverlust bei langsamen Übergängen nicht auf, da eine langsame Einführung biotechnischer Verfahren die

Nutzung der bestehenden chemisch-technischen Produktionsanlagen mindestens bis zum Ablauf der Abschreibungsfrist erlaubt.

Nach Ablauf der Abschreibungsfrist wird "am goldenen Ende" produziert – die Investition hat sich amortisiert, der Kapitaldienst (Abschreibung und Zinsen) entfällt. Bei einer Verfahrensumstellung von technisch betriebsfähigen chemisch-technischen Anlagen in diesem Stadium würden diese Einsparungen entfallen. Allerdings wäre unter diesen Umständen eine Verfahrensumstellung wirtschaftlich zumutbar, da sich die Investition bereits amortisiert hat.

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, daß eine allfällige biotechnische Produktion von Aceton und Butanol nur langsam in Gang käme und nicht mit nennenswerten volks- oder betriebswirtschaftlichen Kosten für den vorzeitigen Ersatz betriebsfähiger chemisch-technischer Anlagen verbunden wäre.

Rechtliche Aspekte

(45) Bisher wurden die meisten Chemikalien auf chemisch-technischem Wege hergestellt. Errichtung und Betrieb der dazu erforderlichen Anlagen sind einer staatlichen Kontrolle, insbesondere durch das Immissionsschutzrecht (Bundes-Immissionsschutzgesetz und zugehöriges untergesetzliches Regelwerk), unterworfen.

In diesem Abschnitt wird der Frage nachgegangen, ob die Regelungen, die im Fall einer biotechnischen Herstellung von Aceton und Butanol zur Anwendung kämen, vor den nach heutiger Kenntnis zu erwartenden Umweltwirkungen in angemessener Weise schützen bzw. ausreichend Vorsorge gewährleisten. Da es sich um eine Betrachtung von juristischen Aspekten im Zusammenhang mit potentiellen Umweltwirkungen einer großtechnischen biotechnischen Produktion von Aceton und Butanol handelt, wird hier nur auf Aspekte eingegangen, die unmittelbar mit dem Umgang mit Stoffen bzw. Mikroorganismen und den daraus möglicherweise resultierenden Umweltwirkungen verknüpft sind. Es wird auf jene Gesichtspunkte fokussiert, die spezifisch für das biotechnische Verfahren sind. Dies umfaßt den Schutz der Beschäftigten in der Anlage und der Umwelt außerhalb der Anlage. Nicht betrachtet werden z.B. Baugenehmigung, Anzeigepflicht gemäß Gewerbeordnung usw.

(46) Die in diesem Abschnitt zu untersuchende Frage kann endgültig erst dann beantwortet werden, wenn für das Verfahren tatsächlich eine Genehmigung beantragt wird, weil (wie im Zuge der obigen Beschreibung des biotechnischen Verfahrens zur Herstellung von Aceton und Butanol dargelegt) zahlreiche Details einer Produktionsanlage im großtechnischen Maßstab – und damit auch potentielle Umweltwirkungen – standort- und substratspezifisch sowie von der gewählten Anlagentechnik abhängig sind. Im Zuge der Planung für eine an einem bestimmten Standort zu errichtende Anlage werden die meisten dieser Aspekte festgelegt.

Da es in Europa bislang keine Anlagen zur biotechnischen Herstellung von Aceton und Butanol gibt, entfällt hier die Möglichkeit der Betrachtung konkreter Anlagen.

(47) Die nachfolgende Betrachtung zielt darauf, mögliche Schwachstellen in den bestehenden Regelungen sowie eventuellen Deregulierungsbedarf möglichst bereits im Vorfeld der großtechnischen Umsetzung des biotechnischen Verfahrens zu identifizieren. Dabei wird von den nach heutigem Stand zu erwartenden Risiken und Gefahren des biotechnischen Verfahrens ausgegangen.

Zunächst werden die Risiken und Gefahrenpotentiale des biotechnischen Verfahrens nochmals aufgelistet und untersucht, welche Regelungen diesbezüglich existieren. Es werden eventuelle Lücken in den bestehenden Regelungen bzw. aus Sicht der Autoren ggf. unverhältnismäßige Regelungen identifiziert.

Dabei ist im Rahmen dieser Untersuchung keine erschöpfende Behandlung möglich, da dies – wie erwähnt – die Kenntnis von im derzeitigen Stadium nicht vollständig präzisierten Details bzgl. Anlagenstandort, -auslegung und -betriebsweise erfordern würde.³⁴ Es kann daher in vielen Fragen nur eingeschränkt von der bestehenden Pilotanlage für Aceton und Butanol auf eine großtechnische Produktionsanlage geschlossen werden.

Eine detaillierte Abschätzung der rechtlichen Aspekte der großtechnischen Produktion von Aceton und Butanol anhand fiktiv angenommener Verfahrens-Details wäre ähnlich aufwendig wie eine Umweltverträglichkeitsprüfung und würde damit den Umfang dieser Untersuchung bei weitem übersteigen.

(48) Errichtung und Betrieb einer biotechnischen Anlage zur Herstellung von Aceton und Butanol bedürfen gemäß Anhang der Verordnung über das Genehmigungsverfahren (**4. BImSchV**)³⁵ keiner immissionsschutzrechtlichen Genehmigung (vgl. Nr. 4.1 des Anhangs zur 4. BImSchV). Ferner sind solche Anlagen nicht im Anhang zur Anlage des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (**UVPG**) aufgeführt. Daher ist keine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich. Auch die EG-Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (**IVU-Richtlinie**) ist nicht einschlägig, da gemäß Anhang 1 der IVU-Richtlinie diese im Fall biotechnischer Verfahren nur für Anlagen zur Herstellung von Grundarzneimitteln Anwendung findet (vgl. Nr. 4 des Anhangs 1 der IVU-Richtlinie).³⁶

³⁴ Dies bedeutet auch, daß länderspezifische Regelungen, z.B. Landeswassergesetze, nicht in die nachfolgenden Betrachtungen einfließen können.

³⁵ Alle genannten Gesetze und Verordnungen sind im Literaturverzeichnis aufgeführt.

³⁶ Die IVU-Richtlinie ist trotz bereits abgelaufener Umsetzungsfrist (30.10.1999) noch nicht in deutsches Recht umgesetzt.

Eine Pflicht zur Umweltverträglichkeitsprüfung kann sich (nach Umsetzung in deutsches Recht) aus der geänderten EG-Richtlinie über die Umweltverträglichkeitsprüfung (EG-Richtlinie UVP) ergeben.³⁷ Diese nennt in Anhang II unter Nr. 6 a die "Erzeugung von Chemikalien." Solche Projekte sind anhand einer Einzelfallprüfung bzw. abhängig von (durch die Mitgliedstaaten festzulegenden) Schwellenwerten bzw. Kriterien auf UVP-Pflicht zu prüfen.

(49) Der Anlagenbetreiber muß nach geltendem Recht in jedem Fall den in §§ 22ff des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (**BImSchG**) formulierten Pflichten für nicht-genehmigungsbedürftige Anlagen bzgl.

- Verhinderung schädlicher Umwelteinwirkungen, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind
- Beschränkung der nach dem Stand der Technik unvermeidbaren schädlichen Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß
- Ordnungsgemäße Beseitigung der beim Betrieb entstehenden Abfälle

nachkommen. Die Kontrolle erfolgt im Rahmen der Baugenehmigung aufgrund der Generalklausel, daß dem Vorhaben keine öffentlich-rechtlichen Vorschriften entgegenstehen dürfen. Die Vorabkontrolle, auch durch die §§ 52, 24 25 BImSchG erfolgt für neu zu errichtende Anlagen und für wesentliche Änderungen bestehender Anlagen.

Im vorliegenden Fall der biotechnischen Aceton/Butanol-Herstellung³⁸ sind folgende potentielle Umweltwirkungen diesbezüglich zu prüfen:

a) Bestimmungsgemäßer Betrieb

- ☐ Emissionen von Lösungsmitteln (Aceton, Butanol und Ethanol) und Essigsäure aus der Anlage in die Luft
- ☐ Aceton, Butanol, Ethanol und organische Säuren im Abwasser der Anlage
- ☐ Wasserverbrauch (der ggf. aus betriebseigenen Brunnen gedeckt wird)
- ☐ Emissionen von Lösungsmitteln im Zuge der Schlempeverwertung
- ☐ Schutz der Beschäftigten gegen mögliche Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe.

³⁷

Auch diese Richtlinie ist noch nicht in deutsches Recht umgesetzt, obwohl die Umsetzungsfrist bereits am 4.3.1999 abgelaufen ist. Es ist eine Umsetzung durch eine Artikelgesetzgebung zur Änderung der betroffenen umweltrechtlichen Bestimmungen vorgesehen. Die UVP-Pflicht soll im Einzelfall durch ein Screening-Verfahren unter Berücksichtigung der Auswahlkriterien des Anhangs III der EG-Richtlinie UVP festgestellt werden.

³⁸

Das an der TU Wien weiterentwickelte und im Pilotmaßstab realisierte biotechnische Verfahren wurde oben detailliert beschrieben und ist im Überblick in Abbildung 3 dargestellt.

Bei der biotechnischen Herstellung von Aceton und Butanol fallen bei Verwertung der Schlempe keine produktionsspezifischen Abfälle zur Beseitigung im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) an.

b) Nicht-bestimmungsgemäßer Betrieb

- ☐ Schutz der Beschäftigten und der Anlagenumgebung vor möglichen Risiken durch ungewollte Freisetzung lebender Mikroorganismen
- ☐ Brandgefahr durch Lösungsmittel (Aceton ist leichtentzündlich, Butanol ist entzündlich)³⁹
- ☐ Explosionsgefahr durch Wasserstoff (hochentzündlich)
- ☐ Wassergefährdung⁴⁰ durch Butanol (WGK 1, d.h. schwach wassergefährdend).

(50) Für die flüchtigen Lösungsmittel Aceton, Butanol und Ethanol, die möglicherweise im Zuge des bestimmungsgemäßen Anlagenbetriebs z.B. aus Ventilen, Tanks oder Flanschen, in die Luft entweichen könnten, sowie für das Nebenprodukt Essigsäure gibt es keine verbindlichen Grenzwerte zum Schutz der Umgebung. Aufgrund der Ähnlichkeit der biotechnischen Herstellung von Aceton und Butanol mit der gängigen fermentativen Ethanolgewinnung kann geschlossen werden, daß es zu keiner relevanten Belastung der Luft in der Umgebung der Anlage kommen dürfte, da die Anlage in jedem Fall entsprechend dem Stand der Technik errichtet und betrieben werden muß. Es gibt also aus heutiger Sicht keine Anhaltspunkte für schädliche Umwelteinwirkungen aufgrund möglicher Emissionen von Lösungsmitteln aus der Anlage.

Da die Anlage im ländliche Raum und sicherlich nicht in unmittelbarer Nachbarschaft zu Wohngebieten betrieben würde, sind auch keine Beeinträchtigungen von Anwohnern durch Schall (z.B. von Lüftern) oder olfaktorischer Art zu erwarten.

(51) Die innerhalb der Anlage beschäftigten Personen sind im Rahmen des Arbeitsschutzes vor unzumutbarer Exposition mit Lösungsmitteln zu schützen. Die MAK-Werte betragen 1.200 mg/m³ für Aceton, 310 mg/m³ für Butanol, 960 mg/m³ für Ethanol und 25 mg/m³ für Essigsäure (DFG 1998). Dies definiert die höchstzulässigen Konzentrationen an den Arbeits-

³⁹

Auch Ethanol ist leichtentzündlich. Es wird jedoch aufgrund der geringen Mengen davon ausgegangen, daß Ethanol ein nicht verwertetes Nebenprodukt ist und nur stark verdünnt auftritt. Somit geht von Ethanol keine Brandgefahr aus.

⁴⁰

Die als Nebenprodukte verdünnt anfallende Buttersäure sowie Ethanol sind im allgemeinen nicht wassergefährdend (WGK 0). Dies gilt aufgrund der geringen Konzentration (deutlich unterhalb der 25%, ab der eine Einstufung in die WGK 1 erfolgt) auch für die Essigsäure. Pro 1.000 t Aceton und Butanol fallen rund 230 t organische Säuren an. Ob die Säuren neutralisiert werden müssen, hängt von den konkreten Gegebenheiten (Produktionsmenge, Abwasserreinigung) ab

plätzen. Bei deren Einhaltung wird nach gegenwärtigem Stand der Kenntnis die Gesundheit der Beschäftigten nicht beeinträchtigt und es erfolgt keine unangemessene Beeinträchtigung. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Einhaltung der MAK-Werte an den Arbeitsplätzen durch technische Maßnahmen gewährleistet wird.⁴¹ Dies zeigt auch die Erfahrung aus chemisch-technischen Anlagen, in denen mit Aceton, Butanol und verdünnter Essigsäure umgegangen wird, sowie aus Ethanolbrennereien.

(52) Menge und Zusammensetzung des bei der biotechnischen Herstellung von Aceton und Butanol anfallenden Abwassers hängen stark vom eingesetzten Substrat, der gewählten Prozeßführung und der Schlempeverwertung⁴² ab. Es ist damit zu rechnen, daß Abwasser keinesfalls direkt in ein Gewässer eingeleitet wird, sondern in die öffentliche Kanalisation oder eine betriebseigene Kläranlage gelangt. Dabei sind die einschlägigen wasserrechtlichen Bestimmungen einzuhalten.⁴³ Damit kann hinsichtlich der Abwasserbeseitigung von einem angemessenen Schutz der Umwelt ausgegangen werden.

(53) Der Frischwasserbedarf (Prozeß- und Kühlwasser) einer biotechnischen Anlage zur Herstellung von Aceton und Butanol kann – wie oben dargelegt (Abschnitt "Vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung") – zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht näher angegeben werden, da er von noch nicht spezifizierten Verfahrensparametern abhängt. Benötigtes Frischwasser kann der öffentlichen Wasserversorgung oder betriebseigenen Brunnen entnommen werden. Im letztgenannten Fall sind entsprechende Entnahmegenehmigungen (für die teilweise landesrechtliche Bestimmungen maßgeblich sind) erforderlich.

(54) Die Schlempe enthält Lösungsmittel. Bei der bestehenden Pilotanlage beträgt der Verlust auf diesem Weg 1 bis 2% der gebildeten Lösungsmittel. Die Höhe der Verluste hängt von dem konkret angewendeten Verfahren der Produktabtrennung ab. Daher kann von der bestehenden Pilotanlage nicht unmittelbar auf den großtechnischen Maßstab geschlossen werden.⁴⁴

In jedem Fall ist der Frage des Lösungsmittelaustrags durch die Schlempe beim Scale up Beachtung zu widmen. Voraussichtlich kann durch verfahrenstechnische Maßnahmen bei der Produktabtrennung, die im Zuge des Scale up zu entwerfen sind, eine Reduktion des Lösungsmittelgehalts der Schlempe erreicht werden (dies wäre schon aus betriebswirtschaft-

⁴¹ Die Kontrolle erfolgt im Rahmen des Arbeitsschutzes.

⁴² Wird z.B. nur der Feststoffanteil der Schlempe landwirtschaftlich verwertet (der Feststoffanteil also – z.B. durch Filterpressen – abgetrennt), so steigt die Abwassermenge entsprechend.

⁴³ Insbesondere § 7ff Wasserhaushaltsgesetz (WHG) in Verbindung mit der Abwasserverordnung (AbVV) sowie ggf. mit landesrechtlichen Bestimmungen (Indirekteinleiterverordnungen).

⁴⁴ Bei der Pilotanlage galt das Augenmerk nicht der Reduzierung des Austrags von Lösungsmitteln mit der Schlempe, sondern anderen verfahrenstechnischen Optimierungen.

lichen Gründen anzustreben). Im Zuge der Verwertung der Schlempe als Dünger oder zur Viehfütterung würde voraussichtlich eine Desinfektion (z.B. durch Autoklavieren) erfolgen, um die Verbreitung von die Produktionsstämme gefährdenden Bakteriophagen zu verhindern. Im Zuge dessen dürften die Lösungsmittel weitgehend entfernt und entweder zurückgewonnen oder verbrannt werden. Insgesamt kann im derzeitigen Stadium nicht abgeschätzt werden, welche Mengen Lösungsmittel schließlich noch in der Schlempe enthalten sein werden.

Ausgehend von der Tatsache, daß die landwirtschaftliche Verwertung von Rückständen aus der (in vieler Hinsicht der Aceton/Butanol-Fermentation ähnlichen) biotechnischen Ethanolherstellung gängige Praxis ist, gehen die Autoren dieses Berichts davon aus, daß auch die Verwertung der Schlempe aus der biotechnischen Herstellung von Aceton und Butanol möglich sein wird, sofern die Aufnahmekapazität der landwirtschaftlichen Betriebe in der Umgebung der Anlage ausreicht.

(55) Die Schlempe ist – sofern die Voraussetzungen des § 21 zutreffen – ein Abfall zur Verwertung im Sinne des KrW-/AbfG (siehe Anhang I zum KrW-/AbfG). Die Verwertung als Dünger ist ein Verwertungsverfahren im Sinne des Anhangs IIb zum KrW-/AbfG ("Aufbringung auf den Boden zum Nutzen der Landwirtschaft"). Dies gilt auch für die Verwertung als Viehfutter ("Verwertung/Rückgewinnung organischer Stoffe, die nicht als Lösungsmittel verwendet werden").

(56) Eine Verwertung der Schlempe als "Sekundärrohstoffdünger" unterliegt dem Düngemittelgesetz (DMG).⁴⁵ Es kann davon ausgegangen werden, daß die Düngung gemäß den Anforderungen des DMG nach guter fachlicher Praxis erfolgt (§ 1a DMG, sowie Düngeverordnung, **DüngeMV**). Eine Zulassung des Düngers nach § 2 DMG ist nicht erforderlich, da von einer kostenlosen Abgabe an die Landwirte auszugehen ist und damit keine gewerbsmäßige Inverkehrbringung vorliegt.

Die Bioabfallverordnung (**BioAbfV**) regelt die Verwertung der Schlempe als Dünger. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand ist die Schlempe seuchen- und phytohygienisch unbedenklich. Andernfalls wäre gemäß § 3 BioAbfV eine Behandlung erforderlich, welche die Unbedenklichkeit gewährleistet. Gemäß § 4 Abs. 1 darf die Schlempe nach einer eventuellen Behandlung keine überhöhten Schadstoffgehalte aufweisen. Damit ist sichergestellt, daß keine gefährlichen Lösungsmittelkonzentrationen in der Schlempe enthalten sein dürfen. Zu füllen bleibt allerdings der Begriff "überhöht", da nach Kenntnis der Autoren dieses Berichts keine Grenzwerte für den Lösungsmittelgehalt bei Verwertung als Dünger bestehen. Da hier von einer weitgehenden Reduktion des Lösungsmittelgehalts der Schlempe im Zuge der Behandlung ausgegangen wird, sehen die Autoren dieses Berichts die Verwertung der

⁴⁵

Siehe auch § 8 KrW-/AbfG: Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft im Bereich der landwirtschaftlichen Düngung.

Schlempe als unbedenklich an. Das Fehlen von Grenzwerten für Lösungsmittel steht aus dieser Sicht einer umweltgerechten Verwertung nicht entgegen. Eine Festlegung von Grenzwerten für Aceton und Butanol im Dünger erscheint daher nicht erforderlich.

(57) Für eine Verwertung der Schlempe als Viehfutter ist keine Zulassung nach § 4 Abs. 4 des Futtermittelgesetzes (**FMG**) erforderlich, da – ebenso wie im Fall der Verwertung als Dünger – von einer kostenlosen Abgabe an die Landwirte auszugehen ist und damit keine gewerbsmäßige Inverkehrbringung vorliegt. Die Anforderungen an die Zusammensetzung von Viehfutter sind in der **Futtermittelverordnung** festgelegt. Es gibt keine Grenzwerte für den Lösungsmittelgehalt im Viehfutter. Aufgrund der angenommenen Reduktion des Lösungsmittelgehalts im Zuge der hier unterstellten Behandlung der Schlempe ist die Verwertung als Viehfutter nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts ökologisch betrachtet unbedenklich.

Es sei jedoch an dieser Stelle nochmals betont, daß die Ausführungen zur Verwertung der Schlempe zur Düngung oder als Viehfutter nur unter der Maßgabe der weitgehenden Reduktion des Lösungsmittelgehalts gelten. Der Frage des Lösungsmittelverlusts über die Schlempe ist im Zuge des Scale up auf den großtechnischen Maßstab besondere Aufmerksamkeit zu widmen (siehe oben).

(58) Ein im Hinblick auf die hier zu untersuchende Fragestellung wesentlicher Unterschied zwischen der biotechnischen und der chemisch-technischen Herstellung von Aceton und Butanol besteht in der Verwendung von lebenden Mikroorganismen bei der biotechnischen Variante. Im Vergleich zum Umgang mit Gefahrstoffen kommt beim Umgang mit biologischen Arbeitsstoffen potentiell eine neue Qualität der Gefährdung zum Tragen, nämlich die denkbare Infektionsgefahr für Menschen, Tiere und Pflanzen.

(59) Die in der Anlage beschäftigten Personen können im Zuge des bestimmungsgemäßen Betriebs (z.B. bei Wartungs- und Reinigungsarbeiten) sowie im nicht-bestimmungsgemäßen Betrieb (mit ungewollter Freisetzung) in Kontakt mit lebenden Mikroorganismen kommen.

Die bei den bisherigen Forschungsarbeiten eingesetzten Clostridien sind nicht gentechnisch verändert und gelten nach heutigem Wissensstand als ungefährlich für Mensch und Umwelt. Es ist aus heutiger Sicht nicht damit zu rechnen, daß für eine großtechnische Produktion von Aceton und Butanol gentechnisch veränderte Organismen eingesetzt werden würden, da keine Hinweise vorliegen, daß durch gentechnische Veränderung entscheidende Verbesserungen (insbesondere hinsichtlich der Butanoltoleranz, der Produkt- und Nebenproduktverhältnisse sowie der Produktionsrate) zu erwarten sind.

Denkbar sind Veränderungen der Produktionsstämme gegenüber den bislang benutzten Stämmen durch konventionelle Züchtung. Es kann davon ausgegangen werden, daß die im Zuge einer großtechnischen Umsetzung des biotechnischen Verfahrens verwendeten

Stämme ebenfalls für Mensch und Umwelt ungefährlich sind. Die bislang verwendeten Mikroorganismen haben keine bekannte sensibilisierende oder toxische Wirkung auf Menschen. Der Betreiber einer biotechnischen Anlage zur Herstellung von Aceton und Butanol hat gemäß § 6 der Biostoffverordnung (**BioStoffV**) eine Gefährdungsbeurteilung für die verwendeten Mikroorganismen durchzuführen. Nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts sind die Produktionsstämme der Risikogruppe 1 ("Biologische Arbeitsstoffe, bei denen es unwahrscheinlich ist, daß sie beim Menschen eine Krankheit hervorrufen") gemäß BioStoffV zuzuordnen. Eine Anzeigepflicht besteht bei Arbeiten mit biologischen Arbeitsstoffen dieser Risikogruppe nicht. Mit Einhaltung der in der BioStoffV bzw. der in der Unfallverhütungsvorschrift der Berufsgenossenschaft (BG Chemie 1997) vorgegebenen Schutzmaßnahmen ist der Schutz der Beschäftigten sachgerecht gewährleistet.⁴⁶

(60) Die Störfall-Verordnung (**12. BImSchV**) ist nicht einschlägig, da die Anlage keiner immissionsschutzrechtlichen Genehmigung bedarf.⁴⁷

Der möglichen Brand- und Explosionsgefahr durch den Umgang mit Aceton (leichtentzündlich), Butanol (entzündlich) und Wasserstoff (hochentzündlich) ist durch die aufgrund der genannten Eigenschaften der Stoffe erforderlichen Brand- und Explosionsschutzmaßnahmen zu genügen.⁴⁸ Entsprechendes gilt für den Umgang mit dem schwach wassergefährdendem Butanol (WGK 1). Die genannten Aspekte sind nicht spezifisch für biotechnische Anlagen. Entsprechend sind auch für Biotechnik keine spezifischen Regelungen erforderlich.

(61) Im nicht-bestimmungsgemäßen Betrieb kann es zu einer Freisetzung von Mikroorganismen kommen. Diesbezüglich ist generell zu beachten, daß Organismen teilungsfähig sind (sich daher unter entsprechenden Lebensbedingungen sehr weit ausbreiten können) und daß freigesetzte Mikroorganismen nicht rückholbar sind und ihre Ausbreitung nicht zuverlässig eingedämmt werden kann.

Im Falle der (ungewollten) Freisetzung von Mikroorganismen kann es bei Vorhandensein eines entsprechenden Selektionsdrucks vorkommen, daß die natürliche Mikroorganismenpopulation in der Umgebung der Anlage beeinflusst wird. Da Mikroorganismen – im Unterschied zu Pflanzen und Tieren – kein Schutzgut im Sinne des Bundesnaturschutzgesetzes (**BNatSchG**) darstellen, existiert keine Regelung bezüglich potentieller Einflüsse auf die natürliche Mikroorganismenpopulation. Im vorliegenden Fall ist dies jedoch irrelevant, da

⁴⁶ Diese Einschätzung wurde von den Teilnehmern des im Rahmen dieses Projekts am 8.7.1999 beim Umweltbundesamt in Berlin durchgeführten Workshops bestätigt.

⁴⁷ Dies gilt auch für die im Zuge der Umsetzung der Seveso-II-Richtlinie (Richtlinie 96/82/EG) revidierte Fassung. Die Mengenschwellen gemäß Teil 2 des Anhangs I der Seveso-II-Richtlinie werden in einer Anlage zur biotechnischen Herstellung von Aceton und Butanol nicht erreicht.

⁴⁸ Beispielsweise ist ggf. durch technische Maßnahmen (z.B. Einbau von Lüftern) sicherzustellen, daß die Konzentration von Wasserstoff in den Fermentern sicher die untere Zündgrenze von Wasserstoff/Luft-Gemischen (diese beträgt 4 Vol.-% Wasserstoff) unterschreitet.

bislang noch keinerlei negative Auswirkungen von Clostridien auf andere Mikroorganismenpopulationen in deren natürlicher Umgebung festgestellt wurden.

(62) Die Produkte Aceton und Butanol sind gemäß § 13 des Chemikaliengesetzes (**ChemG**) eingestuft. Sie sind entsprechend dieser Einstufung zu kennzeichnen. Die Einstufung erfolgt ausschließlich anhand der Eigenschaften der Stoffe. Diese Eigenschaften unterscheiden sich bei biotechnischer Herstellung nicht gegenüber der chemisch-technischen Herstellung. Daher ist keine neue Einstufung der Produkte erforderlich.

(63) Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß im Fall der biotechnischen Herstellung von Aceton und Butanol nur im Zusammenhang mit dem Umgang mit Mikroorganismen Regelungen zur Anwendung kommen, die spezifisch für Biotechnik sind. Diese Regelungen erscheinen den Autoren dieses Berichts dem Schutzziel angemessen und verhältnismäßig.

Hinsichtlich der übrigen zur Anwendung kommenden, nicht für Biotechnik spezifischen Regelungen gehen wir davon aus, daß diese Regelungen einen angemessenen Schutz der Umwelt im Sinne des § 22 BImSchG gewährleisten und keine unverhältnismäßigen Anforderungen an den Betreiber stellen.

Perspektiven

(64) Das verbesserte biotechnische Verfahren zur Herstellung von Aceton und Butanol hat einen Entwicklungsstand erreicht, der eine baldige **Übertragung auf den großtechnischen Maßstab** ermöglicht. Im Zuge des Scale up sind zahlreiche Fragen des Substrateinsatzes und der Verfahrenstechnik zu lösen. Dies betrifft insbesondere: Wahl des Substrats, Rohstoffbeschaffung, Wahl der unter Kosten- und Energiegesichtspunkten für den großtechnischen Maßstab optimalen Methode zur Produktabtrennung, Verringerung der Abwassermenge, Schutz der Mikroorganismen vor Infektionen, Reduktion diffuser Emissionen aus Reststoffen.

(65) Für die erforderliche Meß-, Steuer- und Regelungstechnik sowie für die Produktisolation können gängige Standard-Komponenten eingesetzt werden. Bei einer großtechnischen Anlage sollte die Möglichkeit einer pH-Regulierung vorgesehen werden, um bei Bedarf über entsprechende Eingriffsmöglichkeiten (die im Pilotmaßstab nicht erforderlich sind) zu verfügen.

Eine großtechnische Anlage kann Maßnahmen zum Explosionsschutz (Wasserstoff!) erfordern. Ferner könnte eine Kühlung erforderlich sein. Beides hängt wesentlich von der Anlagengröße ab.

Sofern eine ehemalige Ethanol-Anlage zur Verfügung steht, sind der Standort und viele verfahrenstechnische Aspekte vorgegeben. In diesem Fall stellt sich die Frage der optimalen Adaption beispielsweise der Produktabtrennung an die vorhandenen Anlagen.

Eine weitgehende Automatisierung einer großtechnischen Anlage erscheint technisch möglich.

(66) Die Wahl der Substrate und die Festlegung des **Standorts** einer großtechnischen Anlage gehen teilweise Hand in Hand. Bei der Standortwahl ist ferner auf eine regionale Möglichkeit zur Verwertung der Reststoffe (als Dünger oder Viehfutter) zu achten.

Als Substrate sind organische Reststoffe aus Kosten- und ökologischen Gründen besonders vorteilhaft. Stärkehaltige Reststoffe werden derzeit vielfach zur Gewinnung von Ethanol eingesetzt.

(67) Der **Zeithorizont** für eine großtechnische Umsetzung des Verfahrens betrüge bei Nutzung vorhandener Infrastruktur einer ehemaligen Ethanolbrennerei etwa 1 bis 2 Jahre.

(68) Bei Verwendung cellulosehaltiger Substrate wäre zunächst ein Schritt zur Säure- oder enzymatischen Hydrolyse vorzusehen. Die Clostridien besitzen inaktive Gene zum Celluloseabbau. Genauer ist allerdings derzeit noch unklar. Es besteht jedoch gewisse Hoffnung, mittel- bis langfristig durch Aktivierung dieser Gene Cellulose unmittelbar als Substrat einsetzen zu können. Dies würde die Substratverfügbarkeit – beispielsweise durch die Nutzung von Stroh – erheblich verbessern.

Ein problematischer Aspekt der Aceton/Butanolfermentation mit Clostridien ist die Toxizität von Butanol, das die Zellwände angreift und so zu Produktinhibition führt. Dies limitiert die erreichbare Endkonzentration an Produkten. Derzeit gibt es keine Hinweise, daß die Butanol-toleranz durch Verwendung gentechnischer Methoden gesteigert werden könnte.

(69) Der Fermentationsprozeß ist vergleichsweise komplex und erfordert die Kontrolle und Einhaltung zahlreicher Parameter. Aufgrund der zahlreichen Parallelen zur Ethanolherstellung kann die zum erfolgreichen Einsatz der Technologie erforderliche Wissensstruktur in vielen Schwellen- und Entwicklungsländern als grundsätzlich vorhanden angesehen werden. Hier sind vielfach besonders günstige Gegebenheiten hinsichtlich der Verfügbarkeit von geeigneten Reststoffen aus der Landwirtschaft oder der Industrie (Zucker- und Stärkeverarbeitung) vorzufinden. Dies eröffnet die Möglichkeit der Anwendung des Verfahrens durch **Technologietransfer** im Zuge der Entwicklungshilfe. In der Anfangsphase wäre sicherlich eine technische Unterstützung und Begleitung erforderlich, auf die mittelfristig dann verzichtet werden könnte.

Schlußfolgerungen in Bezug auf Aceton/Butanol

(70) Zahlreiche Details einer großtechnischen Produktion hängen von der konkreten Auslegung der Anlage, von Standort und von den eingesetzten Substraten ab. Daher läßt sich das Umweltentlastungspotential beim derzeitigen Stand der Verfahrensentwicklung nur überschlägig abschätzen. Durch die biotechnische Herstellung von Aceton und Butanol nach dem modernen Verfahren erfolgt in jedem Fall eine **Ressourcenschonung** durch Ersatz fossiler Rohstoffe, die als Feedstock für die chemisch-technischen Verfahren dienen. Die zu erwartenden Emissionen von Lösungsmitteln aus der Schlempe wären im Zuge einer großtechnischen Umsetzung zu reduzieren.

(71) Die biotechnische Herstellung von Aceton und 1-Butanol aus eigens dafür erzeugten landwirtschaftlichen Produkten ist in jedem Fall **teurer** als die chemisch-technische Herstellung. Ein Vorteil des Verfahrens besteht im breiten Spektrum möglicher Substrate. Dies sichert die ganzjährige Verfügbarkeit von Substraten und ermöglicht den Einsatz des jeweils preiswertesten Substrats. Durch Verwendung von **Reststoffen** (z.B. stärkehaltige Abwässer aus der Industrie, unverkäufliche Kartoffeln) als Substrat ließen sich die Betriebskosten senken.

(72) Durch die Nutzung bestehender **Produktions-Infrastruktur** (Übernahme ehemaliger Ethanol-Brennereien) könnte – je nach konkret nutzbaren Anlagenteilen – eine erhebliche Senkung der Investitionskosten erreicht und damit zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit beigetragen werden.

(73) Die benutzten Mikroorganismen besitzen natürlicherweise inaktive Gene, deren Expression den direkten Abbau von Cellulose (ohne vorherige Spaltung, beispielsweise durch enzymatische Hydrolyse) ermöglicht. Demnach besteht zumindest grundsätzlich die Möglichkeit, zukünftig durch gentechnische Methoden (Aktivierung der Expression dieser Gene) die **direkte Verwendbarkeit von Cellulose** als Substrat zu erreichen. Dies eröffnete aufgrund der großen Mengen Cellulose, die als landwirtschaftliche Reststoffe anfallen (z.B. Stroh) weitere günstige Substratquellen.

Versuche zur gentechnischen Optimierung von Ausbeute bzw. Produktkonzentration durch Erhöhung der Butanoltoleranz sind bislang wenig erfolgreich. Die diesbezüglichen Aussichten werden derzeit als gering eingeschätzt.

(74) Das **Marktaufnahmepotential** für die Produkte kann – solange nicht die chemisch-technischen Produktionskapazitäten nennenswert ausgebaut werden – wegen des zunächst geringen Anteils biotechnisch produzierten Acetons bzw. Butanols an der gesamten Produktionsmenge als gegeben angesehen werden. Allerdings ist auf absehbare Zeit weiterhin mit einem niedrigen Preisniveau von Aceton und Butanol zu rechnen.

(75) In Europa liegt das **Potential** für das biotechnische Verfahren zur Herstellung von Aceton und Butanol in der Verwertung geeigneter organischer Reststoffe in kleineren bis mittleren Anlagen (ca. 10.000 t Produkt pro Jahr, auch substrat- und standortabhängig). Die Aktivierung dieses Potentials erfordert gezielte Förderung.

(76) Es ist nicht erkennbar, daß rechtliche Regelungen die Anwendung des biotechnischen Verfahrens zur Herstellung von Aceton und Butanol in Deutschland behindern würden. Die bestehenden Regelungen gewährleisten einen angemessenen Schutz der Umwelt.

(77) Das Verfahren könnte in **Entwicklungs- und Schwellenländern**, die über geeignete heimische Substratquellen verfügen, zur Deckung des Eigenbedarfs an Aceton und Butanol eingesetzt werden und so zur Reduktion der Importabhängigkeit bzw. zur Schonung der Devisenreserven beitragen. Angesichts des Preisniveaus von Aceton und Butanol auf dem Weltmarkt ist die Produktion für Exportzwecke eher unattraktiv.

Die erforderliche Wissensstruktur für Fermentationsverfahren kann in vielen Schwellen- und Entwicklungsländern als grundsätzlich gegeben angesehen werden.

(78) Die laufenden Ansätze zur Optimierung des Verfahrens zur fermentativen Gewinnung von Aceton und Butanol sollten **weiterverfolgt** werden. Dies setzt **öffentliche Förderung** voraus, da ein unmittelbares Interesse der Industrie aus wirtschaftlichen Gründen zunächst nicht zu erwarten ist.

Bei großtechnischer Umsetzung in Form eines **Demonstrationsvorhabens** sollte Reststoffe als Substrate genutzt werden. Das Verfahren eignet sich auch angesichts seines fortgeschrittenen Entwicklungsstandes und des demzufolge vergleichsweise kurzen Zeithorizonts zur Realisierung (1 bis 2 Jahre) als Demonstrationsvorhaben. Dies gilt insbesondere bei Nutzung bestehender Infrastruktur (z.B. einer Ethanolbrennerei). Im Vordergrund eines Demonstrationsvorhabens stünde die Lösung der angesprochenen Scale up-Fragen (einschließlich der Reduktion von Lösungsmittlemissionen über die Reststoffe) und damit der Nachweis der großtechnischen Umsetzbarkeit.

4.2 Fallbeispiel 2: 1,3-Propandiol

Einführung

(1) 1,3-Propandiol wird als Lösungsmittel bei der Lackherstellung, als Additiv für Schmierstoffe und bei der Herstellung von Polyurethanen eingesetzt. 1993 wurden weltweit 100 kt 1,3-Propandiol hergestellt. Gegenwärtig ist ein Aufbau von Produktionskapazitäten zu beobachten. Im Jahr 1998 nahmen DuPont und Degussa in Wesseling eine Anlage nach dem Acrolein-Verfahren von Degussa mit einer Kapazität von 9 kt/a in Betrieb. In Geismar (USA) plant Shell die Errichtung einer Anlage nach dem Ethylenoxid-Verfahren mit einer Kapazität von 72 kt/a. Der Grund für diese Aktivitäten liegt offenbar in dem erwarteten Marktpotential für den aus 1,3-Propandiol herstellbaren Polyester Polytrimethylenterephthalat (PTT, Handelsname CorterraTM), der aufgrund seiner Materialeigenschaften⁴⁹ zukünftig eine preiswerte Alternative insbesondere zu Nylon-6,6 werden könnte. Dies hängt stark von den Kosten für die Herstellung von 1,3-Propandiol ab, die bei den chemischen Verfahren etwa bei 1,40 bis 1,60 US\$ pro kg liegen (N.N. 1998c). Die neuen chemisch-technischen Kapazitäten sind möglicherweise als Übergangslösung bis zur großtechnischen Verfügbarkeit der derzeit in Entwicklung befindlichen biotechnischen Verfahren zu sehen.

(2) Bei der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft in Braunschweig (FAL) wurde ein Verfahren zur fermentativen Herstellung von 1,3-Propandiol aus Glycerin (als Reststoff aus der fettverarbeitenden Industrie) unter Benutzung immobilisierter Bakterien entwickelt.⁵⁰ Bei der Gesellschaft für Biotechnologische Forschung mbH (GBF) wird – ebenso wie bei der FAL – an der Erschließung von Glucose bzw. Stärke als Substrat gearbeitet. In den USA entwickeln DuPont und Genencor International ein Verfahren zur Gewinnung von 1,3-Propandiol aus Glucose mittels transgener Organismen (siehe N.N. 1998c, US-Patent 5633362). Über den genauen Stand der Verfahrensentwicklung liegen keine näheren Informationen vor.

Es wird hier das Verfahren der FAL, das von Glycerin ausgeht, als biotechnisches Verfahren betrachtet. Es funktioniert im Labormaßstab und benutzt nicht gentechnisch veränderte Mikroorganismen. Gegenüber dem Verfahren der GBF ist es im Hinblick auf eine großtechnische Anwendung weiter fortgeschritten und wurde daher für eine nähere Betrachtung ausgewählt. Im Rahmen dieser Untersuchung ist es aus Gründen des Untersuchungsaufwands nicht möglich, beide Verfahren detailliert zu betrachten. Die Auswahl des Verfahrens der FAL bedeutet nicht, daß die Autoren dieses Berichts dieses Verfahren als vorteilhaft gegenüber dem Verfahren der GBF ansehen.

⁴⁹

PTT hat Elastizitäts- und Haltbarkeitseigenschaften ähnlich denen von Nylon, ist gut chemikalienbeständig und auf den gängigen Maschinen zu verarbeiten. PTT eignet sich beispielsweise für die Herstellung von Teppichfasern als Ersatz für Nylon und wird in den USA offenbar bereits für diesen Zweck eingesetzt.

⁵⁰

Die Arbeiten wurden von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. gefördert.

Chemisch-technische Herstellung von 1,3-Propandiol⁵¹

(3) Nachfolgend wird das Acrolein-Verfahren zur chemisch-technischen Herstellung von 1,3-Propandiol betrachtet.

Die chemisch-technische Herstellung von 1,3-Propandiol erfolgt in 3 Schritten (Abbildung 4):

1. Oxidation von Propen zu Acrolein
2. Hydrolyse des Acroleins zu Hydroxypropanal
3. Reduktion zu 1,3-Propandiol und (als Nebenprodukt) 1,2-Propandiol.

Die Oxidation von Propen findet in einem Röhrenreaktor mit Festbettkatalysator in der Gasphase mit Luft bei 300 bis 400°C und 15 bis 25 bar statt. Der Luft wird zur Verhinderung der Bildung brennbarer Gase Wasserdampf oder Inertgas im Verhältnis (Luft zu Dampf) von 1:8 bzw. 2:6 zugesetzt. Als Katalysator werden meist Metalloxidsysteme verwendet, deren Hauptbestandteil Oxide von Wismut und Molybdän sind.

Als Nebenprodukt entstehen Wasser, 5-10% Acrylsäure, außerdem Kohlenmonoxid und Kohlendioxid und kleine Mengen Acetaldehyd, Essigsäure, Formaldehyd sowie Polyacrolein. Die Reaktion ist exotherm (-341 kJ/mol). Die Reaktionswärme wird über eine zirkulierende Salzsäure abgeführt. Ca. 5% des Propens wird nicht umgesetzt und in den Prozeß zurückgeführt. Die Ausbeute an Acrolein beträgt ungefähr 80%.

Das Reaktionsgemisch wird zur Vermeidung weiterer Reaktionen des Acroleins abgeschreckt und in Wasser geleitet. Dabei kondensiert zuerst die Acrylsäure, dann das Acrolein. Zur Trennung von Propen, Stickstoff, Sauerstoff und den Kohlenstoffoxiden wird Acrolein in Wasser absorbiert und durch Destillation von Acetaldehyd und einem Teil des Wasser getrennt. Das Wasser wird z.T. als Absorbens wiederverwendet, der durch die Reaktion entstandene Überschuß wird zur Entsorgung der darin enthaltenen organischen Verbindungen verbrannt. Nach einer zweiten Destillation erhält man ein Acrolein-Wasser-Gemisch. Die Abluft des Absorbers, die noch nicht umgesetztes Propen, die Kohlenstoffoxide, Sauerstoff und Stickstoff enthält, wird zu einem Teil als Inertgas in den Reaktor zurückgeführt, zum anderen Teil verbrannt. Um eine unerwünschte Polymerisation des Acroleins zu vermeiden, sind die Aufbereitungsapparaturen mit Hydrochinon stabilisiert.

(4) Die Hydrolyse zu Hydroxypropanal findet unter schwach sauren Bedingungen in einer 20%igen Lösung von Acrolein in Wasser statt. Höhere Acroleinkonzentrationen führen zu unerwünschten Nebenprodukten durch Reaktion von Acrolein und 3-Hydroxypropanal.

⁵¹

Die nachfolgenden Ausführungen zum chemisch-technischen Verfahren basieren auf BUA 1995, Kirk-Othmer und Römpf.

3-Hydroxypropanal kann direkt in der wäßrigen Lösung umgesetzt werden. Gebräuchlicher ist es allerdings, das Aldehyd in ein organisches Lösungsmittel, in der Regel 2-Methylpropanol, zu extrahieren und darin bei 20 bis 40 bar und 110 bis 150°C mit Hilfe eines Nickel-Katalysators zu hydrieren. Das Produkt wird durch Destillation gewonnen. Die Gesamtausbeute des Verfahrens beträgt ca. 45% (bezogen auf Propen).

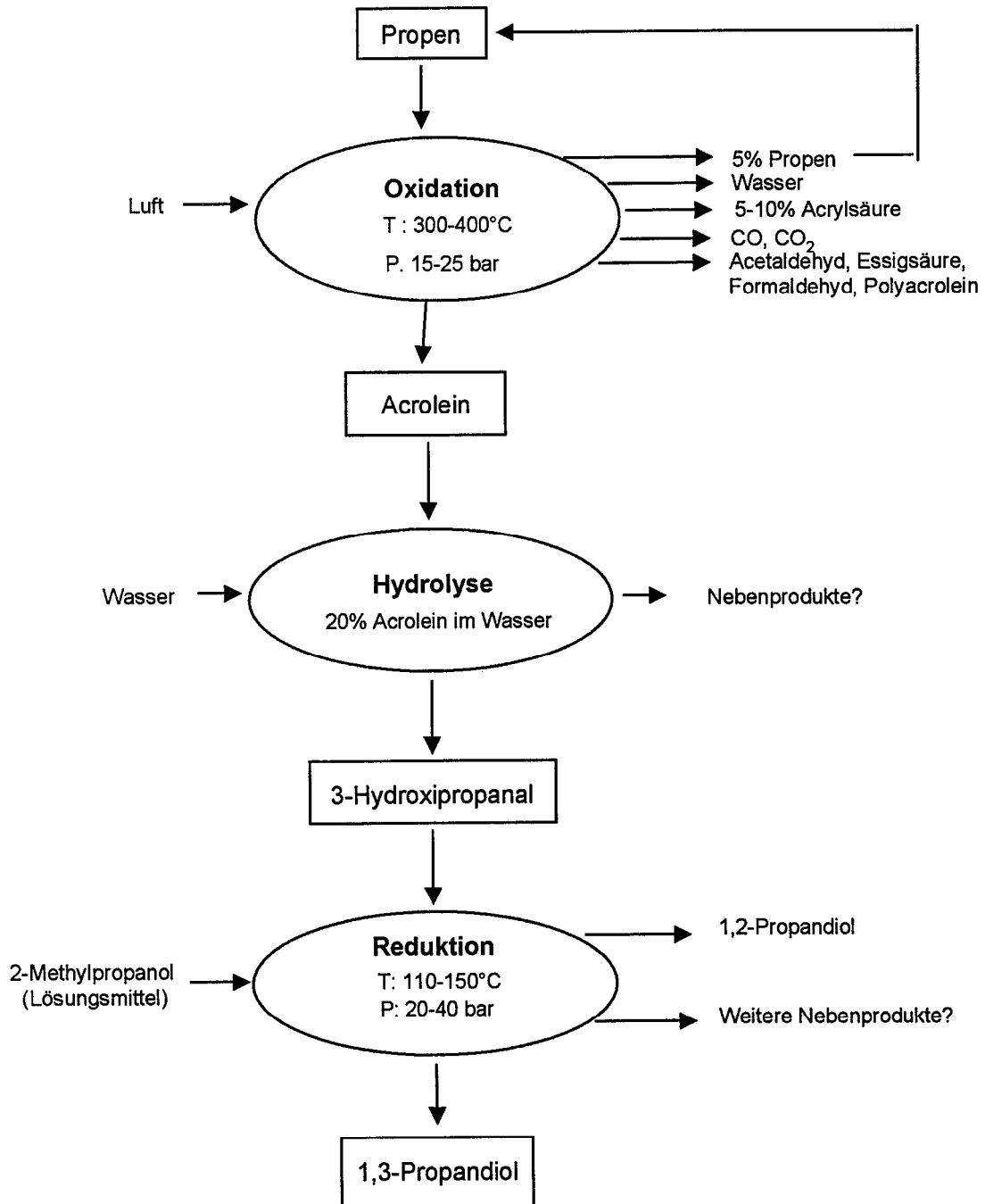


Abb. 4: Chemisch-technische Herstellung von 1,3-Propandiol (Acrolein-Verfahren)

Biotechnische Herstellung⁵²

(5) Die biotechnische Herstellung von 1,3-Propandiol wurde an dem Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig untersucht und weiterentwickelt. In dem Verfahren der FAL wird Glycerin mit *Clostridium butyricum* anaerob in einem kontinuierlichen Verfahren zu 1,3-Propandiol umgesetzt. Dies ist ein natürlicher Stoffwechselweg.⁵³

Das Verfahren der FAL benutzt in linsenförmigen Gelpartikeln aus Polyvinylalkohol immobilisierte Zellen. Dadurch kann die Fermentation unter unsterilen Bedingungen erfolgen. Ferner erhöht die Immobilisierung die Produktivität und ermöglicht die Abtrennung der Organismen aus der Fermentationsbrühe durch einfaches Sieben. Bei der Herstellung der Immobilisate werden nur wenige Bakterien im Gel eingeschlossen. Anschließend werden sie bei 30°C auf etwa die 1.000fache Menge angezüchtet.

(6) In der fettchemischen Industrie fällt bei der Herstellung von Seifen, Fettsäuren und Fettalkoholen verdünntes **Rohglycerin** an, das direkt als Substrat eingesetzt werden kann.⁵⁴ Für eine Vermarktung muß das Rohglycerin zunächst aufkonzentriert und gereinigt werden. Dies lohnt sich wirtschaftlich nicht immer, so daß für die Fettverarbeiter andere Absatz- bzw. Verwertungswege interessant sind. Das Verfahren zur Herstellung von 1,3-Propandiol aus Rohglycerin stößt daher in der fettverarbeitenden Industrie auf Interesse.

(7) Die Fermentation erfolgt anaerob bei ca. 37°C. Die Propandiolbildung verläuft umso schneller, je geringer die Glycerinkonzentration ist. Die Fermentation wird daher kontinuierlich bei geringer Glycerinkonzentration durchgeführt. Mit den immobilisierten Bakterien erscheint ein stabiler Prozeß über Monate hin möglich.

Die **Produktausbeute** beträgt etwa 50 Gew.-% (0,5 kg 1,3-Propandiol pro kg Glycerin). Die Produktivität liegt bei etwa 15g/(l x h). Es sind Endkonzentrationen von 10 bis 15% 1,3-Propandiol erreichbar.

Als **Nebenprodukte** werden ca. 10 bis 20% organische Säuren (insbesondere Essigsäure) sowie Wasserstoff und CO₂ gebildet. Als **Reststoff** entsteht eine Schlempe. Durch die

⁵² Die Beschreibung des biotechnischen Verfahrens beruht auf Vorlop 1998, Reimann 1998 und persönlichen Mitteilungen von Prof. K.-D. Vorlop, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft.

⁵³ Auch andere Mikroorganismen sind in der Lage, 1,3-Propandiol zu produzieren, z.B. *Klebsiella pneumoniae*. Dieses Bakterium ist jedoch humanpathogen, so daß für eine industrielle Produktion *C. butyricum* trotz seiner Sauerstoffempfindlichkeit besser geeignet ist.

⁵⁴ Ferner fällt Glycerin als Nebenprodukt bei der Herstellung von Rapsölmethylester (RME) an (ca. 10 Gew.-%, bezogen auf das eingesetzte Rapsöl).

aufgrund der Immobilisierung mögliche Wiederverwendung der Mikroorganismen enthält diese nur geringe Mengen Feststoffe (in Form von Biomasse).

Die immobilisierte Zellen müssen nicht wachsen und benötigen daher nur wenig Stickstoff. Demnach können die Stickstofffrachten in der Schlempe gering gehalten werden, so daß die Einbringung in eine Biogasanlage ohne vorherige Behandlung möglich ist.

(8) Die **Produktabtrennung und -aufbereitung** kann durch verschiedene Verfahren erfolgen. Eine Destillation ist wegen des mit dem hohen Siedepunkt von 1,3-Propandiol (214°C) verbundenen Energieaufwands eher ungünstig. Das Endprodukt ist **qualitativ** mit dem chemisch-technisch synthetisierten Stoff vergleichbar. Die Weiterverarbeitung des 1,3-Propandiols zu PTT erfolgt mit chemisch-technischen Verfahren.

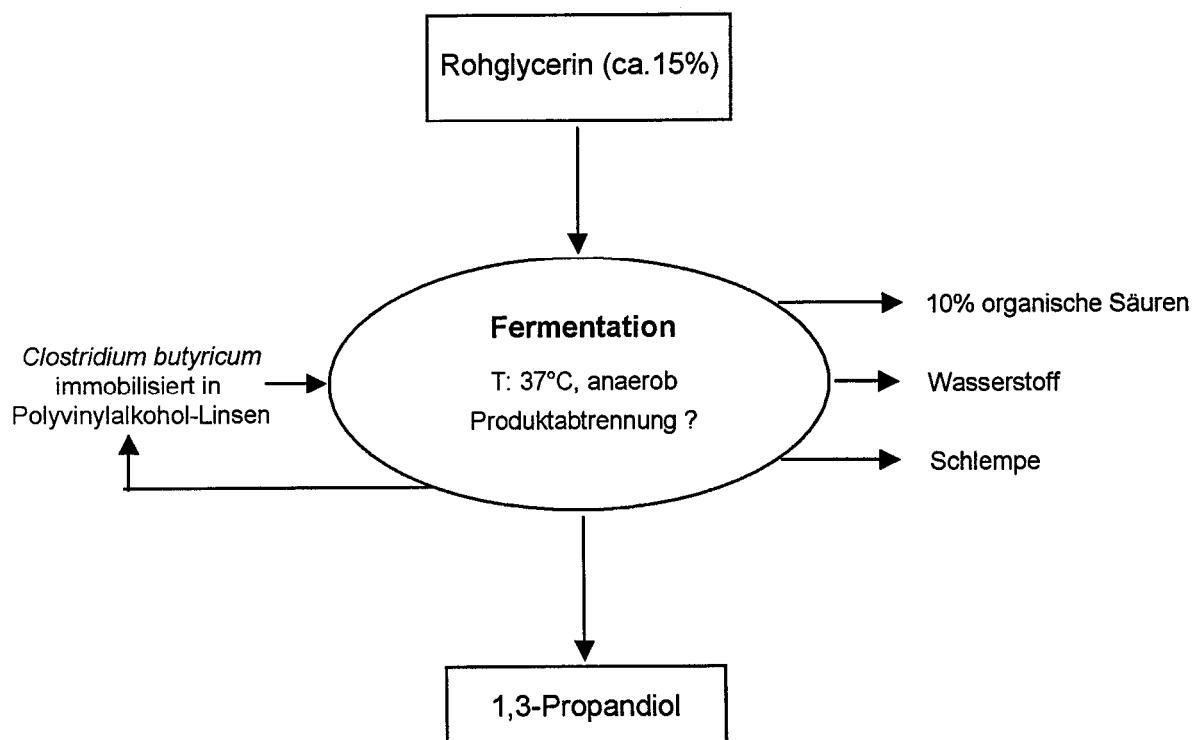


Abb. 5: Biotechnische Herstellung von 1,3-Propandiol aus Rohglycerin
(Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft)

Ökologische Aspekte

a) Chemisch-technische Herstellung (Acrolein-Verfahren)

(9) Bilanzmäßig überschüssiges Wasser, das bei der Oxidation von Propen entsteht und mit organischen Stoffen belastet ist, wird ebenso wie die acroleinhaltigen Abgase der Produktionsanlage und des Tanklagers einer Verbrennungsanlage zugeführt. Über die Abluft oder das Abwasser erfolgen demnach keine Emissionen von Acrolein. Die diffusen Emissionen an Acrolein betrugen 1991 etwa 0,4 g pro produzierter Tonne (BUA 1995). Über die Emissionen des zweiten und dritten Prozessschrittes, der Hydrolyse von Acrolein zu 3-Hydroxipropanol und dessen Reduktion zu Propandiol, liegen keine Informationen vor.

(10) Die Oxidation von Propen zu Acrolein erfolgt bei 300 bis 400°C. Sie ist exotherm (-341 kJ/mol) und erfordert Kühlung. Inwieweit die Reaktionswärme genutzt wird, ist nicht bekannt. Auch über den effektiven kumulierten Prozeßenergiebedarf der chemisch-technischen Herstellung von 1,3-Propandiol liegen in der Literatur keine Angaben vor.

Das chemisch-technische Verfahren basiert auf fossilen Rohstoffen als Feedstock.

(11) Das Risikopotential des chemisch-technischen Verfahrens aufgrund des Umgangs mit gefährlichen Stoffen wird durch Acrolein dominiert. Acrolein ist sehr giftig, möglicherweise krebserzeugend (Kategorie 3, siehe DFG 1998) und stark wassergefährdend (WGK 3). Ferner ist Acrolein hochentzündlich. Aufgrund seiner leichten Flüchtigkeit, der leichten Aufnahme mit der Atmung und durch Hautkontakt sowie der akuten Giftigkeit erfordert der Umgang mit Acrolein besondere Vorsichtsmaßnahmen.

Weitere Risikopotentiale gehen vom hochentzündlichen Eingangsstoff Propen und dem schwach wassergefährdendem Nebenprodukt Acrylsäure (WGK 1) aus.

b) Biotechnische Herstellung von 1,3-Propandiol⁵⁵

(12) Beim biotechnischen Verfahren zur Herstellung von 1,3-Propandiol entstehen als unerwünschte Nebenprodukte verschiedene organische Säuren (vorwiegend Essigsäure). Sofern diese bei großtechnischer Produktion nicht aufbereitet und genutzt würden, wäre eine Neutralisation erforderlich. Das Abwasser enthielte dann die entsprechenden Neutralisations-salze.

⁵⁵

Diese Untersuchung vergleicht eigentlich nur chemisch-technische und biotechnische Verfahren, die zum gleichen Produkt führen. Ein Vergleich von nutzenäquivalenten Produkten war nicht vorgesehen. Im Fall von 1,3-Propandiol zeigte sich jedoch, daß das größere Einsatzpotential bei der neuen Anwendung PTT liegt. Daher wäre ein Vergleich zwischen der PTT- und der Nylonproduktion angebracht.

Im Zuge der Produktisolation und -aufbereitung sind – je nach verwendetem Verfahren – diffuse Emissionen von 1,3-Propandiol (z.B. aus nicht völlig dichten Ventilen) möglich. Genauer kann erst im Zuge des Betriebs einer großtechnischen Anlage ermittelt werden.

Die Schlempe enthält aufgrund der Immobilisierung und der Substratherkunft (Glycerin aus der Fettverarbeitung) wenige Feststoffe und (da die immobilisierten Zellen ruhen) vergleichsweise wenig Stickstoff. Sie eignet sich aufgrund des geringen Stickstoffgehalts gut für den Einsatz in Biogasanlagen.

Über den chemischen und biologischen Sauerstoffbedarf der Schlempe liegen keine Informationen vor.

(13) Zur Gewährleistung anaerober Bedingungen ist die Entfernung von Sauerstoff aus der Substratlösung erforderlich. Sofern das eingesetzte Glycerin nicht heiß (und damit sauerstoffarm) anfällt, wäre bei großtechnischer Anwendung vermutlich die Entfernung des Sauerstoffs (z.B. mit Wasserstoff und Platinkatalysator) erforderlich. Eine weitere Aufbereitung des Rohglycerins ist nicht erforderlich.

Der bei der Fermentation entstehende Wasserstoff könnte (z.B. durch Membranen) abgetrennt und zur Erzeugung von Prozeßenergie genutzt werden.

Bei der Fermentation entsteht Wärme. Bei einer großtechnischen Anlage kann im Sommer Kühlung erforderlich sein.

Der energetische Aufwand zur Produktabtrennung und -aufbereitung hängt von den gewählten Verfahren ab. Im Fall einer Destillation ist aufgrund des hohen Siedepunkts von 1,3-Propandiol (214°C) ein hoher Energieeinsatz erforderlich. Eine Isolierung durch Extraktion oder Adsorption erscheint prinzipiell möglich. Im Zuge eines Scale up auf den großtechnischen Maßstab wäre ein ökonomisch und bzgl. des Energieverbrauchs optimales Verfahren zur Produktabtrennung und -aufbereitung auszuwählen.

Insgesamt lassen sich über die Energieflüsse bei großtechnischer Umsetzung heute noch keine detaillierten Angaben machen, da dies wesentlich von der konkreten Ausgestaltung des Prozesses und der Produktisolation und -aufbereitung abhängt.

(14) Ein stoffliches Risikopotential geht bei der biotechnischen Herstellung von 1,3-Propan-diol von dem hochentzündlichen Nebenprodukt Wasserstoff aus.

Vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung

(15) Insgesamt resultiert aus den dargelegten ökologischen Wirkungen der chemisch-technischen und der biotechnischen Herstellung (mit Substrat Rohglycerin) von 1,3-Propandiol folgende vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung (vgl. Tabelle 6):⁵⁶

- **Humantoxizität:** Aufgrund der Gefährlichkeit von Acrolein wird das Entlastungspotential hinsichtlich Human- und Ökotoxizität durch Umstieg auf das biotechnische Verfahren trotz vergleichsweise geringer Emissionen von Acrolein im Normalbetrieb als mittel (+) eingestuft.
- **Ökotoxizität:** Neutral (0).
- **Aquatische und terrestrische Eutrophierung:** Neutral (0), da das biotechnische Verfahren Reststoffe als Substrate einsetzt (also keine eigens erzeugten landwirtschaftlichen Produkte).
- **Naturraumbeanspruchung:** Neutral (0), da das biotechnische Verfahren Reststoffe als Substrate einsetzt.
- **Photochemische Oxidantienbildung** (Beitrag zum Sommersmog): Neutral (0), da keines der Verfahren mit nennenswerten Emissionen von Ozon-Vorläufersubstanzen verbunden ist.
- **Abbau stratosphärischen Ozons:** Neutral (0)
- **Treibhauswirkung:** Mittleres Entlastungspotential (+). Dies hängt auch vom Prozeßenergiebedarf des biotechnischen Verfahrens (insbesondere für die Produktisolation und –aufarbeitung) ab, der gegenwärtig noch nicht genau spezifiziert werden kann. Auch im Fall einer energie-intensiven Destillation dürfte der Prozeßenergiebedarf des biotechnischen Verfahrens noch geringer als der des chemisch-technischen Verfahrens sein.
- **Versauerung:** Neutral (0)
- **Verbrauch fossiler Rohstoffe:** Einsparung von fossilen Rohstoffen, die als Feedstock bei der chemisch-technischen Herstellung verwendet werden und Einsparung von fossilen Rohstoffen zur Prozeßenergieerzeugung⁵⁷ (++/+).

⁵⁶

Legende: Im Vergleich zum chemisch-technischen Verfahren ergeben sich für den biotechnischen Prozeß Umweltentlastungen (+), Umweltbelastungen (–) oder keine Auswirkungen (0).

⁵⁷

Je nach gewähltem Verfahren für die Produktabtrennung und -isolation bei der biotechnischen Variante.

Ökonomische Aspekte

(16) Es wird allgemein davon ausgegangen, daß die biotechnische Produktion von 1,3-Propandiol **mittelfristig billiger** sein kann als die chemisch-technische Herstellung nach dem Acrolein- oder dem Ethylenoxidverfahren (siehe z.B. N.N. 1998c). Sofern es gelingt, Glucose als Substrat zu erschließen, werden Kosten von etwa 1,30 US\$ pro kg erwartet (N.N. 1998c. Annahmen: Kapazität 25.000 Jahrestonnen, Standort USA). Rund die Hälfte dieser Kosten entfällt auf das Substrat, der Rest verteilt sich auf die Investitionen, Abschreibungen, Arbeits- und Betriebskosten und den kalkulatorischen Gewinn (20% Return on Investment). Die Kosten der chemisch-technischen Herstellung liegen bei etwa 1,40 bis 1,60 US\$ pro kg.

DuPont rechnet damit, daß 1,3-Propandiol mittelfristig biotechnisch etwa zu gleichen Kosten hergestellt werden könnte wie Ethandiol. Damit wäre PTT zu vergleichbaren Preisen herstellbar wie Polyethylenterephthalat (PET).⁵⁸

Bei Verwendung von Glycerin hängen die Substratkosten wesentlich von der Qualität des Rohglycerins und dem schwankenden Weltmarktpreis für Glycerin ab. Der Glycerinmarkt ist derzeit von Überkapazitäten geprägt, die auch aus der zunehmenden Nutzung von natürlichen Fetten und Ölen (einschl. Rapsöl zur Herstellung von Rapsölmethylester) resultieren. Für die nähere Zukunft ist tendenziell mit weiter sinkenden Preisen zu rechnen.

(17) Das **Marktaufnahmepotential** für 1,3-Propandiol hängt stark von den Produktionskosten ab. Der Preis für 1,3-Propandiol bestimmt die Herstellungskosten des Folgeprodukts PTT wesentlich. Kann PTT in Qualitäten für vergleichbare Anwendungen günstiger als Nylon-6,6 angeboten werden, eröffnet sich potentiell ein sehr großes Absatzpotential für PTT (als preiswerte Alternative zu Nylon-6,6) und damit für den Eingangsstoff 1,3-Propandiol.

Es ist zu erwarten, daß es bei bestimmten Anwendungen (z.B. Teppichfasern) zu einer solchen Materialsubstitution kommt. Beleg hierfür ist der im Vergleich zu den bisherigen Anlagen massive Aufbau von neuen Kapazitäten für chemisch-technisch hergestelltes 1,3-Propandiol. Die chemisch-technische Herstellung ist – sofern die biotechnische Produktion tatsächlich günstiger wird – als **Übergangslösung** bis zur großtechnischen Anwendungsreife des biotechnischen Verfahrens zu sehen.

(18) Da das zukünftige Marktpotential für 1,3-Propandiol aus einem allfälligen Ersatz von Nylon durch PTT resultiert, tritt das biotechnische Verfahren primär nicht in Konkurrenz zum chemisch-technischen Verfahren zur Herstellung von 1,3-Propandiol (allenfalls langfristig

⁵⁸

Der Preis für PET ist in der zweiten Hälfte des Jahres 1999 deutlich angestiegen. Er lag Anfang 2000 in Europa für Flaschenware (d.h. Qualitäten, die sich für die Herstellung von Getränkeflaschen eignen) bei etwa 2 DM/kg. Weitere Preissteigerungen sind möglich (N.N. 2000).

könnte das biotechnische Verfahren das chemisch-technische völlig ablösen). Vielmehr würde die Nylonherstellung betroffen sein (vgl. Kapitel 4.4).

(19) Die optimale Größe einer Anlage zur biotechnischen Gewinnung von 1,3-Propandiol hängt stark von der Substratverfügbarkeit ab. Bei Verwendung von Rohglycerin bietet sich ein bestehender Standort der fettverarbeitenden Industrie an. Die Kapazität der 1,3-Propandiol-Anlage wird sich dann an den dort anfallenden Mengen Glycerin orientieren.

(20) Anlagen, in denen Rohglycerin anfällt, verfügen in der Regel über Destillationseinrichtungen zur Aufkonzentrierung des Glycerins, die auch zur Aufbereitung des 1,3-Propandiols geeignet sind. Den hohen Energiekosten der Destillation stünden im Fall der Nutzung vorhandener Infrastruktur die geringeren Investitionskosten gegenüber.

Rechtliche Aspekte

(21) Errichtung und Betrieb einer biotechnischen Anlage zur Herstellung von 1,3-Propandiol bedürfen – ebenso wie im Fall Aceton/Butanol – keiner immissionsschutzrechtlichen Genehmigung (vgl. Abschnitt "Rechtliche Aspekte" in Kapitel 4.1). Es ist keine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich.

Es wird hier von der Verwendung von Glycerin aus der Fettspaltung als Substrat für die Fermentation ausgegangen. Dieses Glycerin ist ein Abfall zur Verwertung im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes. Es handelt sich demnach bei der biotechnischen Herstellung von 1,3-Propandiol aus solchem Glycerin um ein (stoffliches) Verwertungsverfahren im Sinne des Anhangs II B zum KrW-/AbfG. Daraus resultieren nach Kenntnis der Autoren dieses Berichts gegenüber der Verwendung eines anderen Substrats keine anderen materiellrechtlichen Anforderungen an die Anlage (§ 9 KrW-/AbfG).

(22) Der im Hinblick auf die Umweltwirkungen wesentliche Unterschied zwischen dem chemisch-technischen Verfahren und der biotechnischen Variante zur Herstellung von 1,3-Propandiol besteht in der Nutzung von lebenden Mikroorganismen. Weitere potentiell relevante Unterschiede sind mit den Nebenprodukten des biotechnischen Verfahrens verknüpft: Die organischen Säuren und die Schlempe müssen verwertet oder beseitigt werden. Der bei der Fermentation anfallende Wasserstoff ist hochentzündlich und erfordert ggf. entsprechende Maßnahmen.

Insgesamt sind damit folgende potentielle Umweltwirkungen des biotechnischen Verfahrens hinsichtlich rechtlicher Aspekte zu prüfen:

a) Bestimmungsgemäßer Betrieb

- ☐ Emissionen von 1,3-Propandiol und Essigsäure aus der Anlage in die Luft
- ☐ Organische Säuren im Abwasser der Anlage
- ☐ Schutz der Beschäftigten gegen mögliche Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe.

Der Frischwasserbedarf dürfte gering sein, da der Glycerinablauf aus der Fettspaltung direkt und ohne weitere Verdünnung eingesetzt werden kann.

Es wird im folgenden davon ausgegangen, daß die anfallende Schlempe entweder einer Abwasserbehandlungsanlage oder einer Biogasanlage zugeführt wird.⁵⁹ In diesem Fall entstehen keine produktionsspezifischen Abfälle zur Beseitigung im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes.

b) Nicht-bestimmungsgemäßer Betrieb

- ☐ Schutz der Beschäftigten und der Anlagenumgebung vor möglichen Risiken durch ungewollte Freisetzung lebender Mikroorganismen
- ☐ Explosionsgefahr durch Wasserstoff (hochentzündlich).

Die als Nebenprodukt anfallende Essigsäure tritt in Konzentrationen unter 25% auf und stellt somit keine Wassergefährdung dar. Es wird aus ökonomischen Gründen nicht davon ausgegangen, daß die Essigsäure aufbereitet und vermarktet wird. Sie ist vor Einleitung in die Abwasserbehandlungsanlage ggf. zu neutralisieren.

(23) Aufgrund des hohen Siedepunktes von 1,3-Propandiol (214°C) ist nicht davon auszugehen, daß es (z.B. durch Tankatmung) zu nennenswerten Emissionen von 1,3-Propandiol aus der Anlage kommt. Für 1,3-Propandiol gibt es keine Grenzwerte für Luftemissionen aus einer Anlage oder auf den Schutz der Beschäftigten bezogene Grenzwerte (z.B. MAK- oder BAT-Werte). Nähere Angaben zu einem eventuellen gesundheitlichen Risiko durch 1,3-Propandiol liegen den Autoren dieser Untersuchung nicht vor. Aufgrund dessen und der Tatsache, daß allenfalls geringe Mengen 1,3-Propandiol diffus aus der Anlage entweichen dürften, sehen wir hier keinen Regelungsbedarf.

Für Essigsäure gibt es einen MAK-Wert in Höhe von 25 mg/m³. Dessen Einhaltung ist technisch möglich, wie z.B. die bestehenden Anlagen zur Herstellung von Essigsäure

59

Aus Umweltsicht erscheint insbesondere das Einbringen in eine Biogasanlage sinnvoll. Dies ist voraussichtlich ohne vorherige Behandlung möglich (siehe oben). Eine Verwertung als Dünger wird daher hier nicht weiter betrachtet. Eine Nutzung als Viehfutter kommt wegen des geringen Feststoffanteils nicht in Betracht.

belegen. Damit kann der gesundheitliche Schutz der Beschäftigten vor Essigsäure als angemessen gewährleistet angesehen werden.

(24) Die genaue Menge und Zusammensetzung des anfallenden Abwassers kann beim gegenwärtigen Stand der Verfahrensentwicklung noch nicht näher spezifiziert werden, da diese Faktoren u.a. von dem für die Produktabtrennung und -aufbereitung gewählten Verfahren sowie von der Einbringung der Schlempe in eine Biogasanlage abhängen. Die Abwassermenge ist vermutlich gering. Das Abwasser wird in jedem Fall entweder in die öffentliche Kanalisation oder in eine betriebseigene Abwasserbehandlungsanlage eingeleitet. Hinsichtlich des Abwassers kann bei Einhaltung der einschlägigen Grenzwerte von einem angemessenen Schutz der Umwelt ausgegangen werden.

(25) Hinsichtlich des Schutzes der Beschäftigten vor möglichen Risiken durch den Umgang mit biologischen Arbeitsstoffen gilt das in Kapitel 4.1 für die Aceton-Butanol-Fermentation Gesagte analog: In beiden Fällen handelt es sich bei den Produktionsstämmen um nicht gentechnisch veränderte Clostridien, die nach heutigem Stand des Wissens für Mensch und Umwelt ungefährlich sind. Der Betreiber einer Anlage zur biotechnischen Herstellung von 1,3-Propandiol muß gemäß § 6 BioStoffV eine Gefährdungsbeurteilung für die verwendeten Mikroorganismen durchführen. Nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts sind die Produktionsstämme der Risikogruppe 1 zuzuordnen. Die Einhaltung der in der BioStoffV und der Unfallverhütungsvorschrift der Berufsgenossenschaft (BG Chemie 1997) vorgesehenen Schutzmaßnahmen gewährleistet einen angemessenen Schutz der Beschäftigten.

(26) Auch hinsichtlich eines möglichen Explosionsrisikos durch als Nebenprodukt bei der Fermentation anfallenden Wasserstoff sowie bezüglich der ungewollten Freisetzung von lebenden Mikroorganismen im nicht-bestimmungsgemäßen Betrieb gelten die in Kapitel 4.1 für die biotechnische Herstellung von Aceton und Butanol getroffenen Einschätzungen analog.

Perspektiven

(27) Da der Markt für 1,3-Propandiol voraussichtlich stark wächst, konkurriert das biotechnische Verfahren zunächst nicht mit bereits bestehenden chemisch-technischen Anlagen, die von einer Substitution betroffen wären. Vielmehr stellt sich die Frage der Verfahrensart auf absehbare Zeit bei Errichtung neuer Kapazitäten. Damit **entfallen Hemmnisse**, die aus dem Startvorteil bestehender Anlagen resultieren (Einbindung in dem Produktionsverbund bestehender Anlagen, Abschreibungsstatus etc.), weitgehend.

(28) Das Entwicklungsstadium des biotechnischen Verfahrens, das von Glycerin ausgeht, ist näher an der großtechnischen Umsetzung als die Nutzung von Glucose. Daher ist damit

zu rechnen, daß 1,3-Propandiol **biotechnisch zunächst aus Glycerin** hergestellt wird und später – abhängig von den Kosten der Substrate – weitere biotechnische Kapazitäten auf der Basis von Glucose geschaffen werden. Der Einsatz von Glycerin könnte in diesem Fall eine Übergangslösung sein, die langfristig zumindest in Nischen (angekoppelt an fettverarbeitende Betriebe) Bestand haben könnte.

Die Verwendung von Zucker als Substrat ist mit einer größeren Infektionsgefahr für die Produktionsstämme verbunden (z.B. durch Lactobazillen) als der Einsatz von Glycerin, da Zucker natürliches Substrat für zahlreiche konkurrierende Organismen ist.

(29) Im Zuge der Übertragung des biotechnischen Verfahrens auf den **großtechnischen Maßstab** sind eine Reihe von Fragen zu lösen. Dies betrifft u.a. die sterile Herstellung von Immobilisaten in den erforderlichen Mengen, die Sauerstoffelimination, die Produktabtrennung und -aufbereitung, die Nutzung des anfallenden Wasserstoffs sowie die Verwertung oder Entsorgung der organischen Säuren.

(30) Der Einsatz von thermophilen Mikroorganismen, welche – im Unterschied zu den bislang eingesetzten Clostridien) den heißen Glycerinablauf (typisch sind 60 bis 80°C) aus der Fettverarbeitung ohne Kühlung und ohne Sauerstoffelimination vergären könnten, wurde an der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft ebenfalls untersucht und als grundsätzlich möglich beurteilt.

Es ist denkbar, durch gentechnische Veränderung der Produktionsstämme an Stelle von organischen Säuren CO_2 oder vermarktbare **Ethanol** als Nebenprodukte zu erzeugen. Damit entfielen eine ggf. erforderliche Entsorgung der Säuren. Durch eine Variation der Verfahrensparameter allein ist dies nicht erreichbar.

(31) Die laufenden Arbeiten zur Weiterentwicklung und Optimierung der biotechnischen Verfahren sollten unbedingt weiterverfolgt werden. Hinsichtlich des Einsatzes von Glycerin aus der Fettspaltung gibt es **interessierte Unternehmen**, mit denen eine Demonstrationsanlage realisiert werden könnte. Es wäre im Einzelfall abzuklären, inwieweit dies öffentliche Fördermittel erfordert.

Für eine Übertragung des auf Rohglycerin basierenden Verfahrens auf den großtechnischen Maßstab ist mit einem **Zeitbedarf** von etwa 3 Jahren zu rechnen.

Der Zeithorizont für die Entwicklungsarbeiten an der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft bis zur Verwendbarkeit von Glucose als Substrat beträgt etwa 2 Jahre. Für eine Übertragung auf den großtechnischen Maßstab dürften weitere 3 Jahre erforderlich sein.

Schlußfolgerungen in Bezug auf 1,3-Propandiol

(32) Im Fall von 1,3-Propandiol sind die Aussichten des biotechnischen Verfahrens **besonders günstig**. Die biotechnische Herstellung wird voraussichtlich billiger sein als die chemisch-technische. Preisgünstig verfügbares 1,3-Propandiol kann einen großen Markt für das Folgeprodukt PTT eröffnen und dadurch zukünftig ein im Vergleich zur heutigen Produktionsmenge von 1,3-Propandiol großes Marktpotential eröffnen.

Aufgrund des aus den genannten Gründen voraussichtlich steigenden Absatzpotentials konkurriert das biotechnische Verfahren zunächst nicht mit bestehenden chemisch-technischen Anlagen zur Herstellung von 1,3-Propandiol, sondern wäre zukünftig bei Errichtung neuer Kapazitäten das **Verfahren der Wahl**.

(33) Käme es tatsächlich zu einer Substitution von Nylon durch PTT in bestimmten Anwendungen, so handelte es sich nicht um die Substitution eines chemisch-technischen Verfahrens zur Herstellung des gleichen Stoffs, sondern um eine **Produktsubstitution** (Nylon in bestimmten Anwendungen durch PTT). Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen des biotechnischen Verfahrens wäre als Vergleich die Herstellung von Nylon zu betrachten.

(34) Die biotechnische Herstellung von 1,3-Propandiol bietet gegenüber der chemisch-technischen Herstellung umweltseitige Vorteile durch die Vermeidung des Umgangs mit dem als **sehr problematisch anzusehenden Acrolein**. Ferner werden fossile Rohstoffe, die als Eingangsstoffe und zur Erzeugung der Prozeßenergie für die chemisch-technische Herstellung dienen, eingespart.

(35) Das biotechnische Verfahren könnte sich zunächst insbesondere dort etablieren, wo geeignete Substrate als ansonsten anderweitig zu verwertende bzw. entsorgende Reststoffe anfallen (z.B. Zucker- und Fettverarbeitung). Sobald die von Glucose oder Stärke ausgehenden Verfahren großtechnisch anwendungsreif sind, ist auch eine biotechnische Produktion auf der Basis von eigens dafür angebauten landwirtschaftlichen Produkten möglich.

(36) Die Produktisolierung aus der Fermentationsbrühe kann durch Destillation oder andere gängige physikalische Verfahren (Extraktion, Adsorption) erfolgen. Dadurch ist die gleiche **Produktqualität** erreichbar wie bei der chemischen Herstellung. Bei Verwendung von 1,3-Propandiol zur Herstellung von PTT sind chemisch-technisch und biotechnisch hergestelltes 1,3-Propandiol gleichwertig.

(37) Das Verfahren dürfte sich auch für den Einsatz in **Schwellen- und Entwicklungsländern** eignen. Dort wäre es insbesondere dann attraktiv, wenn geeignete Reststoffe aus der fett-, zucker- oder stärkeverarbeitenden Industrie als Substrate verfügbar sind.

(38) Die laufenden Ansätze zur Weiterentwicklung des Verfahrens sollten angesichts der günstigen Aussichten **unbedingt weiterverfolgt** werden. Die biotechnische Herstellung von 1,3-Propandiol aus Glycerin eignet sich aufgrund des fortgeschrittenen Entwicklungsstandes⁶⁰ und des Interesses der fettverarbeitenden Industrie für ein **Demonstrationsvorhaben**.

(39) Die bestehenden Bestimmungen erscheinen den Autoren dieses Berichts angemessen, um die mit der biotechnischen Herstellung von 1,3-Propandiol verbundenen Umweltwirkungen zu regeln. Es ist aus heutiger Sicht nicht erkennbar, daß rechtliche Regelungen der Anwendung des biotechnischen Verfahrens entgegenstehen.

⁶⁰

Möglicherweise eignen sich auch weitere in Entwicklung befindliche, in dieser Untersuchung jedoch nicht näher betrachtete Verfahren zur biotechnischen Herstellung von 1,3-Propandiol (z.B. das eingangs genannte Verfahren der GBF) für solche Demonstrationsvorhaben.

4.3 Fallbeispiel 3: Vitamin C

Einführung

(1) Vitamin C (Ascorbinsäure) wird in der pharmazeutischen Industrie und – aufgrund seiner Eigenschaften als Antioxidations- und Reduktionsmittel – als Zusatzstoff in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Die jährliche Produktionsmenge beträgt über 60.000 Tonnen und hat in den vergangenen Jahren kontinuierlich zugenommen. Der Preis ist in den letzten Jahren deutlich gesunken und lag 1999 bei knapp 10 US\$/kg.

(2) Vitamin C wird industriell überwiegend basierend auf dem 1934 von Reichstein entwickelten Verfahren aus Glucose hergestellt. Einer der insgesamt 6 Schritte des industriellen Reichstein-Verfahrens – die Umwandlung von Sorbit in Sorbose – erfolgt durch Fermentation. Das gängige Verfahren zur Herstellung von Vitamin C besteht also bereits in einer Kombination aus chemisch-technischen Schritten mit einer biotechnischen Stufe. Diese seinerzeit sehr ungewöhnliche Verknüpfung wurde letztlich aufgrund der einfachen, aber sehr effizienten Fermentation – die Ausbeute des biotechnischen Schritts beträgt über 90% – realisiert.

(3) Die vielstufige Reichstein-Synthese ist kompliziert und kostenintensiv. Daher wurden vielfältige Anstrengungen zur Vereinfachung und Optimierung unternommen. Es gibt eine Reihe von Ansätzen zur Ersetzung weiterer chemisch-technischer durch verschiedene biotechnische Schritte:

- Ein Konsortium aus Eastman Chemical Company (Kingsport/Tennessee, USA), Genencor International Inc. (Rochester/New York), MicroGenomics Inc., Electro-synthesis Company Inc. und dem staatlichen Argonne National Laboratory hat ein mikrobielles Verfahren entwickelt, das mit Hilfe eines einzigen Produktionsstammes Vitamin C aus Glucose liefern soll (Genencor 1998). Dieses Verfahren soll eine Senkung der Produktionskosten für Vitamin C gegenüber dem Reichstein-Verfahren um 50% ermöglichen.⁶¹
- Es gibt Hinweise, daß Archer Daniels Midland (ADM) in Decatur/Illinois (USA) eine Anlage zur biotechnischen Herstellung von Vitamin C errichtet hat. Über das dort

⁶¹

Nähere Informationen über dieses Verfahren sind nicht publiziert. Möglicherweise handelt es sich um eine Weiterentwicklung eines in der Literatur erwähnten Verfahrens, mit dem durch Übertragung eines Gens aus *Corynebacterium* sp auf *Erwinia herbicola* die fermentative Gewinnung von Ketogulonsäure aus Glucose möglich ist (Leuchtenberger 1998). Auch *Acetobacter*, *Alcaligenes*, *Aerobacter*, *Azotobacter*, *Escherichia*, *Klebsiella*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Serratia* und *Xanthomonas* sind prinzipiell in der Lage, diesen Schritt auszuführen. Die bislang erreichten Ausbeuten sind jedoch sehr gering. Eine weitere denkbare biotechnische Route zu Vitamin C führt über 2,5-Diketo-D-Gluconsäure (Rehm 1993). Ferner gibt es Routen über 2-Keto-D-Gluconsäure und L-Gulonsäure (Boudrant 1990).

benutzte Verfahren gehen aus der Literatur keine näheren Informationen hervor. Die Anlage ist offenbar derzeit nicht in Betrieb, wobei unklar ist, ob dies aus technischen Problemen oder dem niedrigen Preisniveau für Vitamin C resultiert (McCoy 1998a).

- An der Universität für Bodenkultur in Wien werden mehrstufige enzymatische Verfahren zur Herstellung von Vitamin C bzw. Vitamin C-Vorstufen aus verschiedenen Substraten (z.B. Pectin) mittels Membran-Enzym-Reaktor und Cofaktorregenerierung entwickelt.
- In der Patendliteratur sind biotechnische Verfahren für Einzelschritte der Vitamin C-Herstellung zu finden. Über die konkrete Nutzung dieser Verfahren liegen jedoch keine weiteren Hinweise vor.⁶²

(4) In Krefeld wird derzeit von der Keto-Gulonsäure Produktionsgesellschaft mbH (KGS), einem Gemeinschaftsunternehmen des Stärkeverarbeiters Cerestar Deutschland GmbH (Krefeld), der BASF AG (Vitamin C-Produktion nach dem Reichstein-Verfahren in Grenaa, Dänemark) und der Merck KGaA (Darmstadt), am Standort von Cerestar eine Anlage zur großtechnischen Herstellung von Ketogulonsäure⁶³ aus Sorbit errichtet. Damit erfolgen drei bislang chemisch-technisch durchgeführte Schritte nunmehr biotechnisch. Das Eingangsprodukt Sorbit wird vermutlich chemisch-technisch durch Hydrierung von Glucose gewonnen. Sorbit wird biotechnisch zu Ketogulonsäure umgewandelt.

Die bei der KGS hergestellte Ketogulonsäure wird von Merck und BASF unabhängig voneinander in ihren vorhandenen Anlagen auf die übliche chemisch-technische Weise zu Vitamin C umgesetzt. Der Produktionsstart war für Ende 1999 angesetzt, ist aber offenbar bis zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Berichts (März 2000) noch nicht erfolgt. Es wurden bislang keine Details des in Krefeld angewendeten Prozesses veröffentlicht, so daß dieses Verfahren hier nicht näher betrachtet werden kann.

(5) Die folgenden Betrachtungen zur Ersetzung chemisch-technischer Schritte des Reichstein-Verfahrens durch biotechnische Stufen basieren auf einem Prozeß, der nach den vorliegenden Information von den verschiedenen Ansätzen zur mikrobiellen Herstellung von Ketogulonsäure aus Sorbit einer für industrielle Zwecke aussichtsreichsten zu sein scheint. Dies ist das Verfahren von Ning et al. (Beijing Pharmaceutical Plant, US-Patent 4935359 von 1990, siehe auch Ullmann's). Dieses Verfahren wird in China bereits großtechnisch eingesetzt.

⁶² Z.B.. Herstellung von Ketogulonsäure mit *Gluconobacter* (US-Patent 5082785 von 1992), mit *Pseudogluconobacter* (US-Patent 5705373 von 1998), mit *Corynebacterium* (US-Patent 558325 von 1996).

⁶³ Genauer: 2-Keto-L-Gulonsäure.

Chemisch-technisches Verfahren (Reichstein-Verfahren)⁶⁴

(6) Das Reichstein-Verfahren besteht aus insgesamt 6 Schritten (Abbildung 6 auf der folgenden Seite): 1. Hydrierung von D-Glucose zu D-Sorbit, 2. Fermentation zu Sorbose mit *Acetobacter suboxydans*, 3. Einführung von Schutzgruppen (Protektion), 4. Oxidation der ungeschützten Hydroxygruppe zu 2-Keto-L-Gulonsäure, 5. Deprotektion und 6. Zyklisierung zu L-Ascorbinsäure (Vitamin C). Die Ausbeute jedes Schritts liegt bei über 90%, die Gesamtausbeute bei ungefähr 60%.

Der Eingangsstoff D-Glucose wird in der Regel durch Säurehydrolyse oder enzymatisch aus Stärke gewonnen.

(7) Die Hydrierung von D-Glucose zu D-Sorbit erfolgt nahezu quantitativ bei erhöhter Temperatur und hohem Druck in Gegenwart von Raney-Nickel als Katalysator.⁶⁵ Die Glucose muß sehr rein sein, da die Sorbitlösung nach Entfernung des Katalysators ohne weitere Reinigung zu L-Sorbose umgesetzt wird. Die Ausbeute beträgt über 97%. Als Nebenprodukte entstehen geringe Mengen an D-Mannitol und L-Iditol. Eine fermentative Umsetzung von D-Glucose zu D-Sorbit ist ebenfalls möglich, wird aber großtechnisch bislang nicht praktiziert.

(8) Die Fermentation von L-Sorbit zu L-Sorbose erfolgt aerob unter sterilen Bedingungen mit *Acetobacter suboxydans* bei pH 4 bis 6 und 30 bis 35°C. Die Ausbeute beträgt über 90%. Das Produkt wird durch Filtration und Kristallisation gewonnen und anschließend getrocknet.

(9) L-Sorbose wird bei 4°C in Aceton und einem katalytisch und dehydrierend wirkenden Überschuß an Schwefelsäure zu 2,3:4,6-Diaceton-L-Sorbose umgesetzt. Nach Neutralisation wird der Acetonüberschuß durch Destillation entfernt und wieder in den Prozeß eingeführt. Das Produkt wird mit einem aromatischen Lösungsmittel, z.B. Toluol, extrahiert. Nebenprodukte sind 2,3- und 1,2-Monoaceton-L-Sorbose. Sie werden isoliert und verwertet.

(10) Die Oxidation zur 2,3:4,6-Diaceton-2-Keto-L-Gulonsäure wird in der Regel bei 60°C in verdünnter Natronlauge in Gegenwart eines Nickelchlorid- oder -sulfat-Katalysators durchgeführt. Sie kann auch elektrochemisch an Nickel- oder Nickeloxid-Elektroden oder mit Luft-sauerstoff, katalysiert durch Platin oder Paladium, erfolgen. Das Produkt fällt nach Ansäuern als Monohydrat aus.

⁶⁴ Die Darstellung des Reichstein-Verfahrens basiert auf Kirk-Othmer und Römpp.

⁶⁵ Detaillierte Angaben zu den in der Praxis verwendeten Temperaturen und Drücken liegen nicht vor.

(11) Zur weiteren Umsetzung wird 2,3:4,6-Diaceton-2-L-Keto-Gulonsäure in einem inerten Lösungsmittel (z.B. Toluol oder Trichlormethan) in Gegenwart von Salzsäure gelöst. Dabei werden die Schutzgruppen entfernt (Deprotektion), und die ungeschützte 2-Keto-L-Gulonsäure zyklisiert säurekatalysiert zu Vitamin C. Das Produkt ist in dem organischen Lösungsmittel nicht löslich, fällt aus und kann durch Filtration gewonnen werden. Die Reinigung erfolgt durch Aktivkohle oder Ionenaustausch nach Lösung in Wasser und anschließender Rekristallisation. Die Lösungsmittel werden durch fraktionierte Destillation wiedergewonnen.

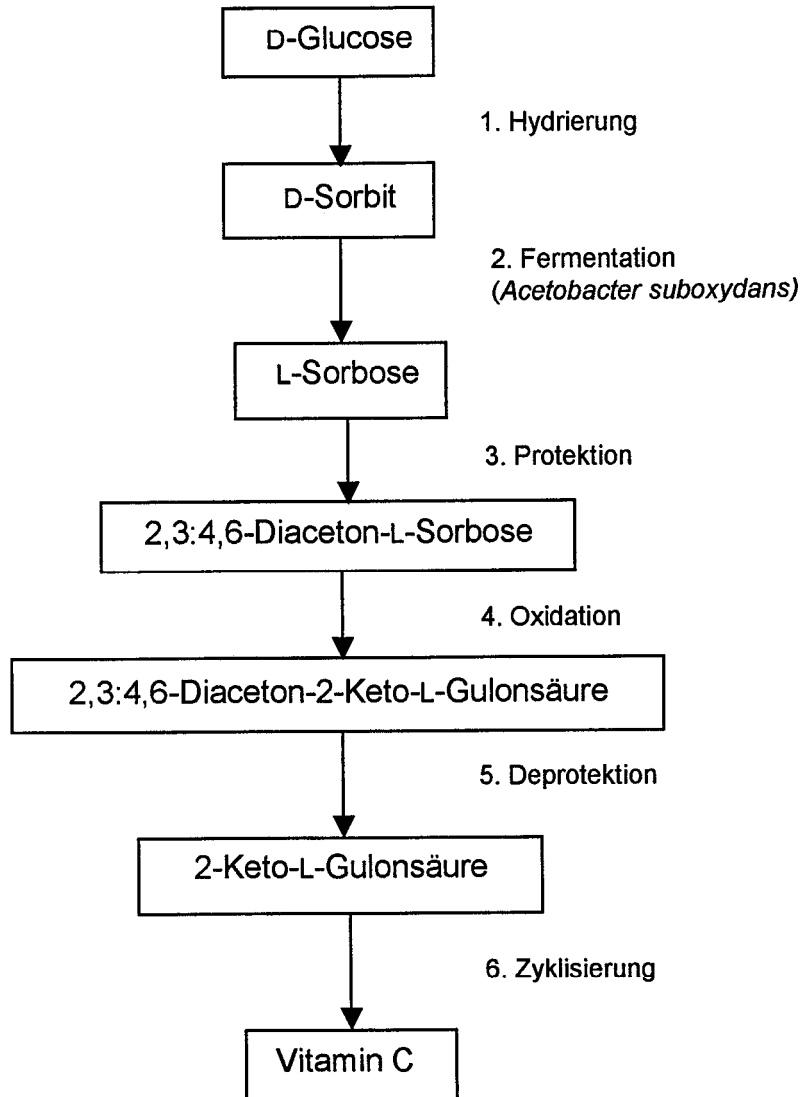


Abb. 6: Reichstein-Synthese zur Herstellung von Vitamin C (stark vereinfacht)

Biotechnisches Verfahren (Ning-Verfahren)

(12) Das hier betrachtete biotechnische Verfahren nach Ning ersetzt die Schritte 3, 4 und 5 der chemisch-technischen Reichstein-Synthese (Ullmann's). Die Herstellung von 2-Keto-

L-Gulonsäure aus L-Sorbose erfolgt durch einstufige Fermentation mit einer Mischkultur aus *Gluconobacter oxydans* und *Bacillus megaterium* (Abbildung 7). Die Gewinnung der D-Glucose aus Stärke sowie die Hydrierung von D-Glucose zu D-Sorbit⁶⁶ und die Fermentation von D-Sorbit zu L-Sorbose mit *Acetobacter suboxydans* erfolgen annahmegemäß analog wie bei der Reichstein-Synthese. Entsprechendes gilt für den letzten Schritt, den Ringschluß von 2-Keto-L-Gulonsäure zu Vitamin C.

(13) Bei der zweiten Fermentation (Herstellung von 2-Keto-L-Gulonsäure aus L-Sorbose) beträgt die Substratkonzentration 70g/l. Die Ausbeute beträgt 50g/l (71%). Das optimale Verhältnis von *Gluconobacter oxydans* und *Bacillus megaterium* stellt sich im Laufe des Prozesses selbsttätig ein.

Vermutlich erfolgt die Zyklisierung von 2-Keto-L-Gulonsäure zu Vitamin C unmittelbar in der Fermentationsbrühe ohne zwischenzeitliche Aufbereitung.

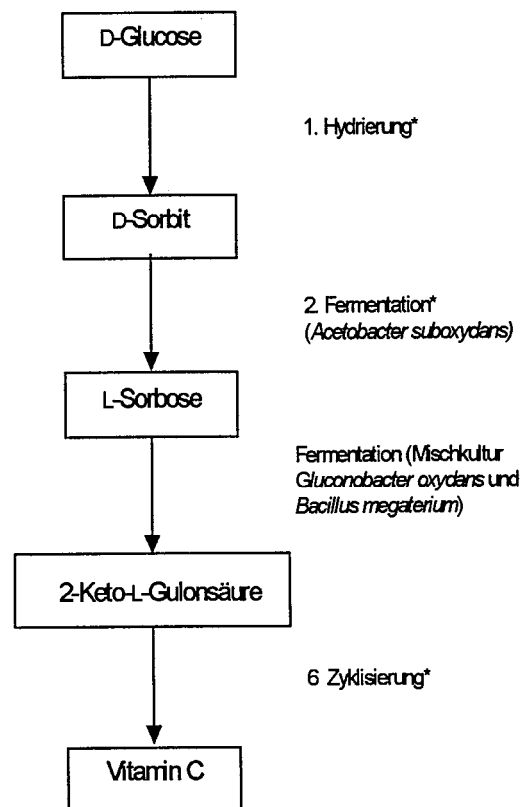


Abb. 7: Herstellung von Vitamin C nach Ning
(* Auch im Reichstein-Verfahren verwendete Schritte)

⁶⁶

D-Sorbit kann auch biotechnisch hergestellt werden, siehe Kennblatt Sorbit in Anhang 1.

Ökologische Aspekte

a) Reichstein-Synthese

(14) Für den Vergleich des chemisch-technischen mit dem biotechnischen Verfahren sind nur die sich in den beiden Varianten unterscheidenden Schritte (Umwandlung von L-Sorbose zu 2-Keto-L-Gulonsäure) zu betrachten, da sich die Umweltwirkungen bei den identischen Schritten nicht unterscheiden.

Das Abwasser aus den betrachteten Verfahrensschritten enthält Natriumchlorid und –sulfat sowie Aceton.

Die Destillationsrückstände der Lösungsmittelrückgewinnung werden durch Verbrennung entsorgt.

Die Abgase des Verfahrens werden durch Naßwäsche und Aktivkohlefilter gereinigt. Über diffuse Emissionen (insbesondere der verwendeten organischen Lösungsmittel) liegen keine näheren Informationen vor.

Es fallen verschiedene feste Abfällen (Filterabfälle, Aktivkohlereste) an, über deren Menge, Zusammensetzung und Verbleib die Literatur keinen näheren Aufschluß gibt. In der Literatur (z.B. Römpf) wird jedoch stets auf beträchtliche Abfallmengen hingewiesen (ohne dies näher zu spezifizieren).

(15) Das chemisch-technische Verfahren geht – ebenso wie das biotechnische – von nachwachsenden Rohstoffen aus.

Der Prozeßenergiebedarf ergibt sich aus den zahlreichen Aufbereitungsschritten (einschl. Destillation zur Rückgewinnung der verwendeten Lösungsmittel). Hohe Temperaturen oder Drücke sind im Rahmen der eigentlichen Synthese nur im ersten Verfahrensschritt erforderlich.

(16) Das Risikopotential des chemisch-technischen Verfahrens ergibt sich insbesondere aus dem Umgang mit den organischen Lösungsmitteln. In der Regel werden Toluol und ggf. zusätzlich Chloroform eingesetzt. Beide Stoffe sind gesundheitsschädlich. Toluol ist ferner wassergefährdend (WGK 2) und leichtentzündlich. Chloroform ist möglicherweise krebserzeugend (Kategorie 3) und stark wassergefährdend (WGK 3).

Aceton, Schwefel- und Salzsäure sowie Natronlauge sind schwach wassergefährdend (WGK 1). Ferner ist Aceton leichtentzündlich.

Über die Gefährlichkeit der Abfälle liegen aus der Literatur keine näheren Informationen vor.

b) Ning-Verfahren

(17) Das hier betrachtete biotechnische Verfahren ersetzt die drei chemisch-technischen Schritte, die von L-Sorbose zu 2-Keto-L-Gulonsäure führen. Die übrigen Schritte sind identisch mit denen der Reichstein-Synthese. Für den Vergleich mit dem chemisch-technischen Verfahren sind nur die substituierten Schritte zu betrachten. Diesbezüglich ist die Informationslage in der Literatur dürftig.

Die Ausbeute der Fermentation beträgt über 70%. Über unerwünschte Nebenprodukte liegen keine weiteren Angaben vor. Es handelt sich vermutlich um CO₂ und eventuell organische Säuren.

Über die Isolation der 2-Keto-L-Gulonsäure aus der Fermentationsbrühe und eine mögliche nachfolgende Reinigung liegen keine Informationen vor.

(18) Eventuell ist bei der Fermentation im Sommer eine externe Kühlung erforderlich. Dies hängt auch von der Fermentergröße ab (bei kleineren Fermentern genügt die Behälteroberfläche zur Kühlung durch die Umgebungsluft). Über den Prozeßenergiebedarf für die Isolation und Aufbereitung der 2-Keto-L-Gulonsäure nach der Fermentation liegen keine Informationen vor.

(19) Ein stoffliches Risikopotential wird beim Ning-Verfahren nicht gesehen.

Vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung

(20) Bei der vergleichenden ökologischen Wirkungsabschätzung sind nur jene Verfahrensschritte zu vergleichen, die durch das Ning-Verfahren gegenüber der Reichstein-Synthese ersetzt werden. Für das biotechnische Verfahren zur Umsetzung von L-Sorbose zu 2-Keto-L-Gulonsäure ergibt sich im Vergleich zu den drei chemisch-technischen Schritten des Reichstein-Verfahrens aus dem oben Gesagten folgende Einschätzung (vgl. Tabelle 6):⁶⁷

- **Humantoxizität:** Es kann von einem mittleren Entlastungspotential ausgegangen werden (+), das aus der Reduktion des Umgangs mit organischen Lösungsmitteln (und damit diffuser Emissionen) resultiert. Es fallen möglicherweise weniger Aufbereitungs-

⁶⁷

Legende Im Vergleich zum chemisch-technischen Verfahren ergeben sich für den biotechnischen Prozeß Umweltentlastungen (+), Umweltbelastungen (–) oder keine Auswirkungen (0)

und Destillationsrückstände (in nicht näher bekannter Menge und Zusammensetzung) als zu entsorgende Abfälle an.

- **Ökotoxizität:** Es kann ein geringes Entlastungspotential aufgrund der Reduktion des Umgangs mit organischen Lösungsmitteln (und damit diffuser Emissionen) erwartet werden (0/+).
- **Aquatische und terrestrische Eutrophierung:** Neutral (0)
- **Naturraumbeanspruchung:** Neutral (0)
- **Photochemische Oxidantienbildung** (Beitrag zum Sommersmog): Aufgrund möglicher diffuser Emissionen von Ozon-Vorläufersubstanzen (Lösungsmitteln) im Zuge der Handhabung und Rückgewinnung der Lösungsmittel wird ein geringfügiges Entlastungspotential gesehen, da das Ning-Verfahren Schritte ersetzt, die Toluol bzw. Trichlormethan involvieren (0/+).
- **Abbau stratosphärischen Ozons:** Neutral (0)
- **Treibhauswirkung:** Es kann trotz der beim Ning-Verfahren erforderlichen Produktisolation aus der Fermentationsbrühe von einer Reduktion des Prozeßenergiebedarfs ausgegangen werden (Reichstein-Synthese: Destillation zur Abtrennung von Aceton, Rückgewinnung des Lösungsmittels aus dem Oxidationsschritt) (+).
- **Versauerung:** Neutral (0)
- **Verbrauch fossiler Rohstoffe:** Einsparung von fossilen Rohstoffen, die für die Erzeugung der Prozeßenergie verwendet werden (+).

Es sei nochmals ausdrücklich festgehalten, daß sich diese Wirkungsabschätzung auf die Herstellung von Ketogulonsäure aus Sorbose bezieht. Durch Ersetzung weiterer chemisch-technischer Schritte des Reichstein-Verfahrens durch biotechnische Stufen (z.B. fermentative Herstellung von 2-Keto-L-Gulonsäure aus D-Glucose) könnten möglicherweise zusätzliche Umweltentlastungen resultieren.

Ökonomische Aspekte

(21) Die vielstufige und komplexe Reichstein-Synthese ist – auch aufgrund des Aufwands zur Vermeidung von Emissionen – ein kostenintensives Verfahren. Daher suchen die Hersteller seit langem nach alternativen Wegen zur Herstellung von Vitamin C.

Die Produktion von Vitamin C ist in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen (von 35.000 t im Jahr 1984 auf heute über 60.000 t). Für die Zukunft wird mit jährlichen Wachstumsraten von 3% gerechnet.

Der Markt ist gegenwärtig von Überkapazitäten geprägt: Weltweit stehen Produktionskapazitäten für etwa 100.000 t Vitamin C zur Verfügung.

Damit sanken die Preise für Vitamin C auf nunmehr unter 10 US\$ pro Kilogramm. Es ist fraglich, ob das derzeitige Preisniveau die Produktionskosten nach dem Reichstein-Verfahren in allen Fällen deckt.

(22) Gleichzeitig sind rege Aktivitäten der maßgeblichen Akteure im Vitamin C-Sektor zur Entwicklung und Anwendung von biotechnischen Verfahren, die weitere chemisch-technische Schritte des Reichstein-Verfahrens ersetzen können. Hintergrund sind die erwarteten Kostenvorteile solcher Prozesse im hart umkämpften Markt für Vitamin C.

- In Krefeld wird derzeit von der KGS eine Anlage zur Herstellung von Ketogulonsäure aus Sorbit errichtet. Die Investitionskosten am Standort von Cerestar betragen 50 Millionen DM, es werden in der Produktion etwa 20 Arbeitsplätze geschaffen (N.N. 1998b). Über die Kapazität der Anlage liegen keine Informationen vor. Die Anlage ersetzt offenbar bestehende chemisch-technische Kapazitäten.
- Ein Konsortium aus Eastman Chemical Company (Kingsport/Tennessee, USA), Genencor International Inc. (Rochester/New York), MicroGenomics Inc., Electro-synthesis Company Inc. und dem staatlichen Argonne National Laboratory hat mit öffentlichen Fördermitteln ein mikrobielles Verfahren entwickelt, das mit Hilfe eines einzigen Produktionsstammes Vitamin C aus Glucose liefern soll.⁶⁸ Dieses Verfahren soll eine Senkung der Produktionskosten für Vitamin C gegenüber dem Reichstein-Verfahren um 50% ermöglichen. Die Industriepartner wollen das Verfahren nun gemeinsam vermarkten.
- Archer Daniels Midland (ADM) hat in Decatur (USA) eine Anlage zur Herstellung von Vitamin C errichtet, die nach den vorliegenden Informationen mit – gegenüber der Reichstein-Synthese – weitergehenden biotechnischen Schritten arbeiten soll. Die Anlage ist offenbar derzeit nicht in Betrieb. Nicht bekannt ist, ob dies aus technischen Problemen oder dem niedrigen Preisniveau für Vitamin C resultiert.

(23) Angesichts der bestehenden Überkapazitäten führt der Einsatz weitergehender biotechnischer Schritte bei der Herstellung von Vitamin C voraussichtlich zur Substitution entsprechender chemisch-technischer Kapazitäten. Da – zumindest bei den derzeit in Diskussion befindlichen Ansätzen – einzelne Schritte der Reichstein-Synthese weiterhin bestehen bleiben, werden die biotechnischen Anlagen vermutlich an den bisherigen Standorten realisiert und die bestehende Infrastruktur teilweise genutzt.

⁶⁸

Vermutlich handelt es sich nicht um Vitamin C, sondern um die Vorstufe Ketogulonsäure

Rechtliche Aspekte

(24) Ein wesentlicher Unterschied zu den bisher betrachteten Fallbeispielen ergibt sich im Fall von Vitamin C durch die pharmazeutische Verwendung des Produkts: Biotechnische Anlagen zur fabrikmäßigen Herstellung von Arzneimitteln oder Arzneimittelzwischenprodukten bedürfen gemäß Nr. 4.3 Spalte 2 des Anhangs zur Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung nach dem vereinfachten Genehmigungsverfahren (§ 19 BImSchG).

Im Fall der ausschließlichen Verwendung des Produkts für nicht-pharmazeutische Zwecke wäre keine immissionsschutzrechtliche Genehmigung für eine Vitamin C-Produktionsanlage erforderlich. Es erscheint jedoch unrealistisch, daß ein Hersteller sich von vornherein hinsichtlich der Verwendung des Produkts festlegt. Vielmehr dürfte in jedem Fall angestrebt werden, das erzeugte Vitamin C auch als Arzneimittel bzw. -zwischenprodukt vermarkten zu dürfen. Somit ist eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung mit Umweltverträglichkeitsprüfung in jedem Fall erforderlich. Die gleiche Argumentation trifft auch auf Anlagen zu, die Vitamin C nach dem Reichstein-Verfahren erzeugen. Insofern besteht bezüglich des Erfordernisses von immissionsschutzrechtlichen Genehmigungen kein Unterschied zwischen dem Reichstein-Verfahren und dem Ning-Verfahren.

(25) Beim hier betrachteten Ning-Verfahren zur Herstellung von Vitamin C erfolgt die Umwandlung von L-Sorbose in 2-Keto-L-Gulonsäure fermentativ unter Verwendung einer Mischkultur aus *Gluconobacter oxydans* und *Bacillus megaterium*. Die übrigen Schritte sind identisch mit dem Reichstein-Verfahren.

Prinzipiell sind für eine Untersuchung rechtlicher Aspekte im Zusammenhang mit der großtechnischen Produktion von Vitamin C nach dem Ning-Verfahren (für den Schritt der fermentativen Gewinnung von 2-Keto-L-Gulonsäure aus L-Sorbose) folgende Aspekte zu prüfen:

- a) Bestimmungsgemäßer Betrieb
 - ☐ Möglicherweise Emissionen von organischen Säuren in die Luft
 - ☐ Möglicherweise organische Säuren im Abwasser der Anlage
 - ☐ Schutz der Beschäftigten gegen mögliche Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe.

Ob tatsächlich Wasserstoff und organischer Säuren als Nebenprodukte anfallen, ist unklar (siehe oben).

Der Frischwasserverbrauch für den hier zu betrachtenden biotechnischen Schritt dürfte gering sein. Die Fermentationsbrühe aus dem vorangegangenen Fermentationsschritt (Gewinnung von L-Sorbose) kann nach Abtrennung der Biomasse vermutlich direkt eingesetzt werden.

Über den möglichen Anfall einer Schlempe liegen keine näheren Informationen vor. Es wird davon ausgegangen, daß die eventuell anfallende Schlempe einer betriebs-eigenen Abwasserbehandlungsanlage zugeführt wird.⁶⁹ In diesem Fall fallen keine produktionsspezifischen Abfälle zur Beseitigung im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes an.

b) Nicht-bestimmungsgemäßer Betrieb

- ☐ Schutz der Beschäftigten und der Anlagenumgebung vor möglichen Risiken durch ungewollte Freisetzung lebender Mikroorganismen
- ☐ Möglicherweise Explosionsgefahr durch Wasserstoff (hochentzündlich).

(26) Der hier zu betrachtende Prozeßschritt vollzieht sich im wässrigen Medium. Das Fermentationsprodukt 2-Keto-L-Gulonsäure zyklisiert vermutlich ohne zwischenzeitliche Produkt-isolation und -aufbereitung zu Vitamin C.

Hinsichtlich des möglichen Anfalls organischer Säuren als Nebenprodukte gilt das in den Kapiteln 4.1 und 4.2 Gesagte entsprechend: Sofern Essigsäure als Nebenprodukt entsteht, fällt sie verdünnt an. Eventuelle Emissionen in die Luft dürfen nicht zu einer Überschreitung des MAK-Wert von 25 mg/m³ innerhalb der Anlage führen. Da die Essigsäure allenfalls in verdünnter Form gehandhabt und nicht aufbereitet wird, kann die Einhaltung des MAK-Werts als unproblematisch angesehen werden.

(27) Die als Nebenprodukt möglicherweise anfallende Essigsäure stellt wegen der geringen zu erwartenden Konzentration keine Wassergefährdung dar. Organische Säuren sind vor Einleitung in die Abwasseraufbereitungsanlage ggf. zu neutralisieren. In jedem Fall sind die wasserrechtlichen Bestimmungen, denen eine betriebseigene Kläranlage unterliegt, einzuhalten. Damit ist ein sachgerechter und angemessener Schutz der Gewässer gewährleistet.

(28) Die eingesetzten Mikroorganismen (*Gluconobacter oxydans* und *Bacillus megaterium*) sind nicht gentechnisch verändert. Der Betreiber einer Anlage nach dem Ning-Verfahren hat eine Gefährdungsbeurteilung gemäß § 6 BioStoffV durchzuführen. Die Autoren dieses Berichts gehen davon aus, daß die Einhaltung der Unfallverhütungsvorschrift der Berufsgenossenschaft (BG Chemie 1997) und der Schutzmaßnahmen entsprechend der Gefährdungseinstufung gemäß der BioStoffV einen angemessenen Schutz der Beschäftigten gewährleisten.

⁶⁹

Eine Anlage zur Herstellung von Vitamin C dürfte an einem Standort mit betriebseigener Abwasserbehandlungs-anlage errichtet werden.

(29) Sofern bei der Fermentation Wasserstoff in relevanter Menge entsteht, sind entsprechende technische Maßnahmen bezüglich Explosionsschutz erforderlich. Die untere Zündgrenze für Wasserstoff (4 Vol.-%) muß in jedem Fall sicher unterschritten werden.

Perspektiven

(30) Es ist seit längerem eine rege Aktivität zur Verbesserung der Reichstein-Synthese zu beobachten. Diese äußert sich in der unübersichtlichen Fülle der Literatur über Verfahrensentwicklungen im Labormaßstab und Patente sowie in den ansatzweise bekanntwerdenden Aktivitäten der Hersteller. Es ist zu vermuten, daß bei den Herstellern weitere, geheime Aktivitäten im Gang sind.

Es wird in der Fachwelt davon ausgegangen, daß sich in der Vitamin C-Herstellung biotechnische Teilschritte zukünftig weiter durchsetzen werden. Welche Verfahren dies im einzelnen sein werden läßt sich derzeit schwer absehen und dürfte außer von der Effizienz der Verfahren auch entscheidend von der Patentsituation abhängen. In jedem Fall werden vom weitergehenden Einsatz biotechnischer Verfahren kostenseitige Vorteile erwartet, die angesichts des hart umkämpften Marktes und des niedrigen Preisniveaus für die Hersteller sehr bedeutsam sind.

(31) Allerdings gibt es unterschiedliche Einschätzungen hinsichtlich der Anwendungsreife weitergehender biotechnischer Verfahren. Derzeit modernisiert Hoffmann-La Roche, der Weltmarktführer für Vitamin C, seine nach dem Reichstein-Verfahren arbeitende Anlage in Dalry (Schottland) mit einem Aufwand von 200 Millionen US\$. Es erfolgt dabei **keine** Verfahrensumstellung. Genauer ist nicht bekannt (McCoy 1998a).

(32) Bislang wird das Eingangsprodukt Glucose in der Regel durch Säurehydrolyse von Stärke gewonnen. Dieser Schritt ist auch biotechnisch möglich. Möglicherweise stehen dem Einsatz des enzymatischen Verfahrens die hohen Reinheitsanforderungen des Reichstein-Verfahrens entgegen. Statt durch Hydrierung von Glucose kann Sorbit auch biotechnisch hergestellt werden (siehe Kennblatt Sorbit in Anhang 1).

Für die Umwandlung von Sorbose in Ketogulonsäure stehen verschiedene, grundsätzlich biotechnisch erschließbare Pfade offen. Eine unmittelbar zu Vitamin C führende biotechnische Route erscheint aufgrund der Instabilität von Vitamin C in wäßriger Lösung bei Anwesenheit von Sauerstoff schwierig. Allerdings ist der letzte (chemisch-technische) Schritt der Reichstein-Synthese – die Ringschließung von Ketogulonsäure im leicht sauren Milieu – auch als unproblematisch anzusehen.

Schlußfolgerungen in Bezug auf Vitamin C

(33) Das Interesse der Industrie an biotechnischen Verfahren, die chemisch-technische Teilschritte der Reichstein-Synthese ersetzen, ist aus wirtschaftlichen Gründen groß. Dies zeigt sich in den zahlreichen Aktivitäten der Hersteller.

Der Entwicklungsstand der biotechnischen Verfahren ist sehr unterschiedlich. Über die hier betrachteten Schritte zur Herstellung von Ketogulonsäure aus Sorbose sind weitere bislang chemisch-technisch durchgeführte Schritte der Vitamin C-Synthese grundsätzlich biotechnisch durchführbar.

Es ist zu erwarten, daß sich solche erweiterten biotechnischen Verfahren **mittelfristig durchsetzen** werden. Die kurzfristigen Einschätzungen der Anwendungsreife der Verfahren gehen auseinander, wie das unterschiedliche Verhalten der Hersteller zeigt.

(34) Mit dem (über den in der klassischen Reichstein-Synthese benutzten fermentativen Schritt hinausgehenden) Einsatz biotechnischer Schritte bei der Herstellung von Vitamin C sind **Umweltentlastungen** durch die Reduktion des Umgangs mit organischen Lösungsmitteln, Verringerung der Abfallmengen sowie niedrigeren Prozeßenergiebedarf (und damit Schonung fossiler Rohstoffe und reduzierte CO₂-Emissionen) zu erwarten.

(35) Hinsichtlich rechtlicher Aspekte besteht kein erkennbarer Unterschied zwischen der Reichstein-Synthese und dem Ning-Verfahren. Der Schutz der Umwelt ist bei der Produktion von Vitamin C durch die in Deutschland bestehenden Regelungen in angemessener Weise gewährleistet.

(36) Insgesamt ist ein Vergleich der Reichsteinsynthese mit weiteren biotechnische Schritte umfassenden Alternativverfahren zur Herstellung von Vitamin C sehr schwierig: Es gibt eine Fülle von Publikationen über Verfahrensentwicklungen im Labormaßstab, die jedoch zumeist keine Detailinformationen beinhalten. Ferner wird der Stand der tatsächlichen Anwendung der Verfahren nicht veröffentlicht. Hierfür sind Geheimhaltungsgründe der Unternehmen im hart umkämpften Markt für Vitamin C maßgeblich.

4.4 Fallbeispiel 4: Adipinsäure

Einführung

(1) Adipinsäure ist die bedeutendste technisch hergestellte aliphatische Dicarbonsäure. Sie wird überwiegend zu Polymeren, insbesondere Nylon-6,6 weiterverarbeitet. Daneben dient sie der Herstellung von Weichmachern, Farbstoffen, Pharmaka, Insektiziden u.a. (vgl. BUA 1992).

In Deutschland wurden im Jahr 1998 rund 350 kt Adipinsäure hergestellt, die weltweite Produktionsmenge lag bei etwa 2 Mio. t/a.

(2) Die bei weitem wichtigste chemisch-technische Syntheseroute für Adipinsäure geht von Benzol aus. Durch Hydrierung wird zunächst Cyclohexan hergestellt. Cyclohexan wird anschließend zu einem Gemisch von 93% Cyclohexanol und 7% Cyclohexanon oxidiert ("Keto-Alkohol-Öl", kurz KA-Öl). Mittels Salpetersäure wird das KA-Öl schließlich zu Adipinsäure umgesetzt. Ein weniger bedeutendes chemisch-technisches Herstellungsverfahren für Adipinsäure ist die katalytische Spaltung von Cyclohexan.

Biotechnisch kann Adipinsäure durch Fermentation von Paraffinen hergestellt werden. Dieses bereits in den 80er Jahren entwickelte Verfahren wurde später offenbar nicht weiterverfolgt. Ferner kann Adipinsäure durch Fermentation mit Mutanten von *Brevibacterium sp.* aus 1,4-Dicyanobutan (Adiponitril) biotechnisch gewonnen werden.

Der nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts interessanteste Ansatz zur biotechnischen Herstellung von Adipinsäure wurde an der Purdue Universität (West Lafayette/Indiana, USA) entwickelt. Dieses Verfahren basiert auf der fermentativen Umsetzung von Glucose zu Muconsäure mit rekombinanten Bakterien. Die Muconsäure kann unmittelbar in der Fermentationsbrühe chemisch-technisch zu Adipinsäure hydriert werden. Dieses Verfahren wird im folgenden näher betrachtet.

Chemisch-technische Herstellung⁷⁰

(3) Die chemisch-technische Herstellung von Adipinsäure aus Benzol erfolgt in drei Stufen (Abbildung 8): Zunächst wird Benzol mit Wasserstoff bei 200 bis 300 bar und 210°C zu Cyclohexan hydriert. Als Katalysator dienen dabei Metalle wie Nickel, Platin oder Paladium. Kohlenmonoxid und Schwefel deaktivieren den Katalysator. Da beide Stoffe in dem aus

⁷⁰

Siehe Kirk-Othmer und Römpf.

fossilen Rohstoffen erzeugten Wasserstoff enthalten sein können, muß das Gas vor der Reaktion gereinigt werden.

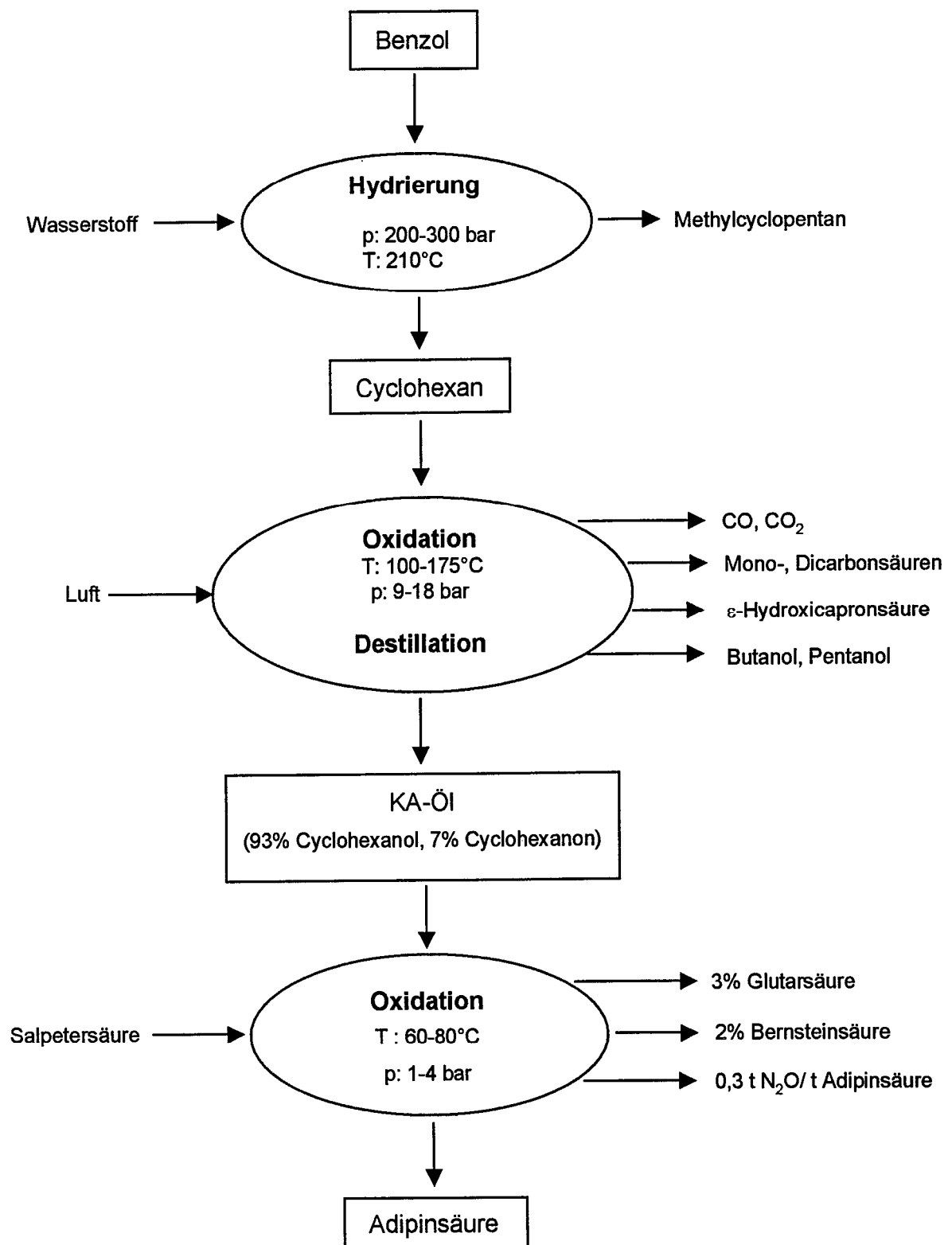
Die Hydrierung ist exotherm (-216 kJ/mol). Die Reaktionswärme muß abgeführt werden, weil sich das Gleichgewicht bei einer Temperatur über 300°C auf die Eduktseite verschiebt. Als Nebenprodukt entstehen ca. 200 mg/kg Methylcyclopentan. Das Produkt enthält bis zu 500 mg/kg Benzol.

(4) Im nächsten Schritt wird Cyclohexan zu KA-Öl (einer Mischung aus 93% Cyclohexanol und 7% Cyclohexanon) oxidiert. Hierfür gibt es je nach eingesetztem Katalysator verschiedene Verfahren. Die Reaktionstemperaturen liegen zwischen 100 und 175°C, der Druck beträgt zwischen 9 und 18 bar. Oxidationsmittel ist Luftsauerstoff. Als Nebenprodukte entstehen Kohlenmonoxid und CO₂, C₁-C₆-Mono- und Dicarbonsäuren, ε-Hydroxycapronsäure, Butanol, Pentanol sowie verschiedene Lactone und Diole. Die Reinigung erfolgt durch Waschen und anschließende Destillation. Im Destillationsrückstand befinden sich neben den nicht flüchtigen Nebenprodukten Bestandteile des Katalysators. Der verbrauchte Luftstrom muß von nicht umgesetztem Cyclohexan gereinigt werden. Er enthält ferner Kohlenmonoxid, CO₂, sowie flüchtige Kohlenwasserstoffe, insbesondere Propan, Butan und Pentan.

(5) Das KA-Öl wird mit 45 bis 60%er Salpetersäure, die 0,1 bis 0,5% Kupfer und 0,02 bis 0,1% Vanadium als Katalysator enthält, bei 60 bis 80°C und 1 bis 4 bar zur Reaktion gebracht. Zur Steuerung der Reaktion wird mit hohem Salpetersäureüberschuß gearbeitet. Die Reaktion ist exotherm (-6.280 kJ/kg). Als Nebenprodukte entstehen verschiedene Stickstoffoxide, CO₂, Glutar- und Bernsteinsäure. Die Stickstoffoxide (außer Distickstoffoxid) werden mit einem Luftstrom aus der Produktmischung entfernt, ggf. zu Stickstoffdioxid oxidiert, in Wasser absorbiert und als Salpetersäure wieder dem Reaktor zugeführt.

Das klimarelevante und am stratosphärischen Ozonabbau beteiligte Distickstoffoxid (Lachgas) entsteht in großen Mengen (0,3 t Lachgas pro t Adipinsäure) und wurde früher vollständig in die Atmosphäre emittiert. Durch "Thermisch-Reduktive Lachgaszersetzung" bei Temperaturen oberhalb 1.000°C kann das Lachgas nahezu vollständig eliminiert werden. Als Verbrennungsprodukte entstehen dabei Stickstoff, Wasser und CO₂. Eine entsprechende Anlage wurde bei der Bayer AG 1993 in Betrieb genommen. Inwieweit andere Adipinsäurehersteller inzwischen die Lachgasemissionen reduziert haben ist nicht bekannt.

Durch Vakuumdestillation wird das Wasser aus dem Produkt entfernt. Dieses Abwasser enthält Spuren von Salpetersäure und organischen Verbindungen. Die Adipinsäure wird durch Kristallisation isoliert und – abhängig von der Verwendung – unterschiedlich stark gereinigt. Aus dem Filtrat wird der Katalysator in der Regel durch Ionenaustausch zurückgewonnen. Den Hauptbestandteil des Filtrats bilden danach die kürzerkettigen Dicarbonsäuren. Diese werden zum Teil abgetrennt und verwertet. Die Ausbeute an Adipinsäure beträgt insgesamt mehr als 90% (bezogen auf Benzol).

**Abb. 8:** Chemisch-technische Herstellung von Adipinsäure

Biotechnisches Verfahren

(6) Das an der Purdue Universität in West Lafayette/Indiana (zunächst in Kooperation mit Genencor International, Rochester/New York) entwickelte biotechnische Verfahren beruht auf der Erschließung eines in der Natur nicht vorkommenden Stoffwechselweges, der Synthese von *cis,cis*-Muconsäure aus D-Glucose (Drahts 1994). Als Zwischenstufe wird 3-Dehydro-Shikiminsäure gebildet. Der Prozeß beruht auf der Übertragung zweier Gene aus *Klebsiella pneumoniae* (für die Hydratase und Decarboxylase) und eines Gens aus *Acinetobacter coacetivus* (Oxygenase) auf die *E. coli*-Mutante AB2834, die keine Shikimat-Dehydrogenase besitzt.

Die Ausbeute beträgt ca. 30%. Die Muconsäure kann direkt in der Fermentationsbrühe (also ohne vorherige Isolation und Aufbereitung) unter Verwendung eines heterogenen Platin-Katalysators bei Zimmertemperatur zu Adipinsäure hydriert werden.

Die grundsätzliche Machbarkeit des Prozesses wurde im Labormaßstab nachgewiesen. Gegenwärtig wird das Verfahren als Fed-batch-Prozeß an der Purdue Universität weiterentwickelt. Genauere Angaben zum Prozeß (insbesondere bezüglich Umsatzrate, Nebenprodukte und Reststoffe) sind noch nicht publiziert. Es ist möglich, daß unabhängig von den Arbeiten an der Purdue Universität auch bei Genencor International eine Weiterentwicklung erfolgt.

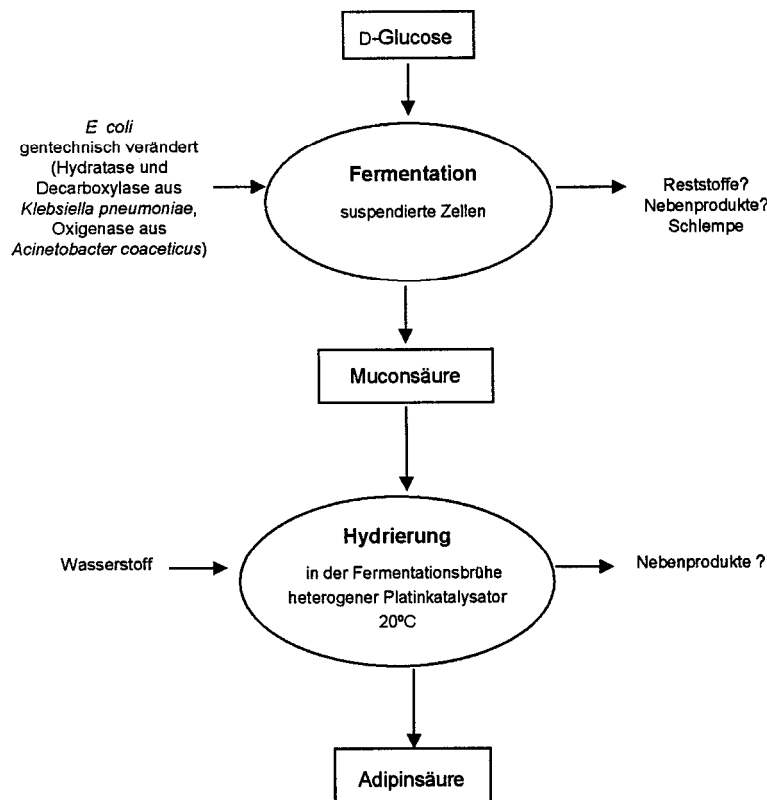


Abb. 9: Biotechnische Herstellung von Adipinsäure (Purdue Universität)

Ökologische Aspekte

a) Chemisch-technische Herstellung

(7) Es liegen keine Angaben hinsichtlich der mit der Adipinsäureproduktion verbundenen Benzolemissionen vor. Pro Tonne Adipinsäure entstehen 0,3 Tonnen klimarelevantes und ozonschichtschädigendes Lachgas. Etwa 10% der weltweiten Stickoxidemissionen sind Lachgas aus der Adipinsäureproduktion. Die atmosphärischen Emissionen von Adipinsäure in Zuge der Herstellung betragen etwa 30 g pro produzierter Tonne. Das Lachgas kann durch entsprechende Abgasbehandlung nahezu vollständig eliminiert werden.⁷¹

Das Waschwasser aus der Oxidation des Cyclohexans enthält C₁-C₆-Mono- und Dicarbonsäuren, ϵ -Hydroxycapronsäure, Butanol, Pentanol und verschiedene Lactone und Diöle und wird verbrannt.

Das Abwasser aus der Oxidation von KA-Öl enthält in Spuren Salpetersäure, die neutralisiert wird. Ferner sind Adipinsäure (etwa 10g pro produzierter Tonne) und andere organische Stoffe enthalten. Die Adipinsäure wird in der biologischen Abwasserreinigung zu über 90% eliminiert. Über den Eliminationsgrad der übrigen Kohlenwasserstoffe in der Abwasserbehandlungsanlage liegen keine Informationen vor.

Glutar- und Bernsteinsäure, die bei der Oxidation des KA-Öls entstehen, können isoliert und genutzt werden. Inwieweit dies tatsächlich erfolgt ist nicht bekannt.

Feste Abfälle werden verbrannt.

(8) Benzol wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Über den kumulativen Prozeßenergieverbrauch der chemisch-technischen Herstellung von Adipinsäure liegen in der Literatur keine Angaben vor.

Der Energiebedarf der thermisch-reduktiven Lachgaszersetzung hängt von der Verfügbarkeit der Anlage ab. Ein energieneutraler Einsatz wird durch Nutzung der freiwerdenden Energie zur Erzeugung von Prozeßdampf erreicht.

(9) Das Risikopotential bei der chemisch-technischen Herstellung von Adipinsäure ist wesentlich durch den Umgang mit Benzol und Cyclohexanon geprägt. Benzol ist krebserzeugend (Kategorie 1) und giftig, sowie stark wassergefährdend (WGK 3). Cyclohexanon ist möglicherweise krebserzeugend (Kategorie 3) und schwach wassergefährdend (WGK 1).

⁷¹

Die Emissionen von Lachgas sind nicht gesetzlich limitiert.

Salpetersäure, Cyclohexan und cyclohexanol sind schwach wassergefährdend (WGK 1). Cyclohexan ist ferner leichtentzündlich. Lachgas (Stickstoffdioxid) ist sehr giftig beim Einatmen. Wasserstoff ist hochentzündlich.

b) Biotechnisches Verfahren

(10) Bisläng sind erst wenige Details zum biotechnischen Verfahren publiziert. Insbesondere liegen keine Angaben zu den bei der Fermentation und der Hydrierung entstehenden Nebenprodukten und Reststoffen vor. Vermutlich entsteht bei der Fermentation Wasserstoff. Die Zusammensetzung der Schlempe hängt stark davon ab, ob bei großtechnischer Umsetzung mit suspendierten oder immobilisierten Zellen gearbeitet wird.

Vorteilhaft ist in jedem Fall, daß die Muconsäure zur Hydrierung nicht aus der Fermentationsbrühe isoliert werden muß und die Hydrierung bei Raumtemperatur erfolgen kann.

(11) Das biotechnische Verfahren basiert auf eigens angebauten landwirtschaftlichen Rohstoffen (Glucose). Der für die chemisch-technische Hydrierung von Muconsäure zu Adipinsäure erforderliche Wasserstoff wird aus fossilen Rohstoffen hergestellt.

(12) Hinsichtlich der Risikopotentiale des biotechnischen Verfahrens ist festzuhalten: Der für die Hydrierung eingesetzte Wasserstoff ist hochentzündlich (möglicherweise entsteht auch bei der Fermentation Wasserstoff).

Es gibt keine offizielle Einstufung des im Labormaßstab verwendeten Produktionsstamms (Spender des übertragenen genetischen Materials sind *Klebsiella pneumoniae* und *Acinetobacter calcoaceticus*, Empfänger ist *E. coli* AB2834) gemäß der Gentechnik-Sicherheitsverordnung (GenTSV). Es ist noch nicht abzusehen, ob die für die Entwicklung des Verfahrens im Labor eingesetzten Mikroorganismen auch bei großtechnischer Umsetzung benutzt würden.

Vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung

(13) Über das biotechnische Verfahren liegen vergleichsweise wenige Informationen vor. Eine **erste Abschätzung** der Umweltwirkungen des biotechnischen Verfahrens im Vergleich zur gängigen chemisch-technischen Herstellung von Adipinsäure zeigt folgendes Bild:⁷²

⁷²

Legende: Im Vergleich zum chemisch-technischen Verfahren ergeben sich für den biotechnischen Prozeß Umweltentlastungen (+), Umweltbelastungen (–) oder keine Auswirkungen (0).

- **Humantoxizität:** Durch den Einsatz des biotechnischen Verfahrens zur Herstellung von Adipinsäure würde der Umgang mit dem leicht flüchtigen, giftigen, krebs-erzeugenden und stark wassergefährdenden Benzol vermieden. Ferner sind bei der chemisch-technischen Herstellung das möglicherweise krebserzeugende Cyclohexanon, das giftige Stickstoffdioxid sowie diverse als unerwünschte Nebenprodukte anfallende Kohlenwasserstoffe involviert. Es ist davon auszugehen, daß diese Stoffe teilweise diffus in die Luft emittiert werden. Das Entlastungspotential hinsichtlich Toxizität durch Einsatz des biotechnischen Verfahrens wird daher als sehr hoch (++) eingeschätzt.
- **Ökotoxizität:** Neutral bis leicht positiv durch die Vermeidung diffuser Emissionen von Kohlenwasserstoffen und Stickstoffdioxid (0/+).
- **Aquatische und terrestrische Eutrophierung:** Mittlere zusätzliche Belastung aus der Erzeugung der landwirtschaftlichen Rohstoffe (-).
- **Naturraumbeanspruchung:** Mittlere zusätzliche Belastung aus der Erzeugung der landwirtschaftlichen Rohstoffe (-).
- **Photochemische Oxidantienbildung** (Beitrag zum Sommersmog): Neutral (0), da keines der Verfahren mit nennenswerten Emissionen von Ozon-Vorläufersubstanzen verbunden ist (die Stickoxide werden zu Salpetersäure umgesetzt).
- **Abbau stratosphärischen Ozons:** Neutral (0), sofern Lachgas thermisch zu Stickstoff reduziert wird. Andernfalls mittlere Entlastung (+).
- **Treibhauswirkung:** Mit Lachgasreduktion (unter Nutzung der dabei anfallenden Wärme) mittleres Entlastungspotential durch Einsparung von Prozeßenergie (und damit CO₂-Emissionen) gegenüber dem chemisch-technischen Verfahren (+). Ohne Lachgasreduktion zusätzliches Entlastungspotential aufgrund der Treibhauswirkung von Lachgas (++).
- **Versauerung:** Neutral (0)
- **Verbrauch fossiler Rohstoffe:** Einsparung von fossilen Rohstoffen, die zur Erzeugung der für die chemisch-technische Herstellung erforderlichen Prozeßenergie und als Feedstock bei der chemisch-technischen Herstellung verwendet werden (++)

Ökonomische Aspekte

(14) Über die Herstellungskosten von Adipinsäure nach dem chemisch-technischen Verfahren und den aktuellen Marktpreis von Adipinsäure liegen den Autoren dieser Untersuchung keine Informationen vor.

Die voraussichtlichen Kosten der biotechnischen Herstellung sind bislang noch nicht ermittelt worden. Seitens der Purdue Universität ist eine erste Kostenanalyse nach Erreichen eines fortgeschritteneren Entwicklungsstadiums vorgesehen. Die Substratkosten für die Herstellung

aus Glucose betrügen bei einer Ausbeute von 30% und einem Weltmarktpreis von 0,50 DM pro kg Glucose knapp 1,70 DM pro kg Adipinsäure.

Insgesamt erscheinen weitergehende ökonomische Betrachtungen (z.B. hinsichtlich des zukünftigen Marktaufnahmepotentials und der Substitution bestehender chemisch-technischer Anlagen zur Herstellung von Adipinsäure) aufgrund des Entwicklungsstadiums des biotechnischen Verfahrens noch verfrüht.

Rechtliche Aspekte

(15) Das biotechnische Verfahren zur Herstellung von Adipinsäure befindet sich in einem sehr frühen Entwicklungsstadium – nämlich auf der Ebene der Grundlagenforschung. Bis zur Errichtung einer Pilotanlage und schließlich der großtechnischen Anwendungsreife sind nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts noch mindestens 10 Jahre Forschungs- und Entwicklungsarbeit erforderlich. Angesichts dessen erscheinen detaillierte Betrachtungen rechtlicher Aspekte verfrüht und nur eingeschränkt aussagekräftig, da sich im Zuge der weiteren F&E-Arbeiten erhebliche Änderungen des Prozesses ergeben können.

Dennoch sei an dieser Stelle auf folgende Aspekte hingewiesen:

- Der wesentliche Unterschied zwischen dem biotechnischen Verfahren zur Herstellung von Adipinsäure und den zuvor betrachteten Fallsbeispielen besteht in der Verwendung gentechnisch veränderter Organismen. Es ist noch nicht abzusehen, ob die für die Entwicklung des Verfahrens im Labor eingesetzten Mikroorganismen auch bei großtechnischer Umsetzung benutzt würden. Eine Einstufung des im Labormaßstab verwendeten Produktionsstamms (Spender sind *Klebsiella pneumoniae* und *Acinetobacter calcoaceticus*, Empfänger ist *E. coli* AB2834) liegt nicht vor.

In jedem Fall ist klar, daß eine Produktionsanlage dem Gentechnikrecht unterliegt. Es würde den Rahmen dieser Untersuchung überschreiten, die Angemessenheit und Praktikabilität des Gentechnikrechts für den Betrieb gentechnischer Produktionsanlagen zu beurteilen. Ferner können sich bis zur großtechnischen Anwendungsreife des biotechnischen Verfahrens zur Herstellung von Adipinsäure Novellierungen des Gentechnikrechts aufgrund zwischenzeitlich gesammelter Erfahrungen ergeben.

- Hinsichtlich anderer möglicher Umweltwirkungen (Anfall von Nebenprodukten, Frischwasserbedarf, Abwasser, Emissionen, Explosionsrisiko durch Umgang mit Wasserstoff) sei auf die Ausführungen bei den zuvor untersuchten Fallbeispielen hingewiesen. In diesen Fällen gehen die Autoren dieses Berichts von einem angemessenen Schutz der Umwelt durch die bestehenden Regelungen aus.

Perspektiven

(16) Aus ökologischer Sicht erscheint die weitere Entwicklung und Einführung eines biotechnischen Verfahrens zur Herstellung von Adipinsäure **wünschenswert**. Dies gelte auch dann, wenn die Lachgasemissionen weltweit durch entsprechende Abgasbehandlung mit Wärmerückgewinnung weitgehend reduziert würden. Der Grund für diese Einschätzung liegt in dem reduzierten Umgang mit problematischen Stoffen (insbesondere Benzol und Cyclohexanon) sowie in der möglichen Einsparung von fossilen Ressourcen.

(17) Das hier betrachtete biotechnische Verfahren befindet sich in einem sehr frühen Entwicklungsstadium (Demonstration der grundsätzlichen Machbarkeit im Labor). Bis zur großtechnischen Anwendungsreife sind noch viele Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu leisten. Daher können die Perspektiven des Verfahrens derzeit noch nicht beurteilt werden.

Die **Grundlagenforschung** sollte auf jeden Fall weitergeführt werden. Ob sich daraus tatsächlich später ein operables Verfahren zur Herstellung von Adipinsäure entwickeln kann, ist heute nicht mit Sicherheit absehbar.

(18) Die technisch mögliche Elimination des Lachgases ist aufgrund der damit verbundenen zusätzlichen Kosten in den meisten Ländern nicht zu erwarten. Daher sollte die Verbreitung der thermischen Lachgasreduktion beim chemisch-technischen Verfahren gefördert werden. Dabei ist zu beachten, daß Lachgas kein limitierter Schadstoff ist, es also bislang keine gesetzliche Handhabe zur Reduktion von Lachgas gibt. Die Bayer AG hat die thermische Lachgasreduktion freiwillig im Rahmen des Responsible Care-Programms eingeführt.

Schlußfolgerungen in Bezug auf Adipinsäure

(19) Die chemische Herstellung von Adipinsäure ist aufgrund der Emissionen, des Umgangs mit problematischen Stoffen und des Ressourcenverbrauchs als besonders umweltrelevanter Prozeß einzustufen. Aufgrund der weltweit großen Herstellungsmengen sind umweltseitige Verbesserungen besonders wünschenswert. Beim chemisch-technischen Herstellungsverfahren lassen sich die klimarelevanten und ozonschichtschädigenden Lachgasemissionen durch Abgasbehandlung reduzieren.

(20) Das in Entwicklung befindliche biotechnische Verfahren könnte zukünftig zu **deutlichen Umweltentlastungen** bei der Adipinsäureproduktion beitragen.

Das biotechnische Verfahren funktioniert grundsätzlich im Labor. Es besteht noch **erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf** für den Prozeß. Erst dann können die im Zusammenhang mit der Verfahrenstechnik stehenden Probleme angegangen werden (zunächst im Pilotmaßstab, dann Scale up).

Insgesamt ist das biotechnische Verfahren in einem sehr frühen Entwicklungsstadium und sehr weit von der großtechnischen Anwendungsreife entfernt. Daher ist eine detaillierte Beurteilung noch nicht möglich.

4.5 Schlußfolgerungen aus der Betrachtung der Fallbeispiele

(1) Im folgenden werden Schlußfolgerungen aus der Untersuchung der Fallbeispiele gezogen, die nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts über die speziellen Einzelfälle hinaus von Bedeutung sind.

(2) Das generelle Problem fermentativer Verfahren zur Herstellung von Grundchemikalien besteht in der **geringen Produktausbeute**, die eine kostenintensive und in der Regel energieaufwendige Produktisolation und -aufbereitung erforderlich macht.

(3) Die genauen **Kosten** für die biotechnische Herstellung von Chemikalien hängen stark von den Substratkosten, der tatsächlich eingesetzten Verfahrenstechnik, der Anlagengröße und dem Standort und von weiteren Parametern ab, die erst im Zuge der tatsächlichen Umsetzung **hinreichend präzisiert** werden. Sie sind demnach auf Labor- und Pilotanlagen-ebene nur unter Annahme bestimmter plausibler Rahmenbedingungen (und auch dann nur größenordnungsmäßig) abschätzbar.

Im allgemeinen liegen die Produktionskosten für eine biotechnische Herstellung von Grundchemikalien aufgrund des hohen Anteils der Substratkosten über den Kosten der chemisch-technischen Herstellung, weil die dafür benötigten petrochemischen Rohstoffe voraussichtlich auf absehbare Zeit weiterhin vergleichsweise günstig verfügbar sein werden (vgl. Schlesinger 2000).

(4) Für die **Energiebilanz** eines noch nicht großtechnisch realisierten Verfahrens gilt das in Bezug auf die Kosten Gesagte analog: Die Energiebilanz hängt stark von der Auslegung einer Anlage ab. Es ist schwierig, aus den Gegebenheiten im Labor- bzw. Pilotmaßstab auf "repräsentative" großtechnische Verhältnisse zu extrapolieren, da zahlreiche, die Energiebilanz wesentlich beeinflussende Größen (z.B. Substratherkunft, Restwärmenutzung), auf diesem Entwicklungsstand **noch nicht feststehen**.

(5) Beim Übergang vom Labor- bzw. Pilotanlagenmaßstab zum großtechnischen Maßstab (**Scale up**) können **Probleme** auftreten, die im kleinen Maßstab nicht existieren oder unbedeutend sind. Dies betrifft beispielsweise diffuse Emissionen (z.B. aus Ventilen), Sicherheitsmaßnahmen (z.B. Explosionsschutz), Schutz vor Infektion der Produktionsstämme und Verwertung bzw. Beseitigung der anfallenden Reststoffe.

(6) Die zuvor genannten Unsicherheiten bei der Schätzung von Kosten und Energiebilanz von Verfahren, die bislang erst im Labor- oder Pilotanlagenmaßstab existieren, sind nicht

spezifisch für biotechnische Verfahren, sondern gelten entsprechend für chemisch-technische Verfahren (vgl. auch Schembra 1993 und Schulze 1989). Dies trifft auch auf das mögliche Auftreten von Problemen im Zuge des Scale up zu.

(7) Die Beschaffung ausreichender Mengen von **Substrat** für die großtechnische biotechnische Herstellung von Grundchemikalien kann wegen eventuell erforderlicher Transporte über große Entfernungen aufwendig (und damit transportkostenintensiv und umweltbelastend) sein.

Für einen wirtschaftlichen Betrieb biotechnischer Anlagen ist in jedem Fall die **ganzjährige Verfügbarkeit** der Substrate erforderlich. Daher und aufgrund der Flexibilität hinsichtlich der Nutzung des jeweils billigsten Substrats ist es vorteilhaft, wenn ein Verfahren den Einsatz **verschiedener Substrate** erlaubt.

(8) Bei fermentativen Verfahren fallen oftmals große Mengen unerwünschter **Nebenprodukte und Reststoffe** an, die teilweise – abhängig vom Aufnahmepotential – als Futtermittel oder Dünger verwertet werden können. Dies setzt häufig entsprechende Behandlungsschritte (Trocknen, Autoklavieren) voraus. Das Abwasser muß vor Einleitung in einen Vorfluter i.d.R. behandelt werden.

Grundsätzlich ist festzuhalten, daß die prinzipielle biologische Abbaubarkeit der Reststoffe biotechnischer Verfahren nicht darüber hinwegtäuschen sollte, daß die **Verwertung biologischen Materials** umweltseitig (z.B. wegen seines Stickstoffgehalts) nicht immer unproblematisch ist. Ein Beispiel ist die allgemein bekannte Problematik der Verwertung von Gülle.

(9) Aus Gründen der Rohstoffbeschaffung, sowie der Reststoffverwertung bzw. -beseitigung, wird die **Größe** biotechnischer Anlagen zur Herstellung von Grundchemikalien in Deutschland voraussichtlich ca. 10.000 bis 20.000 t pro Jahr nicht übersteigen. Die entsprechenden chemisch-technischen Anlagen haben in der Regel Kapazitäten von weit über 100.000 t pro Jahr und können demnach erhebliche ökonomische Größeneffekte realisieren: Die spezifischen Anlagen- und Personalkosten der chemisch-technischen Anlagen sind daher deutlich geringer.

(10) Im Bereich der Grundchemikalien konkurrieren biotechnische Verfahren zumeist mit chemisch-technischen Synthesen auf der Basis von in absehbarer Zeit weiterhin vergleichsweise billig verfügbaren petrochemischen Rohstoffen. Aufgrund des in der Regel hohen Anteils der Substratkosten an den Gesamtkosten kann eine biotechnische Herstellung von Grundchemikalien derzeit und auf absehbare Zeit in der Regel bestenfalls dann wirtschaftlich konkurrenzfähig sein, wenn der Preis des Produkts über ca. 2 DM/kg liegt.

(11) Im Bereich der fett-, stärke- und zuckerverarbeitenden Industrie gibt es in Deutschland als Substrat für biotechnische Verfahren **nutzbare Reststoffe**, die derzeit anderweitig verwertet oder entsorgt werden. Die Verwertung ist dabei nicht immer wirtschaftlich, wie das Beispiel von Glycerin aus der Fettspaltung zeigt.

Solche organischen Reststoffe aus industriellen Prozessen könnten zukünftig eine günstige Substratquelle für geeignete biotechnische Verfahren sein.

Biotechnische Verfahren zur Herstellung von Grundchemikalien könnten sich zukünftig insbesondere dort etablieren, wo geeignete Substrate als ansonsten anderweitig zu verwertende bzw. entsorgende Reststoffe anfallen. Dies verbessert die Umweltbilanz und kann zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens beitragen. Das tatsächliche Potential an solchen Reststoffen und die derzeitige Verwendung sind nicht näher bekannt.⁷³

(12) Es besteht nach Einschätzung der Autoren weiterhin ein Potential zur **Optimierung der chemisch-technischen Verfahren** (vgl. OECD 1998a). Durch umweltverträglichere Gestaltung der chemisch-technischen Prozesse können sich bestehende umweltseitige Vorteile biotechnischer Alternativverfahren reduzieren. Die möglichen Beiträge von Optimierungen chemisch-technischer Verfahren zur Ressourcenschonung scheinen aufgrund des bereits erreichten Stands eher gering.

(13) Die Produktisolation und -aufbereitung erfolgt bei biotechnischen Verfahren in der Regel mit "klassischen" (physikalisch-chemischen) Methoden und führt zu Produkten mit gut **definierten Eigenschaften**, die qualitativ mit den chemischen synthetisierten Stoffen vergleichbar sind.

(14) Die chemische Industrie ist dann bereit zur Finanzierung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, wenn die Erwartung besteht, daß ein biotechnisches Verfahren einen Stoff **innerhalb weniger Jahre** deutlich (mindestens ca. 10 bis 20%) billiger liefern könnte als die chemisch-technische Variante.

(15) Ist ein biotechnisches Verfahren großtechnisch anwendungsreif und läßt nennenswerte Kostenvorteile erwarten, so erfolgt eine **Substitution** des chemisch-technischen Verfahrens. Dies bezieht sich insbesondere auf Feinchemikalien und gilt nicht nur bei Entscheidungen über das Verfahren für neu zu errichtende Kapazitäten. Unter Umständen werden sogar bestehende chemisch-technische Anlagen ersetzt.

⁷³

Der Umweltforschungsplan 2000 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit enthält ein Forschungsvorhaben zur "Biotechnologischen Herstellung von Wertstoffen [...] aus Reststoffen."

(16) Es ist aus der Betrachtung der Fallbeispiele nicht erkennbar, daß in Deutschland juristische Gründe der Anwendung biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Chemikalien entgegenstehen. Dies gilt nach Einschätzung von Experten auch für gentechnische Anlagen.⁷⁴ Die vorhandenen Regelungen bieten – soweit dies anhand der hier untersuchten Fallbeispiele beurteilbar ist – ausreichend Vorsorge bzw. Schutz vor den mit biotechnischen Verfahren zur Herstellung von Chemikalien verbundenen potentiellen Umweltwirkungen (einschl. Arbeitsschutz). Solange die biotechnische Herstellung von Grund- und Feinchemikalien in Deutschland nur vereinzelt erfolgt (vgl. Kapitel 2), erübrigt sich die Frage, ob eine Bündelung und Systematisierung der bestehenden Regelungen erforderlich und sinnvoll ist.

Die EU-Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie) findet ihrem derzeitigen Wortlaut nach keine Anwendung auf biotechnische Anlagen zur Herstellung von Chemikalien. Angesichts der (bislang) geringen Verbreitung biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien in Deutschland erscheint eine Einbeziehung biotechnischer Anlagen bei der Umsetzung der IVU-Richtlinie in nationales Recht auf absehbare Zeit sachlich nicht unbedingt erforderlich.

(17) In dieser Untersuchung werden chemische Synthesen mit biotechnischen Verfahren, die zu den gleichen Stoffen führen, verglichen (Vergleich "A mit A"). Es ist jedoch darüber hinaus ein Potential zur Substitution von chemisch hergestellten Stoffen durch hinsichtlich ihres **Nutzens** vergleichbaren, biotechnisch hergestellten Produkte zu vermuten (Vergleich "A mit B").

(18) Biotechnische Verfahren zur Herstellung von Grundchemikalien könnten in **Entwicklungs- und Schwellenländern**, die über geeignete heimische Substratquellen verfügen, zur Deckung des Eigenbedarfs eingesetzt werden und so zur Reduktion der Importabhängigkeit bzw. zur Schonung der Devisenreserven beitragen. Angesichts des auf absehbare Zeit niedrigen Preisniveaus von Grundchemikalien auf dem Weltmarkt dürfte die Produktion für Exportzwecke in den meisten Fällen unattraktiv sein.

Dabei ist zu beachten, daß in Entwicklungsländern beim Einsatz landwirtschaftlicher Produkte für die biotechnische Erzeugung von Grundchemikalien aufgrund der begrenzten Anbauflächen und des zu erwartenden Zuwachses der Bevölkerung langfristig eine Konkurrenz zur Nahrungsmittelgewinnung entstehen könnte. Dies würde angesichts beschränkter Flächenverfügbarkeit die für den Anbau nachwachsender Rohstoffe nutzbaren Flächen einschränken, da die Nahrungsmittelproduktion nicht zugunsten des Anbaus nachwachsender Rohstoffe reduziert werden kann. Allerdings stehen in Entwicklungs- und Schwellenländern

74

Diese Feststellung wurde auf dem im Rahmen dieses Projekts am 8.7.1999 beim Umweltbundesamt in Berlin durchgeführten Workshop bestätigt.

häufig geeignete Reststoffe (z.B. aus der Zucker- oder Palmölverarbeitung) zur Verfügung, die als Substrate verwendet werden könnten.

Die erforderliche Wissensstruktur für Fermentationsverfahren kann in vielen Schwellen- und Entwicklungsländern als grundsätzlich gegeben angesehen werden.

5. Voraussetzungen für den Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien

Gegenwärtige Situation

(1) Für die großtechnische Herstellung von Stoffen aus dem Untersuchungsbereich (Grund- und Feinchemikalien, ohne Life science) kommen derzeit nur vereinzelt biotechnische Verfahren zum Einsatz (siehe Kapitel 2). Dies sind ausschließlich Fälle, in denen das biotechnische Verfahren kostenseitig oder aus Marketinggründen⁷⁵ Vorteile gegenüber der chemisch-technischen Variante bietet. Umweltgesichtspunkte spielten bislang bei der Entscheidung zugunsten der biotechnischen Alternative bestenfalls indirekt (über die Reduktion der Kosten für Umweltschutzmaßnahmen) eine Rolle. Gleichzeitig werden häufig umweltseitige Vorteile biotechnischer Verfahren gegenüber chemisch-technischen Verfahren betont.

(2) Es stellt sich die Frage, warum bei der Herstellung der hier untersuchten Stoffe – im Unterschied insbesondere zu Pharmazeutika – biotechnische Verfahren bislang selten genutzt werden.

Zur näheren Betrachtung der Voraussetzungen für einen weitergehenden Einsatz biotechnischer Verfahren ist **zwischen Fein- und Grundchemikalien zu unterscheiden**, da die Voraussetzungen und Hemmnisse für diese Gruppen stark unterschiedlich sind. Dies liegt letztlich in der normalerweise komplexeren chemischen Struktur von Feinchemikalien begründet, welche in der Regel vielstufige chemisch-technische Verfahren erfordert. Daraus resultiert ein höherer technischer Aufwand, der entsprechende Kosten nach sich zieht. Fein- und Grundchemikalien lassen sich aus diesem Grund auch über den Produktpreis abgrenzen, der bei Feinchemikalien über ca. 2 bis 5 DM pro Kilogramm liegt (Grundchemikalien: häufig unter 1 DM/kg). Dies geht zumeist mit der Abgrenzung über die geringere Herstellungsmenge von Feinchemikalien einher.

(3) Je komplexer ein chemisch-technisches Syntheseverfahren ist, desto größer sind zumeist auch die damit verbundenen Stoff- und Energieströme in Relation zur Menge des gewünschten Produkts. Dies drückt sich durch das Mengenverhältnis der Produkte zu den Nebenprodukten, dem "E-Faktor" (Environmental Acceptability, siehe Sheldon 1993), aus.⁷⁶

⁷⁵ Beispielsweise dürfen in der Natur vorkommende, biotechnisch hergestellte Aromastoffe als "natürlich" bezeichnet werden, während chemisch-technisch synthetisierte aus lebensmittelrechtlichen Gründen mit dem aus Sicht der Konsumenten negativ behafteten Begriff "naturidentisch" bezeichnet werden müssen.

⁷⁶ Beispielsweise bedeutet ein E-Faktor von 10, daß pro Tonne Produkt 10 Tonnen Nebenprodukte anfallen.

Der E-Faktor beträgt für Feinchemikalien 5 bis 50 und für Grundchemikalien 1 bis 5. Es werden also in der Regel zahlreiche mehr oder weniger erwünschte Nebenprodukte sowie Abfälle erzeugt, und der Bedarf an Prozeßenergie ist hoch. Die spezifischen – pro Kilogramm Produkt gerechneten – Umweltauswirkungen der chemisch-technischen Produktion von Feinchemikalien sind daher häufig größer als bei der chemisch-technischen Herstellung von Grundchemikalien.

- Grundchemikalien sind in großen Mengen produzierte, in der Regel zur Weiterverarbeitung bestimmte Stoffe von geringer Wertdichte (häufig unter 1 DM/kg), die chemisch-technisch mit vergleichsweise geringem Aufwand, geringen spezifischen Umweltbelastungen und zumeist basierend auf fossilen Rohstoffen hergestellt werden.
- Feinchemikalien sind in geringeren Mengen – zumeist aus Grundchemikalien – produzierte Stoffe mit höherer Wertdichte. Ihre Herstellung ist technisch aufwendiger und mit vergleichsweise hohen spezifischen Umweltbelastungen verbunden.

(4) Die Kosten biotechnischer Verfahren werden häufig durch die Substratkosten dominiert. Bei einem Weltmarktpreis von 0,50 DM pro Kilogramm Zucker (als typischem Substrat) sind auch bei hohen Ausbeuten nur selten Herstellungskosten von deutlich unter 2 DM pro Kilogramm Produkt realisierbar. Schon diese einfache Betrachtung (ohne Berücksichtigung anderer Kostenkomponenten und sonstiger Aspekte) impliziert, warum **Grundchemikalien** bislang nur in geringem Umfang biotechnisch produziert werden. Ausnahmen bestehen insbesondere dort, wo neben den Kosten noch andere Gesichtspunkt einfließen, z.B. lebensmittelrechtlicher Art.⁷⁷

Natürlich sind die Kosten keineswegs der einzige Grund, der gegen den Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grundchemikalien spricht, und umgekehrt gibt es stets auch Aspekte, die für eine biotechnische Variante sprechen (z.B. der reduzierte Umgang mit problematischen Stoffen). Doch faktisch verstellt die Fokussierung auf die Kosten häufig den Blick auf diese anderen Vergleichsaspekte (oder aber die Kosten werden als bequemes, weil nicht ohne weiteres von der Hand zu weisendes "Killer-Argument" eingesetzt).

(5) Für **Feinchemikalien** stellen sich kostenseitige Situation und Beweggründe für die Nutzung (oder Nicht-Nutzung) biotechnischer Verfahren anders dar. Hier kommt insbesondere hinzu, daß bei komplexen Molekülen biotechnische Verfahren häufig einfacher sind als das jeweilige chemisch-technische Pendant. Dies manifestiert sich insbesondere bei Produkten aus dem Bereich Life science. Hier ist inzwischen oftmals die biotechnische Herstellung das Verfahren der Wahl. Komplizierte Molekülstrukturen sind mit vernünftigen Aufwand häufig nur biotechnisch zugänglich. Dies betrifft auch die Gewinnung von Enzymen, die dann ihrerseits teilweise zur Produktion von Stoffen benutzt werden.

⁷⁷ So wird beispielsweise Essig für den menschlichen Genuß ausschließlich biotechnisch erzeugt.

Exkurs: Die Entwicklung der Preise fossiler Rohstoffe für chemisch-technische Verfahren

(6) Ein häufig zugunsten biotechnischer Verfahren vorgebrachtes Argument ist die Unabhängigkeit von fossilen Rohstoffen als Eingangsstoffe. Angesichts der zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Berichts (März 2000) zu beobachtenden Preissteigerungen auf den Welt-Rohölmärkten stellt sich die Frage, ob diese Entwicklung anhält und die Preise für fossile Rohstoffe bereits in wenigen Jahren (und damit erheblich früher als bislang gedacht) ein Niveau erreichen, ab dem erneuerbare Rohstoffe eine kostenseitig interessante Alternative als Ausgangsprodukt für die Herstellung von Chemikalien werden.

(7) Hierzu ist zunächst zu bemerken, daß die jüngsten Preissteigerungen für Rohöl im wesentlichen auf eine künstliche Verknappung bzw. Preisabsprachen großer Erdölexportnationen zurückgehen. Die Ursache liegt also nicht etwa in der Erschöpfung von Reserven oder in gestiegener Nachfrage, die mit den bestehenden Förderkapazitäten nicht zu befriedigen wäre.

Eine Analyse der weltweiten Nachfrage und der Versorgungssituation für die nächsten 20 Jahre zeigt folgendes Bild (Schlesinger 2000):

- Versorgungsengpässe aufgrund begrenzter Verfügbarkeit von fossilen Rohstoffen (in Relation zur Nachfrage) sind in den nächsten 20 Jahren nicht zu erwarten.
- Weitere technische Fortschritte bei der Ausschöpfung der vorhandenen Reserven, beim Aufspüren neuer Vorkommen und bei der Reduzierung der Förderkosten sind zu erwarten.
- Versorgungsrisiken (die sich auch in den jüngsten Preissteigerungen widerspiegeln) können sich durch die wachsende Abhängigkeit von politisch und ökonomisch instabilen Lieferländern ergeben.

(8) Die Schätzung der zukünftigen Weltmarktpreise für fossile Rohstoffe ist aufgrund vielfältiger und teilweise schwer vorhersagbarer Einflußgrößen ökonomischer, politischer und auch psychologischer Art schwierig. Häufig stehen Prognosen stark unter dem Eindruck der aktuellen Preisentwicklung. Eine auf nachfrage- und angebotsseitigen Analysen basierende und an langfristigen Entwicklungen orientierte Projektion läßt bis 2010 einen real (inflationsbereinigt) im Durchschnitt konstanten Preis erwarten. Dies schließt Schwankungen über kürzere Zeitspannen nicht aus. Für den Zeitraum 2010 bis 2020 wird mit einem Anstieg von insgesamt real 25% gerechnet.

Ein solches Preisniveau fossiler Rohstoffe zur Herstellung von Grundchemikalien führt – sofern nicht andere entscheidende Faktoren hinzukommen – nach Einschätzung der Autoren des vorliegenden Berichts nicht zu einer Switchsituation beim Rohstoffeinsatz zugunsten er-

neuerbarer Rohstoffe. Dies ergibt sich aus den (auf andere Grundchemikalien übertragbaren) Betrachtungen der Kostenstrukturen der Fallbeispiele in den Kapiteln 4.1 und 4.2.

Hemmnisse

(9) Folgende Gründe stehen häufig einem Einsatz biotechnischer Verfahren entgegen:

- ❑ Erfolgreich praktizierte Verfahren haben gegenüber nicht eingeführten Verfahren stets den Vorteil der **nachgewiesenen Zuverlässigkeit und Produktqualität** ("Kanzlerbonus": Festhalten an bewährtem).

- ❑ **Forschungs- und Entwicklungsaufwand/-kosten:** Der Forschungs- und Entwicklungsaufwand für die praktizierten chemisch-technischen Verfahren ist bereits geleistet und in der Regel auch betriebswirtschaftlich abgeschrieben (amortisiert).

Bei Feinchemikalien kann das Absatzvolumen zu gering sein, um Entwicklungskosten für neue Verfahren zu rechtfertigen.

Für einige Produkte sind die Margen oder das Marktvolumen zu gering, um Investitionen in die Entwicklung neuer Verfahren zu rechtfertigen.

- ❑ **Zeithorizont:** Der Zeithorizont bis zur Produktionsreife der biotechnischen Variante ist oftmals zu lang, so daß der Break-even, der Zeitpunkt, ab dem sich eine Investition lohnt, zu weit in der Zukunft liegt, um die Entwicklung eines biotechnischen Verfahrens unternehmensintern zu rechtfertigen.

- ❑ **Anlagen-Investitionen:** Biotechnische Synthesen erfordern andere Anlagen als chemische Synthesen. Eine Substitution von Verfahren vor Ablauf des Abschreibungszeitraums der Produktionsanlagen bedeutete einen Vermögensverlust für das Unternehmen in Höhe des noch nicht abgeschriebenen Wiederbeschaffungswertes.

Nach Abschreibung wird "am goldenen Ende" produziert – die Investition hat sich amortisiert, es ist kein Kapitaleinsatz (Abschreibung und Zinsen) mehr zu leisten. Bei einer Verfahrensumstellung in diesem Stadium entfielen diese Vorteile (vgl. Prognos 1994).

- ❑ **Entwicklungsvorsprung:** Während die biotechnischen Verfahren entwickelt werden, erfolgt parallel eine Weiterentwicklung der chemischen Verfahren (z.B. verbesserte Katalysatoren, Einsatz nachwachsender Rohstoffe für chemische Prozesse – vgl. Kapitel 4). Heute in Entwicklung befindliche biotechnische Verfahren konkurrieren daher zum Zeitpunkt der großtechnischen Anwendungsreife mit den dann verfügbaren chemischen Herstellungsverfahren.

Das **Zeitfenster**, innerhalb dessen eine Verfahrensumstellung in Frage kommt (in dem die biotechnische Variante also operabel sein muß), ist häufig klein.

- **Rohstoffpreise:** Bei Grundchemikalien werden bis zu 80% der Betriebskosten durch die Rohstoffkosten bestimmt. Bei Produkten mit geringer Wertschöpfung bzw. geringem Veredelungsgrad müßten die Rohstoffe für die biotechnische Produktion deutlich billiger sein als die bei chemisch-technischer Herstellung eingesetzten petrochemischen Rohstoffe, um Verfahrensumstellungen wirtschaftlich zu rechtfertigen.

Petrochemische Rohstoffe sind jedoch auf absehbare Zeit (insbesondere innerhalb der Abschreibungszeiträume neuer Anlagen) voraussichtlich weiterhin billig und zuverlässig verfügbar.

- **Anlagengröße:** Chemisch-technische Anlagen zur Herstellung von Grundchemikalien haben oft Kapazitäten von über 100.000 Jahrestonnen (vgl. Kapitel 4.1). Biotechnische Anlagen werden diese Dimensionen in absehbarer Zeit nicht erreichen und können demnach keine Größenvorteile ("Economies of scale") realisieren.⁷⁸

Hinsichtlich Kapazitätserweiterungen bzw. Rationalisierungen bei der chemisch-technischen Herstellung von Grundchemikalien geht der Trend derzeit in Richtung größerer Anlagen (sofern angesichts bestehender Überkapazitäten überhaupt neue Investitionen erfolgen). Dies wird teilweise durch Erhöhung vorhandener Kapazitäten durch Beseitigung von Engpässen ("de-bottlenecking") erreicht. Durch solche Maßnahmen soll dem Trend zu weiter sinkenden Weltmarktpreisen bei Grundchemikalien entsprochen werden.

- **Rohstoffverfügbarkeit:** Zur Herstellung von Grundchemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen sind entsprechende Mengen und Qualitäten davon (ganzjährig!) erforderlich.

Die erforderlichen Mengen nachwachsender Rohstoffe können nicht in allen Regionen Deutschlands durch heimische Produktion zu niedrigen (Weltmarkt-)Preisen erzeugt werden. Bei Import (zu Weltmarktbedingungen) können sich ethische Konflikte mit der Nahrungsgewinnung in den Erzeugerländern ergeben (sofern diese von Nahrungsmittelknappheit betroffen sind).

- **Reststoffverwertung:** Zur Verwertung der Reststoffe biotechnischer Verfahren als Dünger oder Viehfutter sind entsprechende Aufnahmekapazitäten erforderlich.

- **Mangel an biotechnischen Know-how:** Entwicklung und Anwendung biotechnischer Verfahren erfordern spezifische Kenntnisse, die bislang in den Unternehmen nicht gefordert waren und daher oft nicht vorhanden sind. Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang Probleme beim Scale up aus dem Labor- in den technischen Maßstab, die häufig spezifisches Know-how erfordern.

⁷⁸ Dies bedeutet aber auch, daß die Beschäftigungsintensität biotechnischer Anlagen zur Herstellung von Grundchemikalien höher ist als bei chemisch-technischen Anlagen.

In einigen Bereichen muß zunächst noch Grundlagenforschung biochemischer und mikrobiologischer Art geleistet werden, da es teilweise noch an grundlegendem Verständnis mangelt.

- ❑ **Historische Prägung** (vgl. Cheetham 1994): Die chemische Industrie (bzw. die Mitarbeiter der Unternehmen) ist von den Methoden der organischen Chemie geprägt, die sich grundsätzlich von biotechnischen Methoden unterscheiden. Dies drückt sich u.a. in den verfügbaren Laborausstattungen und in den Denkstrukturen, Arbeitsweisen und Qualifikationen der Mitarbeiter aus.

Die Qualifikation der vorhandenen Belegschaft der Unternehmen paßt oftmals nicht zu den Anforderungen biotechnischer Verfahren (vgl. McCoy 1998a).

- ❑ **Berührungängste**: Chemiker wissen zumeist wenig über biologische Systeme, Biologen wissen in der Regel wenig über großtechnische chemisch-technische Produktion. Die "kulturelle Barriere" zwischen den Disziplinen ist in Unternehmen, die bislang keine biotechnischen Verfahren einsetzen, besonders groß.
- ❑ **Produktionsverbund**: Bestehende chemisch-technische Anlagen sind oftmals in einem Produktionsverbund mit anderen Anlagen verflochten (z.B. durch Nutzung von Abwärme oder Nebenprodukten).⁷⁹
- ❑ **"Technische" Nachteile mikrobiologischer Verfahren** (vgl. Hüsing 1998): Geringe Ausbeuten aufgrund von Inhibition, geringe Umsetzungsraten, fehlende Toleranz gegenüber organischen Lösungsmitteln, Anfälligkeit für Infektionen (z.B. Bakteriophagen), genetische Instabilität von Produktionsstämmen (Degeneration), Vielzahl der über die Fermentationsdauer in engen Grenzen zu haltenden Verfahrensparameter, aufwendige Produktisolation etc. Biotechnische Prozesse sind bzgl. Automatisierung durch Prozeßleitsysteme häufig anspruchsvoller als chemisch-technische Prozesse.
- ❑ Bei mikrobiologischen Verfahren fallen häufig unerwünschte und aufgrund geringer Konzentrationen derzeit nicht wirtschaftlich verwertbare **Kuppelprodukte** an (vgl. Kapitel 4).
- ❑ **Kosten für Enzyme**: Hohe Kosten für Enzyme (wegen hoher Substratspezifität nur geringe Absatzmengen, vgl. VCI 1996). Oft müssen die benötigten Enzyme maßgeschneidert hergestellt werden.

⁷⁹ Dieses häufig vorgebrachte Argument ist nach unserer Einschätzung bei mittel- bis langfristiger Betrachtung von nachrangiger Bedeutung. Die Rückwirkungen auf den Produktionsverbund durch marktbedingte Absatzschwankungen sind vermutlich größer als die Wirkungen längerfristiger (allmählicher) Produktionsumstellungen. In der chemischen Industrie wurden schon immer (wirtschaftlich motivierte) Substitutionen bewältigt (jüngste Beispiele: Vitamine B₂ und C). Diese Argumente relativieren das Bild des uhrwerkartigen Zusammenspiels innerhalb des Produktionsverbunds, das keinerlei "Schlupf" erlaubt.

- ❑ **"Technische" Nachteile enzymatischer Verfahren** (vgl. Hüsing 1998): Mangelnde Stabilität von Enzymen, Vielzahl der in engen Grenzen zu haltenden Verfahrensparameter (Temperatur, pH etc.), aufwendige Cofaktorregenerierung etc.

- ❑ **Image/Vorurteile:** Enzymatische Verfahren gelten vielfach als "letztes Mittel" und werden in von chemisch-technischen Methoden geprägten Unternehmen nur dann in Erwägung gezogen, wenn die üblichen chemischen Syntheseverfahren nicht weiter führen.

Teilweise werden gegen enzymatische Verfahren Vorurteile vorgebracht, die aus Erfahrungen mit fermentativen Verfahren abgeleitet wurden (z.B. geringe Produktivität).

Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

(10) Bei der Herstellung von Grund- und Feinchemikalien stehen biotechnische Verfahren in Konkurrenz zu traditionellen chemischen Herstellungsverfahren bzw. Verfahrensschritten. Die jeweils vorteilhafte Route ist eine Frage der **Optimierung** unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten und ändert sich im Zeitverlauf mit sich wandelnden **Rahmenbedingungen** (z.B. politische Auflagen, Rohstoffkosten, technische Entwicklungen).

(11) Es gibt eine Reihe von hemmenden und fördernden Faktoren, welche die Anwendung biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Chemikalien bestimmen. Diese sind teilweise stoff- bzw. verfahrensspezifisch. Insbesondere bestehen diesbezüglich deutliche Unterschiede zwischen Grund- und Feinchemikalien. Es lassen sich jedoch einige generelle Schlußfolgerungen ableiten.

(12) Eine **selbsttätige Substitution** chemisch-technischer durch biotechnische Verfahren ist nur in solchen Fällen zu erwarten, in denen das biotechnische Verfahren deutliche Kostenvorteile aufweist. Hier sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Die Wahl des Verfahrens bei Errichtung neuer Kapazitäten bzw. Ersetzung ausgedienter Anlagen
2. Die Ersetzung bestehender, betriebsfähiger chemisch-technischer Anlagen.

Eine Substitution bestehender chemisch-technischer Anlagen erfolgt nur dann, wenn deutliche Kostenvorteile den Umstellungsaufwand (Kosten und mit der Umstellung verbundene Risiken, z.B. hinsichtlich Anlagenverfügbarkeit und Produktqualität) rechtfertigen.

(13) Eingeführte chemisch-technische Verfahren haben den großen **Startvorteil** der ausgereiften Technik, die zudem laufend optimiert wird. Die (Erst-)Entwicklungskosten sind zumeist abgeschrieben. Auch die Produktionsanlagen haben sich bereits (teilweise oder vollständig) amortisiert. Das Argument des Startvorteils entfällt im Bereich **neuer Stoffe**⁸⁰, so daß sich dort gute Chancen für biotechnische Verfahren ergeben. Dies gilt insbesondere für enantiomeren-selektive biotechnische Synthesen, weil sich hier die zumeist aufwendige Racematentrennung erübrigt.

Gute Aussichten ergeben sich auch im Bereich der Nutzung des Stoffwechsels von **Pflanzen** zur Synthese komplexer Moleküle (Produktion "maßgeschneiderter" Inhaltsstoffe).

(14) Im Bereich Grundchemikalien sind biotechnische Verfahren heute bei Berücksichtigung der Entwicklungs- und Substratkosten **wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig**. Aufgrund der auf absehbare Zeit weiterhin billigen petrochemischen Rohstoffbasis und des wirtschaftlichen Startvorteils der chemischen Verfahren wird dies kurz- bis mittelfristig so bleiben.

Bei den Grundchemikalien kommen die **spezifischen Vorteile** biotechnischer Verfahren (z.B. enantiomerenreine Produkte, Reduktion der Menge toxischer Abfälle) nicht immer zur Geltung. Damit treten die **spezifischen Nachteile** im Vergleich zu chemisch-technischen Synthesen (z.B. geringe Produktkonzentrationen mikrobieller Verfahren) hier deutlicher zutage.

(15) Der Einsatz **gentechnischer Methoden** zur Steigerung der Ausbeute oder zur Erschließung neuer Stoffwechselwege ermöglicht teilweise erhebliche Optimierungen oder gar völlig neuartige biotechnische Verfahren.

(16) Es ist sinnvoll, durch **Kombination chemisch-technischer mit biotechnischen Schritten** in mehrstufigen Prozessen die jeweils spezifischen Vorteile auszureizen. Insofern sind biotechnische und chemisch-technische Verfahren nicht immer als konkurrierende Alternativen zu betrachten.

Gerade im Bereich der Feinchemikalien, die oftmals über mehrstufige Synthesen gewonnen werden, liegt ein Potential für den Ersatz einzelner chemischer Stufen durch (in der Regel) enzymatische Schritte.

⁸⁰ Stoffe, die bislang nicht großtechnisch hergestellt wurden. Diese sind nicht Gegenstand der Untersuchung.

(17) Die biotechnische Produktion billiger Grundchemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen würde auf absehbare Zeit eine (direkte oder indirekte) **Subventionierung** erfordern, die nur schlecht mit dem derzeitigen politischen Umfeld (Subventionsabbau, liberalisierter Welthandel) vereinbar ist. Steuermindereinnahmen oder direkte Subventionen können vertretbar sein, wenn sie mit positiven ökologischen und/oder volkswirtschaftlichen Effekten verbunden sind, die nicht über Marktmechanismen bewirkt werden können (vgl. Roesch 1997).

Rechtliche Regelungen (z.B. bezüglich der Zusammensetzung von Kraftstoffen⁸¹, Verwendungsge- und -verbote) und **fiskalische Maßnahmen** (z.B. Steuerbefreiungen, CO₂-Steuer) können das Absatzpotential biotechnisch gewonnener Grundchemikalien wesentlich steigern.

(18) Die chemische Industrie (bzw. die Mitarbeiter der Unternehmen) ist von den Methoden der organischen Chemie **geprägt**, die sich grundsätzlich von biotechnischen Methoden unterscheiden. Dies drückt sich u.a. in den verfügbaren Laborausstattungen und in den Denkstrukturen, Arbeitsweisen und Qualifikationen der Mitarbeiter aus. Der Generationswechsel ist angelaufen.

(19) Heute in Entwicklung befindliche biotechnische Verfahren konkurrieren zum Zeitpunkt der Einsatzreife mit den dann verfügbaren chemischen Herstellungsverfahren, da parallel eine **Weiterentwicklung** der chemischen Verfahren erfolgt (z.B. Einsatz natürlicher Rohstoffe für chemische Prozesse, Verminderung der Emissionen).

(20) Aus den in Zusammenhang mit der Anwendung biotechnischer Verfahren in Deutschland einschlägigen **Regelungen** ergeben sich **keine** erkennbaren Hemmnisse für die weitere Verbreitung biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Chemikalien.

(21) Es stellt sich die Frage, wie die genannten Hemmnisse, die einem verstärkten Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Chemikalien entgegenstehen, abgebaut werden können.

- Der stärkste Hemmnisfaktor für die verstärkte biotechnische Herstellung von Grundchemikalien sind die höheren Kosten. Die Substratkosten können durch den Einsatz von Reststoffen aus anderen Prozessen reduziert werden.
- Aus den o.g. Gründen investieren die Unternehmen nur dann in die Forschung zur Entwicklung biotechnischer Verfahren, wenn die Verfahren sich absehbar rasch rentieren.

⁸¹ Ersatz des aus Umweltgründen umstrittenen MTBE als Kraftstoffzusatz durch Ethanol.

Bei längeren Zeithorizonten bis zur Anwendungsreife muß die Forschung und Entwicklung mit öffentlichen Mitteln finanziert werden.

- Die Investitionen der Industrie in neue Verfahren werden derzeit überwiegend in den Pharmasektor gelenkt (im Bereich Agrochemikalien ist aktuell weitgehender Stillstand zu verzeichnen). Das Interesse der Industrie an biotechnischen Anlagen zur Herstellung von Feinchemikalien beschränkt sich daher momentan auf Einzelfälle (z.B. Vitamin C). Wir gehen davon aus, daß mittelfristig wieder mehr in Anlagen zur Produktion von Feinchemikalien investiert wird.
- Hinsichtlich der (in ihrer Bedeutung nicht zu unterschätzenden) psychologischen Faktoren, die einer Entscheidung zugunsten der biotechnischen Variante entgegenstehen können, ist festzustellen, daß sich – auch bedingt durch den Generationenwechsel in den Unternehmen – auch in bislang stark von chemisch-technischen Verfahren geprägten Unternehmen ein allmählicher Meinungsumschwung in Richtung auf eine größere Aufgeschlossenheit für biotechnische Verfahren andeutet.

In Kapitel 6 wird u.a. der Frage nachgegangen, inwieweit Hemmnisse, die dem Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Chemikalien entgegenstehen, durch Demonstrationsanlagen abgebaut werden können.

6. Hinweise zur Gestaltung von Demonstrationsvorhaben

(1) Der Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Chemikalien ist im Vergleich zu den gängigen chemisch-technischen Synthesen in einigen Fällen mit umweltseitigen Vorteilen verbunden (vgl. Kapitel 3). Im Bereich der hier betrachteten Grund- und Feinchemikalien ist der großtechnische Einsatz solcher Verfahren allerdings (im Unterschied zum Segment Life science) bislang eher die Ausnahme. Dies hängt – grob gesagt – mit dem frühen Entwicklungsstadium vieler biotechnischer Verfahren sowie mit den (in Kapitel 5 näher benannten) Startvorteilen etablierter chemisch-technischer Verfahren zusammen.

(2) Die chemische Industrie betreibt die Entwicklung und Anwendung biotechnischer Verfahren mit eigenen Mitteln nur dort, wo kosten- oder marketingseitige Vorteile zu erwarten sind. Soll die Verbreitung umweltentlastender biotechnischer Verfahren gezielt gefördert werden, besteht bei den diesbezüglich seitens der Unternehmen noch nicht als vorteilhaft⁸² eingeschätzten Verfahren **Förderungsbedarf** durch die öffentliche Hand.

(3) Es stellt sich demnach die Frage, ob durch öffentlich geförderte Demonstrationsanlagen im großtechnischen Maßstab die Verbreitung von umweltseitig vorteilhaften biotechnischen Verfahren gefördert werden kann. Der Zweck solcher in Zusammenarbeit mit Unternehmen durchgeführter Demonstrationsvorhaben besteht in:

- Dem Aufzeigen des **tatsächlichen** Umweltentlastungspotentials. Bei noch nicht großtechnisch realisierten Verfahren lassen sich die erreichbaren Umweltentlastungen nur im Sinne von Entlastungspotentialen abschätzen. Das Verfahren muß eine Verminderung der Umweltbelastungen erwarten lassen. Die Verifikation der tatsächlich auftreten Entlastungswirkungen erfordert letztlich die konkrete großtechnische Umsetzung.
- Der Demonstration der **Machbarkeit** in technischer, organisatorischer und anderer Hinsicht. Dies ist der beste Weg, um dem offenbar gerade in Bezug auf die Anwendung biotechnischer anstelle von chemisch-technischen Verfahren verbreiteten Einwand "Das geht nicht" zu begegnen.
- Der Lösung von praktischen Problemen im Zuge des **Scale up**. Drei der vier in dieser Untersuchung betrachteten Fallbeispiele befinden sich in frühen Entwicklungsstadien (siehe Kap. 4). Im Labor- oder Pilotanlagenmaßstab steht das Erreichen eines stabilen Fermentationsprozesses im Vordergrund. Auf dieser Ebene werden viele "praktische" (bei Anwendung im großen Maßstab auftretende) Fragen noch nicht betrachtet. Dies betrifft beispielsweise die Entsorgung/Verwertung anfallender Reststoffe.

⁸² D.h., die Kosten bzw. das Risiko sind aus Sicht des Unternehmens noch groß, um eine vollständige Finanzierung aus eigenen Mitteln zu rechtfertigen.

- Der Identifikation von **Optimierungsbedarf**. Bei erstmaliger Anwendung eines Verfahrens im großtechnischen Maßstab treten anfangs im Anlagenbetrieb immer verfahrenstechnische Fragen und Probleme auf, die nicht bereits in der Planungsphase antizipiert werden können, sondern anhand der laufenden großtechnischen Anlage gelöst werden müssen.

Durch öffentlich geförderte Demonstrationsvorhaben kann diesen Aspekten Rechnung getragen werden, wenn der ökonomische Anreiz für potentielle Anwender (noch) nicht ausreicht, um aus deren Sicht den Aufwand und die Kosten und Risiken der Entwicklung und des Einsatzes neuer Verfahren vollständig aus eigenen Mitteln zu rechtfertigen. Auf diesem Weg ist ein Anschub besser umweltverträglicher Verfahren möglich.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) fördert Demonstrationsvorhaben, "die aufzeigen, in welcher Weise [...] fortschrittliche Verfahren und Verfahrenskombinationen zur Vermeidung und Verminderung von Umweltbelastungen verwirklicht [...] werden können" (BMU 1997).⁸³

(4) Nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts kann nicht unbedingt erwartet werden, daß die Durchführung eines Demonstrationsvorhabens zur biotechnischen Herstellung eines bestimmten Produkts Signalcharakter in dem Sinne entfaltet, daß die Unternehmen dies zum Anlaß nehmen, auch andere Produkte nun biotechnisch zu produzieren.⁸⁴ Der Grund hierfür liegt in den spezifischen Eigenheiten der verschiedenen Verfahren und der jeweiligen Absatzmärkte verschiedener Produkte.

(5) Knappe öffentliche Mittel dürfen nicht zur Finanzierung von ökonomisch für die beteiligten Unternehmen ohnehin lukrativen Aktivitäten verwendet werden.⁸⁵ Bei den Grundchemikalien ist die Gefahr von unerwünschten Mitnahmeeffekten eher gering, muß aber dennoch in jedem Einzelfall geprüft werden. Bei den Feinchemikalien ist das Interesse der Unternehmen an der Anwendung biotechnischer Verfahren aus wirtschaftlichen Gründen deutlich höher (wie z.B. das Fallbeispiel Vitamin C verdeutlicht). Damit steigt tendenziell die Gefahr von Mitnahmeeffekten.

(6) Im Bereich der biotechnischen Herstellung von Stoffen besteht **vielfältiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf** in der Grundlagenforschung (Entwicklung von

⁸³ Bezüglich Entwicklung und Anwendung neuer Technologien (die nicht unbedingt Umweltentlastungen ermöglichen, sondern ggf. anderweitige Vorteile bieten) liegt die Zuständigkeit für öffentliche Förderung beim BMBF.

⁸⁴ Da es bereits eine Reihe biotechnisch produzierter Chemikalien gibt (siehe Kap. 3) wäre andernfalls jegliche Förderung ohnehin überflüssig.

⁸⁵ Die Förderrichtlinien zielen natürlich auf Vermeidung von Mitnahmeeffekten.

Prozessen), der Prozeßoptimierung, der Übertragung auf den großtechnischen Maßstab (Scale up) und der Begleitforschung.

Der F&E-Bedarf konzentriert sich im wesentlichen auf

- ☐ Die Überwindung der spezifischen **technischen Schwierigkeiten** enzymatischer und mikrobiologischer Verfahren.
- ☐ Die **Erhöhung** der Ausbeuten, Umsetzungsraten, Produktivitäten und Endproduktkonzentrationen bei gleichzeitiger **Minimierung** des Anfalls unerwünschter Nebenprodukte und Reststoffe mikrobiologischer Verfahren.
- ☐ **Scale up-Probleme:** Nutzung von Nebenprodukten und Reststoffen, Minderung der Emissionen, Beherrschung des Infektions- und Kontaminationsrisikos für die Produktionsstämme mikrobiologischer Verfahren.
- ☐ Die Ermittlung der tatsächlich anfallenden Mengen an **Reststoffen** aus industriellen Prozessen, die sich als Substrate für biotechnische Verfahren eignen (Milch-, Zucker-, Stärkeverarbeitung, Fettspaltung etc.).⁸⁶
- ☐ Die Identifikation von **Fortbildungsbedarf** für Chemiker sowie die Entwicklung entsprechender Konzepte.
- ☐ Die Prüfung und ggf. gezielte Fortentwicklung (im Sinne von den örtlichen Gegebenheiten in den Empfängerländern angepaßter Technologie) des **entwicklungspolitischen Potentials** – sofern dies als politisches Ziel angesehen wird.

Für die **Produktisolation und -aufbereitung** sowie für die **Meß-, Steuer- und Regelungstechnik** sind einzelfallbezogene Optimierungen – insbesondere bzgl. Produktqualität, Energiebedarf und Kosten – notwendig.

Für die in dieser Untersuchung betrachteten Fallbeispiele wurden die im Rahmen allfälliger Demonstrationsvorhaben zu lösenden Fragen in Kapitel 4 aufgezeigt.⁸⁷

(7) Gerade bei den Grundchemikalien ist (aus den in Kapitel 5 genannten Gründen) nur in wenigen Fällen zu erwarten, daß Unternehmen den zur Erreichung großtechnischer Einsatzreife biotechnischer Verfahren erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsaufwand vollständig auf sich nehmen. In diesem Bereich ist im Gegenteil von einer stark ablehnenden Haltung gegenüber biotechnischen Verfahren auszugehen.

⁸⁶ Im Umweltforschungsplan 2000 des BMU ist ein F&E-Vorhaben unter dem Titel "Biotechnologische Herstellung von Wertstoffen unter besonderer Berücksichtigung von Energieträgern und Biopolymeren **aus Reststoffen**" aufgeführt.

⁸⁷ Die betrachteten Fallbeispiele stellen keine Vorauswahl für mögliche Demonstrationsvorhaben dar (siehe Prognos 1999a).

Für die Entwicklung biotechnischer Verfahren zur Herstellung neuer (bislang nicht in groß-technischem Maßstab hergestellter) Stoffe – zumeist aus dem Bereich Life science – besteht hingegen aus ökonomischen Gründen zumeist ein großes Eigeninteresse der betreffenden Unternehmen und daher auch eine entsprechende Dynamik, die in der Regel eine öffentliche Förderung nicht erforderlich erscheinen läßt.

(8) Wichtige Kriterien für Förderungswürdigkeit sind:

- Es sind solche Verfahren gefördert werden, die zumindest mittel- bis langfristig einen wirtschaftlichen Betrieb ohne **dauerhafte Subventionen** erwarten lassen.
- Die Förderung sollte auch biotechnische **Teilschritte** zur Optimierung chemisch-technischer Synthesen umfassen.
- Bei mikrobiologischen Verfahren sollten vorzugsweise solche gefördert werden, die als sicher einzustufende **Organismen** (Stufe 1) nutzen.
- Verfahren, die ansonsten zu entsorgende **Reststoffe** – bzw. nicht ohne weiteres verwertbare Nebenprodukte anderer Prozesse – als Substrate verwerten können, sollten besonders gefördert werden.
- Geförderte Verfahren sollten möglichst wenige nicht sinnvoll verwertbare **Nebenprodukte und Reststoffe** erzeugen.

(9) Von den in dieser Untersuchung betrachteten Fallbeispielen haben zwei einen **Entwicklungsstand** erreicht, der eine Durchführung von Demonstrationsvorhaben grundsätzlich ermöglicht. Dies sind die Aceton/Butanol-Fermentation (Kapitel 4.1) und die Herstellung von 1,3-Propandiol aus Rohglycerin (Kapitel 4.2).

- Das **Aceton/Butanol**-Verfahren eignet sich – insbesondere bei Nutzung von Reststoffen als Substrate – aufgrund seines fortgeschrittenen Entwicklungsstandes und des demzufolge vergleichsweise kurzen Zeithorizonts (1 bis 2 Jahre) zur Realisierung für ein Demonstrationsvorhaben. Dies gilt insbesondere bei Nutzung existierender Infrastruktur in Gestalt von ehemaligen Ethanolbrennereien. Im Vordergrund eines Demonstrationsvorhabens stünde die Lösung der angesprochenen Scale up-Fragen (einschließlich der Reduktion von Lösungsmittlemissionen über die Reststoffe⁸⁸) und damit der Nachweis der großtechnischen Umsetzbarkeit. Das Umweltentlastungspotential besteht in der Schonung nicht-erneuerbarer fossiler Ressourcen durch Verwertung von Reststoffen. Das Marktpotential für die Produkte ist angesichts des auf absehbare Zeit geringen Anteils biotechnisch erzeugten Acetons und Butanols gegeben. Daher besteht auch kein Konflikt im Hinblick auf die chemisch-technische Kuppelproduktion von Aceton und Phenol (siehe Kap. 4.1).

⁸⁸ Dies ist erforderlich, da andernfalls aus dem biotechnischen Verfahren zusätzliche Umweltbelastungen durch Lösungsmittlemissionen resultieren könnten.

- Die biotechnische Herstellung von **1,3-Propandiol** aus Rohglycerin eignet sich nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts aufgrund des fortgeschrittenen Entwicklungsstandes, der zu erwartenden Umweltentlastung und des grundsätzlichen Interesses der fettverarbeitenden Industrie für ein Demonstrationsvorhaben. Die Aussichten des biotechnischen Verfahrens sind aufgrund des Absatzpotentials von 1,3-Propandiol besonders günstig.

(10) Bei **Vitamin C** gibt es neben dem als Fallbeispiel betrachteten Verfahren zahlreiche andere Ansätze zur Ersetzung weiterer chemisch-technischer Schritte der klassischen Reichstein-Synthese durch biotechnische Schritte (Kapitel 4.3). Diese Ansätze befinden sich auf verschiedenem Entwicklungsniveau und sind bezüglich ihrer Umweltentlastungspotentiale sicherlich unterschiedlich zu beurteilen. Hinsichtlich der Synthese von Ketogulonsäure aus Sorbose (dies kann als der Kern des Reichstein-Verfahrens angesehen werden) besteht aufgrund des offensichtlichen ökonomischen Eigeninteresses der Hersteller eher **kein Förderungsbedarf**.

(11) Das biotechnische Verfahren zur Herstellung von **Adipinsäure** (Kapitel 4.4) verspricht Umweltentlastungen, eignet sich jedoch aufgrund seines sehr frühen Entwicklungsstadiums noch nicht für ein Demonstrationsvorhaben, da zunächst auf Laborebene zahlreiche Forschungsarbeiten erforderlich sind. Dieser Ansatz erfordert Forschungsförderung auf der Ebene der Verfahrensentwicklung (Labormaßstab).

(12) Ebenso wie das Fallbeispiel Adipinsäure befinden sich noch zahlreiche andere biotechnische Verfahren im Entwicklungsstadium (siehe Kapitel 2). Forschung und Entwicklung auf Labor- und Pilotanlagenmaßstab erfordert andere Förderinstrumente als die Investitionsförderung für Demonstrationsvorhaben. Entsprechendes gilt für die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Mikrobiologie und Enzymtechnologie.

(13) Die Abschätzung des Umweltentlastungspotentials (Kapitel 3 und Anhang 1) liefert erste Anhaltspunkte, bei welchen Stoffen aus dem Bereich Grund- und Feinchemikalien bei Anwendung biotechnischer Verfahren umweltseitige Vorteile gegenüber den gängigen chemisch-technischen Verfahren nach derzeitigem Stand möglich sind. Die Beurteilung der Eignung der in Kapitel 3 genannten Verfahren als Demonstrationsvorhaben erfordert tiefergehende Betrachtungen, die den Rahmen dieser Untersuchungen deutlich überschritten hätten.

(14) Neben der Entwicklung von biotechnischen Verfahren, die bestehende chemisch-technische Prozesse ablösen könnten (nur solche sind Gegenstand dieser Untersuchung), ist natürlich auch die Entwicklung solcher biotechnischer Verfahren sinnvoll, die zu Umweltentlastungen durch Substitution von hinsichtlich ihres Nutzens **äquivalenten Produkten** führen.

7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

(1) Biotechnologie ist in aller Munde. Als Schlüsseltechnologie des ausgehenden sowie des beginnenden neuen Jahrhunderts verspricht man sich von ihr im weitesten Sinne eine Umwälzung herkömmlicher chemisch-technischer Produktionsverfahren hin zu umweltverträglichen biologischen Prozessen, neuartigen Produkten, Analyse- und Diagnosemethoden, Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft usw. Daran knüpfen sich entsprechende Erwartungen hinsichtlich der Sicherung oder Schaffung von Arbeitsplätzen in der post-industriellen Gesellschaft und einer technologischen Spitzenposition Deutschlands. In diesem Sinne werden positive Beiträge von Biotechnik zu allen drei Dimensionen einer nachhaltigen Entwicklung (ökonomisch – ökologisch – sozial) erwartet.

(2) Die vorliegende Untersuchung beschäftigt sich mit der Herstellung von Chemikalien durch biotechnische Verfahren. Dies ist ein Teilbereich der "produzierenden Biotechnik."

Biotechnische Verfahren zur Herstellung von Chemikalien unterscheiden sich in vielfältiger Hinsicht von den üblichen chemisch-technischen Prozessen:

- Die Eingangsstoffe (Substrate) sind in vielen Fällen biologischen Ursprungs.
- Die Prozesse erfolgen in der Regel unter milden Reaktionsbedingungen.
- Der Umgang mit (z.B. hinsichtlich Toxizität) problematischen Stoffen ist seltener.
- Die Produkte und Nebenprodukte sind zumeist gut biologisch abbaubar.

Daher gelten biotechnische Prozesse zur Herstellung von Chemikalien im Vergleich zu chemisch-technische Synthesen im allgemeinen als besser umweltverträglich.

(3) Aufgabe der vorliegenden Untersuchung war es, das Segment Grund- und Feinchemikalien näher zu betrachten. Hier lagen bislang nur verstreute Einzelinformationen über die Nutzung biotechnischer Verfahren und die damit verbundenen Umweltwirkungen vor. Gleichzeitig wird vermutet, daß aufgrund der umgesetzten Stoffmengen und der Umweltrelevanz der involvierten Substanzen (organische Lösungsmittel, Chlor, schwermetallhaltige Katalysatoren etc.) hier nennenswerte Potentiale zur Umweltentlastung vorhanden sein könnten.

Die Ziele des Forschungsprojekts sind:

- Die Ermittlung, inwieweit die Voraussetzungen für die Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren für die Herstellung ausgewählter Grund- und Feinchemikalien und deren Einsatz in ausgewählten Industriezweigen gegeben sind.

- Die beispielhafte Prüfung der großtechnische Umsetzung im Rahmen von Demonstrationsvorhaben.
- Die Erarbeitung von Hinweisen zur Gestaltung möglicher späterer Demonstrationsvorhaben.
- Die Dokumentation des derzeitigen Entwicklungsstandes.
- Die Identifikation von Hemmnissen, die der Anwendung biotechnischer Verfahren im Bereich der Grund- und Feinchemikalien entgegenstehen, und die Untersuchung von Möglichkeiten für deren Abbau.
- Die Abschätzung des Umweltentlastungspotentials durch den Einsatz biotechnischer Verfahren in diesen Bereichen.
- Die Prüfung, ob die Umweltwirkungen biotechnischer Verfahren durch die bestehenden Regelwerke (BImSchG, UVPG, GenTG etc.) ausreichend erfaßt werden.

Bei den Grundchemikalien soll der Schwerpunkt der Untersuchung auftragsgemäß bei den chlororganischen und den sauerstoffhaltigen Stoffen liegen.

Anhand von gemeinsam mit dem Umweltbundesamt ausgewählten Fallbeispielen wurden exemplarische ökologische und ökonomische Vergleiche zwischen chemisch-technischen und biotechnischen Varianten zur Herstellung von Chemikalien gezogen. Ferner wurden anhand der Fallbeispiele rechtliche Fragen im Zusammenhang mit der großtechnischen Anwendung biotechnischer Verfahren untersucht. Die betrachteten Fallbeispiele sind Verfahren zur Herstellung von Aceton/Butanol, 1,3-Propandiol, Vitamin C und Adipinsäure (Kapitel 4).

(4) Betrachtet werden in dieser Untersuchung nur solche Stoffe, die aktuell auf chemisch-technischem Weg in industriellem Maßstab hergestellt werden und die auch biotechnisch gewonnen werden können. Stoffe, deren Herstellung ausschließlich biotechnisch oder nur in sehr geringen Mengen erfolgt, werden also nicht untersucht. "Neue" (d.h. bislang nicht in industriellem Maßstab hergestellte) Stoffe werden ebenfalls nicht betrachtet, da es in dieser Untersuchung auftragsgemäß auf die Gegenüberstellung von chemisch-technischen und biotechnischen Verfahrensalternativen ankommt. Es werden ferner nur solche Verfahren verglichen, die zu bezüglich ihrer chemischen Struktur identischen Stoffen führen. Es erfolgt also keine Gegenüberstellung von hinsichtlich ihrer Funktion vergleichbaren, aber in ihrer chemischen Struktur unterschiedlichen Produkten.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist stets der Untersuchungsbereich im Auge zu behalten, auf den sich die Aussagen dieser Untersuchung beziehen.

Diese Abgrenzung des Untersuchungsbereichs wurde aus Gründen des Untersuchungsaufwands getroffen und bedeutet keineswegs, daß in den hier nicht untersuchten Bereichen keine nennenswerten Umweltentlastungen durch biotechnische Verfahren zu erwarten sind.

(5) Zunächst wurde der Stand der Entwicklung und großtechnischen Anwendung biotechnischer Verfahren betrachtet (Kapitel 2). Es wurden insgesamt 54 Stoffe aus dem Untersuchungsbereich ermittelt, für deren Herstellung biotechnische Verfahren publiziert sind. Teilweise existieren für einen Stoff mehrere biotechnische Verfahren, die sich in der Regel durch die benutzten Substrate und/oder Mikroorganismen unterscheiden.

Die biotechnischen Verfahren befinden sich auf unterschiedlichen Entwicklungs- bzw. Realisierungsstufen. Diese reichen vom Nachweis der Durchführbarkeit einer biotechnischen Synthese im Labormaßstab über den Pilotmaßstab bis zur praktizierten großtechnischen Produktion. Einige biotechnische Verfahren wurden mit dem Aufkommen der Petrochemie durch chemisch-technische Verfahren ersetzt. Bei verschiedenen Verfahren ist der Entwicklungsstand unklar. In den meisten dieser Fälle ist zu vermuten, daß die Entwicklung nicht weiterverfolgt wird.

Es gibt Hinweise, daß in der Industrie über die veröffentlichten Aktivitäten hinaus weitere Entwicklungen und Planungen biotechnischer Verfahren bzw. Anlagen verfolgt werden, über die jedoch aus legitimen Geheimhaltungsgründen keine näheren Informationen erhältlich sind.

(6) Die heute in industriellem Maßstab sowohl chemisch-technisch als auch biotechnisch produzierten Stoffen aus dem Untersuchungsbereich sind überwiegend Alkohole, organische Säuren, Aminosäuren und Vitamine.

Die biotechnische Herstellungsvariante wurde aus wirtschaftlichen und/oder Marketinggründen gewählt. Letzteres spielt insbesondere bei Aromastoffen eine wichtige Rolle, da biotechnisch hergestellte Aromastoffe als "natürlich" deklariert werden dürfen.

Es gibt Anhaltspunkte für die großtechnische Anwendung biotechnischer Verfahren in verschiedenen Schwellen- und Entwicklungsländern (z.B. China, Südafrika, Indien). Häufig ließen sich diese Hinweise jedoch nicht hinreichend belegen, da solche Fälle oft nicht in der Literatur dokumentiert sind.

(7) Eine Reihe von Feinchemikalien wird ausschließlich biotechnisch hergestellt (Lysin, Glutaminsäure, Carnitin, Itaconsäure, Sorbinsäure, Vitamin B₁₂). Solche Stoffe sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

(8) Es sind nur wenige Fälle von konkreten Planungen für die großtechnische Nutzung weiterer biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Stoffen aus dem Untersuchungsbereich bekannt (Indigo, Niacinamid und Vitamin C). Die angekündigte biotechnische Herstellung von Glycerin ist angesichts der Gegebenheiten auf dem Glycerinmarkt nur bedingt glaubwürdig.

(9) Zahlreiche biotechnischen Verfahren befinden sich im Entwicklungsstadium. Der Entwicklungsstand variiert von der Verfahrensentwicklung im Labor bis zur Pilotanlage (Optimierung des Prozesses, Klärung verfahrenstechnischer Details). Einige der Verfahren sind bei der Verfahrensentwicklung stehengeblieben, werden also nicht weiterverfolgt.

Es ist zu vermuten, daß gerade im Bereich höherwertiger Feinchemikalien geheime Verfahrensentwicklungen erfolgen.

(10) Bei den Grundchemikalien, für die es biotechnische Verfahren gibt, handelt es sich überwiegend um sauerstoffhaltige Stoffe (z.B. Alkohole, organische Säuren). Im Bereich chlorhaltiger Stoffe wurde nur für Epichlorhydrin ein biotechnisches Verfahren identifiziert. Es gibt einige nicht chlorhaltige, biotechnisch herstellbare Stoffe, deren chemisch-technische Herstellung Chlor involviert (z.B. Propylenoxid, L-Phenylalanin).

(11) Einige Verfahren nutzen gentechnische Methoden zur Modifikation der Organismen oder zur Herstellung der benötigten Enzyme. Hierbei sind zwei Fälle zu unterscheiden: Es gibt Verfahren, für welche gentechnischer Methoden zur Nutzung nicht natürlicher Stoffwechselwege der betreffenden Organismen unabdingbar ist, wie z.B. bei Adipinsäure. Ferner können gentechnische Methoden zur Optimierung klassisch-biotechnischer Verfahren benutzt werden.

(12) Insgesamt kann festgehalten werden: Bei der Herstellung von Grund- und Feinchemikalien konkurrieren biotechnische mit chemisch-technischen Herstellungsverfahren. Die jeweils vorteilhafte Variante ist aus der Sicht der Unternehmen eine Frage der Optimierung unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten und ändert sich im Zeitverlauf mit sich wandelnden Rahmenbedingungen (z.B. politische Auflagen, Rohstoffkosten, technische Entwicklungen). Belege hierfür sind:

- ☐ Einige Stoffe werden ausschließlich biotechnisch hergestellt.
- ☐ Es gibt Stoffe, die chemisch so günstig hergestellt werden, daß die Entwicklung eines biotechnischen Verfahrens ökonomisch uninteressant ist (z.B. Glycin, Harnstoff).
- ☐ Es gibt Stoffe, deren biotechnische Gewinnung im Vergleich zur Extraktion ökonomisch uninteressant ist, solange der pflanzliche Rohstoff in ausreichenden Mengen verfügbar ist (z.B. der Farbstoff Carthamin)
- ☐ Einige biotechnische Verfahren zur Herstellung von Grundchemikalien hatten in der Vergangenheit industrielle Bedeutung, konnten aber mit dem Aufkommen der Petrochemie allenfalls in Nischen bestehen (z.B. Aceton/Butanol). Es gab also in der Vergangenheit bereits eine gewisse Konkurrenz der Verfahren, die in einigen Fällen schließlich zu einer Substitution biotechnischer durch chemisch-technischer Verfahren führte.

(13) Welche Umweltentlastungen sind durch den Einsatz biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien zu erwarten? Zur Klärung dieser Frage wurden insgesamt 23 umweltrelevante chemisch-technische Synthesen den entsprechenden biotechnischen Verfahren gegenübergestellt (Kapitel 3).⁸⁸ Die Ermittlung des Umweltentlastungspotentials durch den Einsatz dieser biotechnischen Verfahren erfolgt durch eine vergleichende ökologische Wirkungsabschätzung auf der Basis der über die Literatur zugänglichen Informationen. Diese Informationen sind überwiegend qualitativer Natur. Es wurden keine Ökobilanzen (bestehend aus Sachbilanz/Wirkungsermittlung/Bewertung) angestrebt, schon weil dies aufgrund der erforderlichen Primärdatenerhebungen den Rahmen der Studie bei weitem überstiegen hätte.

(14) Nur wenige der zu vergleichenden biotechnischen Verfahren werden heute bereits großtechnisch angewendet. Bei Verfahren in frühen Entwicklungsstadien sind die Möglichkeiten zur Ermittlung der Umweltwirkungen begrenzt: Es sind allenfalls überschlägige Abschätzungen der Umweltwirkungen möglich, da viele entscheidende verfahrenstechnische Details erst im Zuge der Übertragung auf den großtechnischen Maßstab ("Scale up") festgelegt werden. Die hier vorgenommene ökologische Wirkungsabschätzung besteht in einem überwiegend qualitativen Vergleich auf der Basis der Verfahrensprinzipien (Eingangsstoffe, Reaktionsbedingungen, Ausbeuten etc.) und der involvierten Stoffe.

Die ökologische Wirkungsabschätzung berücksichtigt die Wirkungskategorien Human-toxizität, Ökotoxizität, aquatische und terrestrische Eutrophierung, Naturraumbeanspruchung, photochemische Oxidantienbildung (Beitrag zum Sommersmog), Abbau stratosphärischen Ozons, Treibhauswirkung, Versauerung sowie den Verbrauch fossiler Rohstoffe.

(15) Es zeigt sich, daß biotechnische Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien im Vergleich zu chemisch-technischen Synthesen häufig umweltseitige Vorteile bieten. Diese bestehen überwiegend im Bereich der Schonung fossiler Rohstoffe, die bei vielen chemisch-technischen Verfahren als Feedstock und zur Erzeugung der erforderlichen Prozeßenergie benötigt werden, sowie im reduzierten Einsatz gefährlicher Stoffe.

Hinsichtlich Emissionen toxischer Stoffe im bestimmungsgemäßen Betrieb haben biotechnische Verfahren insbesondere dann Vorteile, wenn sie auf im chemisch-technischen Verfahren benötigte toxische Stoffe verzichten. Entsprechendes gilt für toxische Abfälle.

Auch biotechnische Verfahren benötigen Prozeßenergie – insbesondere zur Isolation und Aufbereitung der Produkte. Häufig ist der Prozeßenergiebedarf jedoch geringer als bei den entsprechenden chemisch-technischen Verfahren. In diesen Fällen sind die biotechnischen

⁸⁸ Die Verfahren sind in Anhang 1 charakterisiert

Verfahren auch mit einer Reduktion der CO₂-Emissionen aus der Energieumwandlung verbunden.

(16) Insgesamt sind die spezifischen (pro Mengeneinheit Produkt betrachteten) Umweltvorteile in aller Regel umso deutlicher, je komplexer das chemisch-technische Herstellungsverfahren ist: Vielstufige chemisch-technische Synthesen sind zumeist mit (im Verhältnis zur Menge des gewünschten Produkts) großen Stoffströmen verbunden ("E-Faktor", vgl. Kap. 5).

Damit sind die spezifischen Umweltvorteile biotechnischer Verfahren im Bereich der Feinchemikalien zumeist größer als bei Grundchemikalien. Es ist zu beachten, daß die Herstellungsmengen von Feinchemikalien in der Regel deutlich unter denen von Grundchemikalien liegen.

(17) Mikrobiologische Verfahren sind fast immer mit großen Stoffströmen verbunden: Häufig ist die Konzentration der Produkte in der Fermentationsbrühe gering, und es entstehen unerwünschte, häufig nicht sinnvoll verwertbare Nebenprodukte (z.B. verdünnte organische Säuren), vgl. Kapitel 4.1.

Ferner fallen bei biotechnischen Verfahren – abhängig von Substrat und Verfahrenstechnik – oft große Mengen Reststoffe an. Die prinzipielle biologische Abbaubarkeit dieser Reststoffe darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß die Verwertung biologischen Materials als Dünger – dies zeigt auch das Beispiel Gülleverwertung – aufgrund der Stickstoff- und Phosphorfrachten umweltseitig nicht immer unproblematisch ist. Die Verwertung der Reststoffe in Biogasanlagen ist häufig unwirtschaftlich. Eine Verwertung von Reststoffen als Viehfutter ist aufgrund beschränkter Aufnahmekapazitäten nicht grundsätzlich zu gewährleisten.

(18) Viele der betrachteten biotechnischen Verfahren benutzen landwirtschaftlichen Erzeugnisse (in der Regel Stärke oder Zucker) als Substrate. Sofern diese eigens für die Produktion von Chemikalien angebaut werden, resultieren in der Regel zusätzliche Umweltbelastungen hinsichtlich terrestrischer und aquatischer Eutrophierung aufgrund der Düngung. Die genaue Art und der Grad der Belastung hängen natürlich von den benutzten Pflanzen, den Anbaumethoden und der Verwertung landwirtschaftlicher Nebenprodukte ab.

Ferner ist der Anbau nachwachsender Rohstoffe in der Regel mit dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln sowie mit einer Beanspruchung von Naturraum (im Sinne von Flächenbedarf) verbunden. In Industrieländern mit hochentwickelter Landwirtschaft steht der Anbau nachwachsender Rohstoffe nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelgewinnung, sondern zur Rückführung bislang landwirtschaftlich genutzter Flächen in "naturnahe" bzw. "natürliche", nicht bewirtschaftete Räume.

Angesichts der Überproduktion von Nahrungsmitteln in Westeuropa und des zu erwartenden weiteren Anstiegs der landwirtschaftlichen Produktivität (Ertrag pro Hektar) könnte ein weiter-

gehender einheimischer Anbau nachwachsender Rohstoffe als Substrate für die biotechnische Herstellung von Chemikalien dauerhafte Beschäftigungsperspektiven für die Landwirtschaft eröffnen.

(19) Hinsichtlich der Einsparung knapper fossiler Rohstoffe durch Nutzung nachwachsender Rohstoffe für die Herstellung von Chemikalien ist folgendes zu bemerken: In Deutschland werden knapp 10% der fossilen Rohstoffe zur Herstellung von Chemikalien eingesetzt (nicht-energetischer Verbrauch). Die Verwendung nachwachsender Rohstoffe zur Produktion von Chemikalien leistet einen Beitrag zur Ressourcenschonung, wenngleich dieser im Vergleich zu den bei der energetischen Nutzung (Verkehr, Gebäudeheizung etc.) vorhandenen Einsparpotentialen gering ist. Eine verstärkte Nutzung heimischer nachwachsender Rohstoffe könnte längerfristig auch die Importabhängigkeit von petrochemischen Rohstoffen reduzieren. Geopolitisch gewinnt dieser Aspekt mit der zu erwartenden zunehmenden Konzentration der verbleibenden Ölreserven in politisch instabilen Regionen an Bedeutung (siehe Exkurs in Kapitel 5).

(20) Bei der näheren Betrachtung der Voraussetzungen für einen weitergehenden Einsatz biotechnischer Verfahren ist zwischen Fein- und Grundchemikalien zu unterscheiden, da die Voraussetzungen und Hemmnisse für diese Gruppen stark unterschiedlich sind. Dies liegt letztlich in der normalerweise komplexeren chemischen Struktur von Feinchemikalien begründet, welche komplexere, in der Regel vielstufige chemisch-technische Prozesse erfordert. Dies wiederum bedingt einen höheren technischen Aufwand, der entsprechende Kosten nach sich zieht. Fein- und Grundchemikalien lassen sich aus diesem Grund auch über den Produktpreis abgrenzen, der bei Feinchemikalien über ca. 2 bis 5 DM pro Kilogramm liegt.

(21) Bei Grundchemikalien werden bis zu 80% der Herstellungskosten durch den Preis der Rohstoffe bestimmt. In solchen Fällen mit geringer Wertschöpfung bzw. geringem Veredelungsgrad müßten die Rohstoffe für die biotechnische Produktion deutlich billiger sein als die bei chemisch-technischer Herstellung eingesetzten fossilen Rohstoffe, um Verfahrensumstellungen wirtschaftlich zu rechtfertigen.

Fossile Rohstoffe sind jedoch auf absehbare Zeit (insbesondere innerhalb der Abschreibungszeiträume neuer Anlagen) voraussichtlich zuverlässig verfügbar. Ihr Preis reflektiert die Endlichkeit fossiler Rohstoffe ebenso wenig wie die externen Kosten ihrer Gewinnung und Verarbeitung. Auch nach dem bis zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Untersuchung (März 2000) zu verzeichnenden Anstieg der Röhölpreise ist noch nicht ein Preisniveau erreicht, das zu einem Umstieg von chemisch-technischen Verfahren auf biotechnische Verfahren motiviert.

Bei einem Weltmarktpreis von 0,50 DM pro Kilogramm Zucker (als typisches Substrat) sind auch bei hohen Ausbeuten nur selten Herstellungskosten von deutlich unter 2 DM pro Kilo-

gramm Produkt realisierbar (siehe Fallbeispiel 1,3-Prooandiol in Kapitel 4.2). Schon diese einfache Betrachtung (ohne Berücksichtigung anderer Kostenkomponenten und sonstiger Aspekte) impliziert, warum Grundchemikalien bislang nur in geringem Umfang biotechnisch produziert werden. Ausnahmen bestehen insbesondere dort, wo neben den Kosten noch andere Gesichtspunkt einfließen, z.B. lebensmittelrechtlicher Art.

(22) Für Feinchemikalien stellen sich kostenseitige Situation und Beweggründe für die Nutzung (oder Nicht-Nutzung) biotechnischer Verfahren anders dar. Hier kommt insbesondere hinzu, daß bei komplexen Molekülen biotechnische Verfahren häufig einfacher sind als das jeweilige chemisch-technische Pendant (siehe Fallbeispiel Vitamin C in Kapitel 4.3).

(23) Das wichtigste Hemmnis, das einer weiteren Verbreitung biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien entgegensteht, ist der Startvorteil bestehender Anlagen: Erfolgreich praktizierte Verfahren haben den Vorteil der nachgewiesenen Zuverlässigkeit und Produktqualität. Der Forschungs- und Entwicklungsaufwand ist bereits geleistet und in der Regel auch betriebswirtschaftlich abgeschrieben (vgl. Kapitel 5).

Bei biotechnischen Verfahren besteht häufig noch großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Diesen scheuen Unternehmen, wenn der Nutzen nicht unmittelbar absehbar und kalkulierbar ist: Zukünftige Vorteile biotechnischer Verfahren sind mit möglichen Risiken der Verfahrensentwicklung und -umstellung abzuwägen und daher weniger attraktiv als gegenwärtige Vorteile bestehender Verfahren. Es ist in den Unternehmen eine Tendenz zur Orientierung an kurzfristigem Nutzen zu beobachten. Erst längerfristig erfolgversprechende Entwicklungen werden aus wirtschaftlichen Gründen seltener verfolgt.

(24) Hinzu kommt, daß die chemisch-technischen Verfahren parallel weiterentwickelt werden (z.B. hinsichtlich Katalysatoren). Heute in Entwicklung befindliche biotechnische Verfahren konkurrieren zum Zeitpunkt ihrer großtechnischen Einsatzreife daher mit optimierten chemisch-technischen Verfahren.

(25) Zur Herstellung von Grundchemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen sind entsprechende Mengen und Qualitäten davon (ganzjährig!) erforderlich. Die benötigten Mengen nachwachsender Rohstoffe können nicht überall durch inländische Produktion zu niedrigen (Weltmarkt-)Preisen erzeugt werden. Bei Import (zu Weltmarktbedingungen) ergeben sich möglicherweise ethische Konflikte mit der Nahrungsgewinnung in den Erzeugerländern (sofern diese von Nahrungsmittelknappheit betroffen sind, aber zur Erwirtschaftung von Devisen dennoch landwirtschaftliche Produkte exportieren).

(26) Neben der Beschaffung der Rohstoffe schränken die anfallenden Reststoffe die Kapazität von Anlagen zur biotechnische Produktion von Grundchemikalien ein, da die Auf-

nahmekapazitäten für eine Verwertung als Viehfutter oder Dünger in der Regel beschränkt sind. Sinnvoll dürften in Europa Jahreskapazitäten in der Größenordnung 10.000 Jahrestonnen sein (vgl. Fallbeispiel Aceton/Butanol, Kapitel 4.1). Chemisch-technische Anlagen zur Herstellung von Grundchemikalien haben oft Kapazitäten von über 100.000 Jahrestonnen. Biotechnische Anlagen werden diese Dimensionen in absehbarer Zeit nicht erreichen und können demnach keine Größenvorteile ("Economies of scale") realisieren. Daraus resultiert ein weiterer Kostennachteil biotechnischer Verfahren.

(27) Eine Substitution von chemisch-technischen Produktionsanlagen vor Ablauf des Abschreibungszeitraums bedeutete einen Vermögensverlust für das Unternehmen in Höhe des noch nicht abgeschriebenem Wiederbeschaffungswertes. Ein biotechnisches Verfahren muß, um vorzeitig ein bestehendes chemisch-technisches Verfahren abzulösen, sehr deutliche Kostenvorteile erwarten lassen. In einigen Fällen trifft dies tatsächlich zu (z.B. Vitamin B₂).

Nach Abschreibung bestehender Anlagen wird "am goldenen Ende" produziert – die Investition hat sich amortisiert, es ist kein Kapitaldienst (Abschreibung und Zinsen) mehr erforderlich. Bei einer Verfahrensumstellung in diesem Stadium entfielen diese Vorteile für die Unternehmen. Allerdings ist eine Umstellung nach Abschreibung der bestehenden Anlagen zumindest ökonomisch zumutbar.

(28) In der Literatur wird als wichtiges Hemmnis, das dem weitergehenden Einsatz biotechnischer Verfahren häufig entgegensteht, die historische Prägung der chemischen Industrie (bzw. der Mitarbeiter der Unternehmen) von den Methoden der organischen Chemie, die sich grundsätzlich von biotechnischen Methoden unterscheiden, genannt (siehe Kapitel 5). Dies drückt sich u.a. in den verfügbaren Laborausstattungen und in den Denkstrukturen, Arbeitsweisen und Qualifikationen der Mitarbeiter aus.⁸⁹ Hinzu kommen u.U. Berührungängste zwischen Chemikern und Biologen oder Biotechnikern. Auch solche diffusen, nicht objektiv erscheinenden Gründe können die Anwendung biotechnischer Verfahren hemmen.

(29) Ein häufig vorgebrachtes Argument im Zusammenhang mit der Umstellung von Verfahren ist die Einbindung bestehender Anlagen in einen komplexen Produktionsverbund mit anderen Anlagen, der sich nicht ohne weiteres entflechten ließe.

Dies ist bei kurzfristiger Perspektive nicht von der Hand zu weisen. Anders stellt es sich bei mittel- bis langfristiger Betrachtung dar: Die Rückwirkungen auf den Produktionsverbund durch kurz- und langfristige, marktbedingte Absatzschwankungen sind vermutlich größer als die Wirkungen längerfristiger (langsamer) Produktionsumstellungen. Ferner enthält die

⁸⁹ Daraus resultiert entsprechender Fortbildungsbedarf für Chemiker.

Geschichte der chemischen Industrie eine Fülle von Beispielen bewältigter (wirtschaftlich motivierter) Verfahrensumstellungen. Dies relativiert das Bild des uhrwerkartigen Zusammenspiels innerhalb des Produktionsverbunds, das keinerlei "Schlupf" erlaubt (d.h., daß ein Produktionsverbund durchaus eine gewisse Flexibilität erlaubt und keineswegs bereits durch kleine Änderungen aufgebrochen wird).

(30) Es ist aus der Betrachtung der Fallbeispiele (Kapitel 4) nicht erkennbar, daß in Deutschland juristische Gründe der Anwendung biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Chemikalien entgegenstehen. Dies gilt nach Einschätzung von Experten auch für gentechnische Anlagen. Die vorhandenen Regelungen bieten – soweit dies anhand der hier untersuchten Fallbeispiele beurteilbar ist – ausreichend Vorsorge bzw. Schutz vor den mit biotechnischen Verfahren zur Herstellung von Chemikalien verbundenen potentiellen Umweltwirkungen.

Solange die biotechnische Herstellung von Grund- und Feinchemikalien in Deutschland nur vereinzelt erfolgt, erübrigt sich die Frage, ob eine Bündelung und Systematisierung der bestehenden Regelungen erforderlich und sinnvoll ist.

(31) Die Perspektiven biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grund- und Feinchemikalien lassen sich angesichts des Gesagten aus heutiger Sicht wie folgt charakterisieren:

☐ Eine selbsttätige Substitution chemisch-technischer durch biotechnische Verfahren ist nur in solchen Fällen zu erwarten, in denen das biotechnische Verfahren deutliche Kostenvorteile aufweist. Hier sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Die Wahl des Verfahrens bei Errichtung neuer Kapazitäten bzw. Ersetzung ausgedienter Anlagen
2. Die Ersetzung bestehender, funktionstüchtiger chemisch-technischer Anlagen.

Eine Substitution bestehender chemisch-technischer Anlagen erfolgt nur dann, wenn deutliche Kostenvorteile den Umstellungsaufwand (Kosten und mit der Umstellung verbundene Risiken, z.B. hinsichtlich Anlagenverfügbarkeit und Produktqualität) rechtfertigen.

☐ Im Bereich Grundchemikalien sind biotechnische Verfahren heute bei Berücksichtigung der Entwicklungs- und Substratkosten wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig. Dies wird kurz- bis mittelfristig so bleiben. Die biotechnische Produktion von Grundchemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen würde auf absehbare Zeit eine (direkte oder indirekte) Subventionierung erfordern, die nicht immer mit dem derzeitigen politischen Umfeld (Subventionsabbau, liberalisierter Welthandel) vereinbar ist.

- ❑ Die spezifischen Vorteile biotechnischer Verfahren (z.B. enantiomerenreine Produkte, Reduktion der Menge toxischer Abfälle) kommen bei den Grundchemikalien selten zur Geltung. Damit treten die spezifischen Nachteile im Vergleich zu chemisch-technischen Synthesen (z.B. geringe Produktkonzentrationen mikrobiologischer Verfahren) hier deutlicher zutage.
- ❑ Ist die Entwicklung biotechnischer Verfahren einmal geleistet und bezahlt, können sie bei Produktpreisen ab ca. 2 DM/kg wirtschaftlich konkurrenzfähig sein. Dies gilt insbesondere bei ohnehin anstehenden Neuinvestitionen für Anlagen.
- ❑ Das Potential biotechnischer Verfahren zur Herstellung von Grundchemikalien liegt in Europa auf absehbare Zeit in der Nutzung von Reststoffen anderer Prozesse als Substrate (z.B. Rohglycerin aus der Fettspaltung, Abwässer aus der Zucker- und Stärkeverarbeitung). Dies hat ökologische und ökonomische Vorteile. Das Potential an geeigneten Reststoffen und die bisherigen Verwertungs- und Entsorgungswege wären noch im einzelnen zu ermitteln.

Ein überaus großes Substratpotential könnte durch Nutzbarmachung von Cellulose (z.B. aus Stroh) eröffnet werden. Hierfür wären geeignete Verfahren zum Aufschluß der Cellulose zu entwickeln bzw. die direkte Verwertbarkeit durch Mikroorganismen mittels gentechnischer Veränderungen zu ermöglichen.

- ❑ Der Einsatz gentechnischer Methoden zur Steigerung der Ausbeute oder zur Erschließung neuer Stoffwechselwege ermöglicht teilweise erhebliche Optimierungen oder gar völlig neuartige biotechnische Verfahren und steigert so die Attraktivität biotechnischer Verfahren.

(32) Es ist sinnvoll, durch Kombination chemischer mit biotechnischen Schritten in mehrstufigen Prozessen die jeweils spezifischen Vorteile auszureizen (vgl. Fallbeispiel VitaminC, Kapitel 4.3). Gerade im Bereich der Feinchemikalien, die oftmals über mehrstufige Synthesen gewonnen werden, liegt ein Potential für den Ersatz einzelner chemisch-technischer Stufen durch (in der Regel enzymatische) Schritte. Es kann davon ausgegangen werden, daß solche Kombinationen oftmals mit Kostenvorteilen verbunden sind.

(33) Biotechnische Verfahren zur Herstellung von Chemikalien könnten für Schwellen- und Entwicklungsländer, die über verwertbare Reststoffe (z.B. aus der Zuckerverarbeitung) oder große Anbauflächen für Substrate verfügen, interessant sein. Sie könnten zur Verringerung der Importabhängigkeit und damit zur Verbesserung der Handelsbilanz beitragen. Eine biotechnische Produktion von Grundchemikalien zum Zwecke des Exports bietet aufgrund anhaltend geringer Weltmarktpreise auch mittelfristig nur geringe Perspektiven.

Die erforderliche Wissensstruktur ist historisch bedingt in Schwellen- und Entwicklungsländern gerade bei mikrobiologischen Verfahren häufig grundsätzlich gegeben. Im Sinne

eines Transfers von den örtlichen Gegebenheiten angepaßter Technologie besteht ein entwicklungspolitisches Potential biotechnischer Verfahren.

(34) Hinsichtlich der Anbauflächen besteht in vielen Ländern langfristig angesichts der weiter wachsenden Weltbevölkerung und der vielfach zu beobachtenden Bodendegradation eine Konkurrenz zwischen der Erzeugung nachwachsender Rohstoffe und der Nahrungsmittelgewinnung. Da die Nahrungsmittelgewinnung jedoch nicht zugunsten der Erzeugung nachwachsender Rohstoffe eingeschränkt werden darf, bleiben die Möglichkeiten zur Erzeugung nachwachsender Rohstoffe in solchen Ländern beschränkt.

(35) Im Bereich der biotechnischen Herstellung von Stoffen besteht vielfältiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei der Grundlagenforschung (Entwicklung von Prozessen), der Prozeßoptimierung, der Übertragung auf den großtechnischen Maßstab und der Begleitforschung. Der F&E-Bedarf konzentriert sich im wesentlichen auf

- Die Überwindung der spezifischen technischen Schwierigkeiten enzymatischer und mikrobiologischer Verfahren.
- Die Erhöhung der Ausbeuten, Umsetzungsraten, Produktivitäten und Produktkonzentrationen bei gleichzeitiger Minimierung des Anfalls unerwünschter Nebenprodukte und Reststoffe mikrobiologischer Verfahren.
- Scale up-Probleme: Nutzung von Nebenprodukten und Reststoffen, Minderung der Emissionen, Beherrschung des Infektions- und Kontaminationsrisikos für die Produktionsstämme mikrobiologischer Verfahren.
- Die Ermittlung der tatsächlich anfallenden Mengen an Reststoffen aus industriellen Prozessen, die sich als Substrate für biotechnische Verfahren eignen (Milch-, Zucker-, Stärkeverarbeitung, Fettspaltung etc.).
- Die Identifikation von Fortbildungsbedarf für Chemiker sowie die Ausarbeitung entsprechender Konzepte.

Für die Produktisolation und -aufbereitung sowie für die Meß-, Steuer- und Regelungstechnik werden üblicherweise nicht biotechnik-spezifische Methoden eingesetzt. Hier sind einzelfall-bezogene Optimierungen – insbesondere bzgl. Produktqualität, Energiebedarf und Kosten – notwendig.

(36) Die Unternehmen betreiben die Entwicklung und Anwendung biotechnischer Verfahren nur dort vollständig aus eigenen Mitteln, wo kosten- oder marketingseitige Vorteile zu erwarten sind. Soll die Verbreitung umweltschonender biotechnischer Verfahren gezielt gefördert werden, besteht bei von den Unternehmen als nicht ökonomisch vorteilhaft eingeschätzten Verfahren Förderungsbedarf seitens der öffentlichen Hand (siehe Kapitel 6). Der

Zweck solcher unter finanzieller Eigenbeteiligung Unternehmen durchgeführter Demonstrationsvorhaben besteht in:

- ☐ Dem Aufzeigen des tatsächlichen Umweltentlastungspotentials (bei noch nicht großtechnisch realisierten Verfahren lassen sich die erreichbaren Umweltentlastungen nur im Sinne von Entlastungspotentialen abschätzen. Eine Verifikation erfordert letztlich die konkrete großtechnische Umsetzung).
- ☐ Dem Nachweis der Machbarkeit in technischer, organisatorischer u.a. Hinsicht (dies ist der beste Weg, um dem Argument "Das geht nicht" zu begegnen).
- ☐ Der Lösung von praktischen Problemen im Zuge des Scale up.
- ☐ Der Identifikation von Optimierungsbedarf.

(37) Verfahren, die ansonsten zu entsorgende Reststoffe bzw. nicht ohne weiteres verwertbare Nebenprodukte anderer Prozesse als Substrate verwerten können, sollten besonders gefördert werden. Geförderte Verfahren sollten möglichst wenige nicht sinnvoll verwertbare Nebenprodukte und Reststoffe erzeugen. Es sind nur solche Verfahren zu fördern, die zumindest mittel- bis langfristig einen wirtschaftlichen Betrieb ohne dauerhafte Subventionen erwarten lassen.

Knappe öffentliche Mittel dürfen nicht zur Finanzierung von ökonomisch für die beteiligten Unternehmen ohnehin lukrativen Aktivitäten verwendet werden. Bei den hier untersuchten Grund- und Feinchemikalien ist die Gefahr von unerwünschten (aber nicht immer vermeidbaren) Mitnahmeeffekten eher gering.

(38) Von den untersuchten Fallbeispielen erscheinen den Autoren dieses Berichts die Verfahren zur Herstellung von Aceton/Butanol und 1,3-Propandiol für Demonstrationsprojekte geeignet. Dies ergibt sich insbesondere aus dem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, der Nutzbarkeit vorhandener Infrastruktur (im Fall Aceton/Butanol), der Nutzung von Reststoffen als Substrate und dem Umweltentlastungspotential (bei entsprechender Ausgestaltung des Verfahrens im Zuge des Scale up). Im Fall 1,3-Propandiol bestehen ferner sehr gute Vermarktungschancen ohne langfristigen Subventionsbedarf.

Literatur

- AbwV** Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwVO). In: Beck 1999b
- Assis 1998** H.M.S. Assis et al.: Synthesis of chiral epihalohydrins using haloalcohol dehalogenase A from *Arthrobacter erithii* H10a. *Enzyme and Microbial Technology* 22:545-551, 1998
- Ast 1998** A. Ast, D. Sell: Einsatz von gentechnisch veränderten Organismen zur Verringerung von Umweltbelastungen. Umweltbundesamt TEXTE 80/98. Berlin 1998
- Becher 1995** G. Becher et al.: Wirkungsanalyse zum Programm "Förderung der Biotechnologie in der Wirtschaft". Untersuchung der Arbeitsgemeinschaft Prognos AG, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Forschungsagentur Berlin im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie. Basel 1995
- Becher 1996** G. Becher et al.: Kommerzielle Biotechnologie – Umsatz und Arbeitsplätze 1996-2000. Untersuchung der Prognos AG im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie. Basel 1995
- Becher 1997** G. Becher et al.: Kommerzielle Bio- und Gentechnik in Nordrhein-Westfalen. Untersuchung der Prognos AG im Auftrag des Wissenschaftszentrums Nordrhein-Westfalen. Basel 1995
- Beck 1999a** Abfallrecht. Beck-Texte im DTV. 5. Auflage 1999
- Beck 1999b** Umweltrecht. Beck-Texte im DTV. 12. Auflage 1999
- Berger 1995** R.G. Berger: Aroma Biotechnology. Berlin 1995
- Berger 1997** E. Berger et al.: Biotechnologische Produktion von Chemikalien – Vorteile für die Umwelt. *Neue Zürcher Zeitung* 5.3.1997
- Berry 1996** A. Berry: Improving production of aromatic compounds in *Escherichia coli* by metabolic engineering. *Tibtech* July 1996 (Vol. 4), p. 250-256
- Beyer 1998** W. Beyer: Lehrbuch der organischen Chemie. Stuttgart 1998

BG Chemie 1997	Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (BG Chemie): Unfallverhütungsvorschrift 102 – Biotechnologie (VBG 102). Fassung vom 1. Januar 1997. Heidelberg 1997
BG Chemie 1998	Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie (BG Chemie): Eingruppierung biologischer Agenzien: Bakterien (B006). Heidelberg 1998
BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luft- verunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vor- gänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG). In: Beck 1999b
BioAbfV	Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaft- lich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfall- verordnung – BioAbfV). In: Beck 1999b
BioStoffV	Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen (Biostoffverordnung – BioStoffV). Bundesrat Drucksache 754/98
BMBF 1997a	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) [Hrsg.]: Biotechnologie, Gentechnik und wirt- schaftliche Innovation. Feststellungen und Empfehlungen des Rats für Forschung, Technologie und Innovation. Bonn 1994
BMBF 1997b	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) [Hrsg.]: Biotechnologie, Gentechnik und wirtschaftliche Innovation. Rechtliche Grundlagen im Überblick – Bestandsaufnahme, Vollzugsprobleme, Vergleich. Ergänzung zum Bericht des Rats für Forschung, Technologie und Innovation. Bonn 1994
BML 1993	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BML) [Hrsg.]: Technikfolgenabschätzung zum Thema Nach- wachsende Rohstoffe. Bonn 1993
BML 1996	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BML): Nachwachsende Rohstoffe – Konzept der Bundesregierung zur Förderung von Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrations- vorhaben 1996 - 2000. Bonn 1996
BML 1997	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (BML) [Hrsg.]: 5. Symposium Nachwachsende Rohstoffe – Perspektiven für die Chemie. Bonn 1997

BMU 1996	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Beiträge der Biotechnologie zu einer nachhaltigen, umweltgerechten Entwicklung. Tagungsband des Fachgesprächs vom 17.12.1996. Bonn 1996
BMU 1997	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Richtlinie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Förderung von Investitionen mit Demonstrationscharakter zur Verminderung von Umweltbelastungen vom 04. Februar 1997. Bonn
BNatSchG	Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz – BNatSchG). In: Beck 1999b
Boudrant 1990	J. Boudrant: Microbial processes for ascorbic acid biosynthesis: a review. Enzyme Microb. Technol., 1990, vol. 12, May
Brink 1998	L.E.S. Brink et al.: Biocatalysis in organic media. Enzyme Microb. Technol., 1998, vol. 10, December, 736-743
Bruns 1996	M. Bruns et al.: Forschung und Entwicklung – Beschäftigungs- und Standortsicherung in der Chemischen Industrie. Untersuchung der Prognos AG im Auftrag der Hans-Böckler-Stiftung. Basel 1996
BSeuchG	Gesetz. zur Verhütung und Bekämpfung übertragbarer Krankheiten beim Menschen – Bundes-Seuchengesetz (BSeuchG)
BUA 1992	Beratergremium für umweltrelevante Altstoffe (BUA) [Hrsg.]: BUA-Stoffbericht Nr. 68 – Adipinsäure. Weinheim 1992
BUA 1995	Beratergremium für umweltrelevante Altstoffe (BUA) [Hrsg.]: BUA-Stoffbericht Nr.157 – Acrolein (2-Propenal). Stuttgart 1995
BUA 1996	Beratergremium für umweltrelevante Altstoffe (BUA) [Hrsg.]: BUA-Stoffbericht Nr.170 – Aceton. Stuttgart 1996
Bundesregierung 1998	Bundesregierung: Bericht der Bundesregierung zur Umsetzung der Empfehlungen des Rates für Forschung, Technologie und Innovation zum Thema "Biotechnologie, Gentechnik und wirtschaftliche Innovation – Chancen nutzen und verantwortlich gestalten". Bundestagsdrucksache 13/9811. Bonn 1998
Busche 1995	R.M. Busche: Chemicals from Renewable Sources. In: R.M. Busche et al. [Eds.]: Biotechnology – Opportunities for Innovation. Lancaster, Pennsylvania 1995

- Cabral 1994** J.M.S. Cabral et al. [Eds.]: Applied Biocatalysis. Chur 1994
- Cheetham 1994** P.S.J. Cheetham: Case studies in applied biocatalysis – From ideas to products. In: Chabral 1994, p. 47-108.
- ChemG** Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Chemikaliengesetz – ChemG). In: Beck 1999b
- Chenier 1992** P.J. Chenier: Survey of industrial chemistry. Weinheim 1992
- Ciba Foundation 1985** Ciba Foundation Symposium 111: Enzymes in organic synthesis. London 1985
- DECHEMA 1994** Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA): Materialien und Basisdaten für gentechnische Arbeiten und für die Errichtung und für den Betrieb gentechnischer Anlagen. Band 4.1: Regelwerke mit Bezug zum Umweltschutz. Band 4.2: Technische und organisatorische Maßnahmen für die Abfall-, Abwasser und Abluftbehandlung. Frankfurt/M. 1994
- Dellweg 1987** H. Dellweg: Biotechnologie. Weinheim 1987
- DFG 1998** Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): MAK- und BAK-Werte-Liste. Weinheim 1998
- DMG** Düngemittelgesetz (DMG) vom 15.11.1977. Siehe auch BGBl. 1999 I S. 2451
- Draths 1994** K.M. Draths, J.W. Frost: Environmentally Compatible Synthesis of Adipic Acid from D-Glucose. J. Am. Chem. Soc. 1994, 116, p. 399-400
- DüngeMV** Düngemittelverordnung (DüngeMV) vom 4.8.1999. BGBl. I S. 1758
- Dürkop 1999** J. Dürkop, W. Dubbert, I. Nöh: Beitrag der Biotechnologie zu einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung. Umweltbundesamt TEXTE 1/99. Berlin 1999
- Dürre 1998** P. Dürre: New insights an novel developments in *clostridial* acetone/butanol/isopropanol fermentation. Appl. Microbiol. Biotechnol. (1998) 49, p. 639-648
- Eck 1994** R. Eck, H. Simon: Synthesis of (R)-Pantoyl Lactone by Reduction of Ketopantoate with Formate and *Proteus* species. Tetrahedron: Asymmetry Vol. 5, No. 8, p. 1419-1422 (1994)

EG-Richtlinie UPV	Richtlinie des Rates vom 27. Juni 1985 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten (85/337/EWG), geändert durch Richtlinie 97/11/EG vom 3. März 1997
Emsley 1994	J. Emsley: A cleaner way to make nylon. New Scientist 12 th March 1994, p. 15
Feldhaus 1991	G. Feldhaus: Bundesimmissionsschutzrecht. Band 1b, Stand 41. Wiesbaden 1991
FNR 1998	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Jahresbericht 1996/97. Gülzow 1998
FNR 1999	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Jahresbericht 1997/98. Gülzow 1999
Förster 1998	B. Förster: Studie zur Ökologie ausgewählter Mikroorganismen. Umweltbundesamt TEXTE 64/98. Berlin 1998
Friedrich 1993	A. Friedrich et al.: Ökologische Bilanz von Rapsöl bzw. Rapsölmethylester als ersatz für Dieselmotorkraftstoff (Ökobilanz Rapsöl). Umweltbundesamt TEXTE4/93 (Hauptband und Anlageband). Berlin 1993
FMG	Gesetz über die Herstellung, das Inverkehrbringen und die Verwendung von Futtermitteln, Vormischungen und Zusatzstoffen (Futtermittelgesetz, FMG) vom 2.7.1975 (BGBl. I S. 1745) in der Fassung vom 16.7.1998 (BGBl. I S. 1850)
Futtermittelverordnung	Futtermittelverordnung vom 8.4.1981 (BGBl. I. S. 352) in der Fassung vom 19.11.1997 (BGBl. I. S. 2714)
Gapes 1996	J.R. Gapes et al.: Long-Term Continuous Cultivation of <i>Clostridium beijerinckii</i> in a Two-Stage Chemostat with On-Line Solvent Removal. Applied and Environmental Microbiology, Sept. 1996, p. 3210-3219
Gapes 2000	The Economics of Acetone-Butanol-Fermentation: Theoretical and Market Considerations. J. Mol. Microbiol. Biotechnol. (2000) 2(1)
Garg 1995	S.K. Garg, A. Jain: Fermentative Production of 2,3-Butanediol: A Review. Bioresource Technology 51 (1995) 103-109
Gärtner 1999	E. Gärtner: Nachhaltigkeitsdiskurs oder "Green Chemistry"? Europa Chemie 13/99, S. 6

- GefStoffV** Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV). In: Beck 1999.
- Genencor 1998** Genencor International: Partners announce Breakthrough in Production of Chemicals via Biotechnology. Pressemitteilung vom 17.8.1998
- GenTG** Gesetz zur Regelung der Gentechnik (Gentechnikgesetz – GenTG). In: Beck 1999b
- GenTSV** Verordnung über die Sicherheitsstufen und Sicherheitsmaßnahmen bei gentechnischen Arbeiten in gentechnischen Anlagen (Gentechnik-Sicherheitsverordnung – GenTSV). Fassung der Bekanntmachung vom 14.3.1995, BGBl. I S. 297
- Giddings 1990** L.V. Giddings: Biotechnology Regulation in the United States. In: Nicklisch/Schettler [Hrsg.]: Regelungsprobleme der Gen- und Biotechnologie sowie der Humangenetik, S. 79-95. Heidelberg 1990
- Gloede 1993** F. Gloede et al.: Biologische Sicherheit bei der Nutzung der Gentechnik. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Arbeitsbericht Nr. 20. Bonn 1993
- González-López 1993** J. González-López et al.: Production of amino acids by free-living heterotrophic nitrogen-fixing bacteria. Amino Acids (1995) 8: p. 15-21
- Großmann 1998** D. Großmann et al.: Stoffstrom-Managementkonzept für nativ-organische Rückstände – Chancen und Perspektiven für Schleswig-Holstein. Untersuchung im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Natur und Forsten, Kiel 1998
- Hanson 1999** D. Hanson: MTBE – Villain or victim? Chemical and Engineering News, October 18nd 1999, p. 49
- Heinzle 1997** E. Heinzle, K. Hungerbühler: Integrated Process Development: The Key to Future Production of Chemicals. Chimia 51 (1997) 176-183
- Heinzle 1998** E. Heinzle et al.: Ecological and Economic Objective Functions for Screening in Integrated Development of Fine Chemical Processes: 1. Flexible and Expandable Framework Using Indices. Ind. Eng. Chem. Res. 1998, 37, 3395-3407
- Hopp 1987** V. Hopp, I. Hennig: Chemiekompandium. 4. Aufl. Dreieich 1987

- Hoppe 1995** W. Hoppe [Hrsg]: Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) Kommentar. Köln 1995
- Hörath 1997** H. Hörath: Gefährliche Stoffe und Zubereitungen. 5. Auflage. Weinheim 1997
- Hungerbühler 1999** K. Hungerbühler et al.: Chemische Produkte und Prozesse – Grundkonzepte zum umweltorientierten Design. Heidelberg 1999
- Hüsing 1998** B. Hüsing, et al.: Stand der Möglichkeiten von prozeßintegrierten biotechnischen Präventivtechniken zur Vermeidung bzw. Verringerung von Umweltbelastungen. Umweltbundesamt TEXTE 68/98. Berlin 1998
- IVU-Richtlinie** Richtlinie 96/61/EG des Rates über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung. In: Beck 1999b
- Jarass 1995** H.D. Jarass: Bundes-Immissionsschutzgesetz (BimSchG) – Kommentar. München 1995
- Jonas 1998** R. Jonas: Gewinnung von Biochemikalien. In: Gesellschaft für Biotechnologische Forschung mbH (GBF): Wissenschaftlicher Ergebnisbericht 1997. Braunschweig 1998
- Jones 1986** D.T. Jones, D.R. Woods: Aceton-Butanol Fermentation Revisited. In: Microbiological Reviews, Dec. 1986, p. 484-524
- Kaltschmitt 1997** M. Kaltschmitt, G.A. Reinhard [Hrsg.]: Nachwachsende Energieträger – Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung. Braunschweig/Wiesbaden 1997
- Kirk-Othmer** Kirk-Othmer: Encyclopedia of Chemical Technology. Vol. 1-25. 4th Edition. New York 1991-98
- KrW-/AbfG** Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW/AbfG). In: Beck 1999b
- Kulbe 1991** K.D. Kulbe: Cofactor Regeneration in Continuous Enzymatic Synthesis. In: M. Reuss et al. [Eds.]: Biochemical Engineering Stuttgart, p. 18-25. Stuttgart 1991
- Kulbe 1995** K.D. Kulbe: Biokatalytische Verfahren in der chemischen Industrie Österreichs. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie (BMUJF). Wien 1995

- Kulbe 1999** K.D. Kulbe et al.: Reaction Engineering of Coenzyme-dependent Processes for the Synthesis of Carbohydrate Products for the Food and Fine Chemicals Industries. Vortrag INBIO '99. Amsterdam, März 1999
- Landau 1998** R. Landau et al. [Hrsg.]: Chemicals and long-term economic growth – Insights from the Chemical Industry. New York 1998
- Lanzilotta 1974** R.P. Lanzilotta et al.: Microbial Reduction of Ketopantoxyl Lactone to Pantoyl Lactone. Applied Microbiology, Jan. 1974, p. 130-134
- Lázlo 1992** M. Lázlo et al.: The Production of Secondary Metabolites by Plant Cells of *Rubia Tinctorum* Cultivated in Bioreactors. Planta Med. 58, Supplement Issue 1 (1992), p. A613
- Leak 1992** D.J. Leak et al.: The microbial production of epoxides. Tibtech July 1992, 256-261
- Leuchtenberger 1998** A. Leuchtenberger: Grundwissen zur mikrobiellen Biotechnologie. Stuttgart 1998
- Li 1998** K. Li, J.W. Frost: Synthesis of Vanillin from Glucose. J. Am. Chem. Soc. 1998, 120, 10545-10546
- Marchal 1982** R. Marchal: La Fermentation Acétonobutylique – Synthèse Bibliographique et Orientations Actuelles. Revue de l'Institut Français du Pétrole Vol. 37, No. 3, Mai-Juin 1982, p. 389-401
- Mathew 1988** C.D. Mathew et al.: Nitrilase-Catalyzed Production of Nicotinic Acid from 3-Cyanopyridine in *Rhodococcus rhodochrous* J1. Applied and Environmental Microbiology, April 1988, p. 1030-1032
- McCoy 1998a** M. McCoy: Chemical Makers try Biotech Path. Chemical and Engineering News, June 22nd 1998, p. 13
- McCoy 1998b** M. McCoy: Biomass Ethanol Inches Forward. Chemical and Engineering News, December 7th, 1998, p. 29
- Menzel 1998** K. Menzel et al.: Metabolic Engineering der mikrobiellen Produktion von 1,3-Propandiol. In: Gesellschaft für Biotechnologische Forschung mbH (GBF): Wissenschaftlicher Ergebnisbericht 1997. Braunschweig 1998

- Misawa 1990** N. Misawa et al.: Elucidation of the *Erwinia uredovora* Carotenoid Biosynthetic Pathway by Functional Analysis of Gene Products Expressed in *Escherichia coli*. Journal of Bacteriology, Dec. 1990, p. 6704-6712
- Moreau 1994** J.L. Moreau et al.: The Enzymatic Production of Adipic Acid. Biocatalysis, 1994, Vol. 10, pp.235-340
- Morse 1999** P.M. Morse: Taking a measure of sustainability. Chemical and Engineering News, July 26th 1998, p. 19
- Muheim 1999** A. Muheim et al.: Biotechnologisch hergestellte Aromastoffe. Bio World 1/99, S. 2-6
- Murdock 1993** D. Murdock et al.: Construction of Metabolic Operons Catalyzing the *De Novo* Biosynthesis of Indigo in *Escherichia coli*. Bio/Technology Vol. 11 March 1993
- N.N. 1984** N.N.: US institute develops biotech process to make butandiol. European Chemical News, June 4/11, 1984
- N.N. 1986** N.N.: Synthesis of Nylon Raw Materials Using Biotechnology. Chemical Economy & Engineering Review Jan./Feb. 1986 Vol. 18 No. 1-2, p. 35
- N.N. 1994** N.N.: Zucker als Rohstoff für Nylon. Blick durch die Wirtschaft 6.4.1994
- N.N. 1998a** N.N.: Bacteria sing the blues. Chemical and Engineering News, November 23rd, 1998, p. 37
- N.N. 1998b** N.N.: Ketogulonsäure aus Krefeld. Europa Chemie 29/98, S. 6
- N.N. 1998c** N.N.: Propandiol billiger dank Biotechnologie. Europa Chemie 32/98, S. 10
- N.N. 1999** N.N.: Gentechnik-Politik in Europa. Transkript Nr. 3, 1999, S. 15
- N.N. 2000** PET: Aufwärtstrend setzt sich fort. Kunststoff-Information Nr. 1479, 31.1.2000
- Neidleman 1983** S.L. Neidleman, J. Geigert: Biological Halogenation and Epoxidation. Biochem. Soc. Symp. 48, 39-52 (1983)
- Nimcevic 1998** D. Nimcevic, M. Schuster, J.R. Gapes: Solvent production by *Clostridium beijerinckii* NRRL B592 growing on different potato media. Appl. Microbiol. Biotechnol. (1998) 50:426-428

Nolte 1992	R. Nolte, R. Joas: Handbuch Chlorchemie I – Gesamtstofffluß und Bilanz. Umweltbundesamt TEXTE 55/91. Berlin 1992
OECD 1998a	Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): Biotechnology for clean industrial products and processes – Towards industrial sustainability. Paris 1998
OECD 1998b	Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): Industrial Sustainability through Biotechnology. Paris 1998
Oyama 1984	K. Oyama et al.: Enzymatic Production of Aspartame. Enzyme Engineering 7, 434, p. 95-98 (1984)
Phenolchemie 1991	Phenolchemie GmbH: Grunddatensatz Aceton. Stand Oktober 1991. Gladbeck 1991
Präve 1994	P. Präve et al. [Hrsg.]: Handbuch der Biotechnologie. 4. Auflage. München 1994
Prognos 1994	E. Plinke et al. (Prognos AG): Konversion Chlorchemie. Untersuchung im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten. Wiesbaden 1994
Prognos 1999a	K. Kämpf et al. (Prognos AG): Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren. Arbeitspapier zur Vorbereitung des UBA-internen Workshops am 25. Februar 1999 beim Umweltbundesamt in Berlin (1. Projekt-Zwischenbericht). Basel 1999
Prognos 1999b	K. Kämpf et al. (Prognos AG): Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren. Arbeitspapier zur Vorbereitung des Arbeitsgesprächs am 8. Juli 1999 beim Umweltbundesamt in Berlin (2. Projekt-Zwischenbericht). Basel 1999
Rehm 1983	H.-J. Rehm, G. Reed [Hrsg.]: Biotechnology. Volume 3: Biomass, Microorganisms for Special Applications, Microbial Products I etc. Weinheim 1983
Rehm 1986	H.-J. Rehm, G. Reed [Hrsg.]: Biotechnology. Volume 4: Microbial Products II. Weinheim 1986
Rehm 1993	H.-J. Rehm, G. Reed [Hrsg.]: Biotechnology. Volume 1: Biological Fundamentals. Weinheim 1993
Rehm 1996	H.-J. Rehm, G. Reed [Hrsg.]: Biotechnology. Volume 6: Products of Primary Metabolism. Weinheim 1996

- Reimann 1998** Stoffkonversion nachwachsender Rohstoffe durch einschlußimmobilisierte Biokatalysatoren. Agrartechnische Forschung 4 (1998) Heft 2, S. 123-129
- Reisch 1999** M.S. Reich: Vision 2020 Comes Into Focus. Chemical and Engineering News, August 9th, 1999, p. 10
- Renneberg 1990** R. Renneberg: Biohorizonte – Die Chancen der Biotechnologie. Leipzig 1990
- Richert 1998** V. Richert, A. Zimmer: Fermenting Wastes to Alcohol. Genetic Engineering News, October 1, 1998, p. 28
- Richter 1997** S. Richter, M. Kolossa: Klassierung von organischen Stoffen nach den Regelungen der Nr. 3.1.7 TA-Luft. Umweltbundesamt TEXTE 33/97. Berlin 1997
- Roberts 1995** S.M. Roberts: Introduction to Biocatalysis. Cambridge 1995
- Roesch 1997** C. Roesch: Monitoring "Nachwachsende Rohstoffe" – Pflanzliche Öle und andere Kraftstoffe aus Pflanzen. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Arbeitsbericht Nr. 53. Bonn 1997
- Rögner 1999** W. Rögner: Fehlplanung deutscher Industrie – Rückstand in der Biotechnologie liegt nicht an öffentlicher Kritik. Süddeutsche Zeitung, 9.3.1999
- Rogers 1999** R.S. Rogers: Companies Turn To Biocatalysis. Chemical and Engineering News, July 19th 1999, p. 87
- Römpf** J. Falbe, M. Regitz [Hrsg.]: Römpf Chemie Lexikon. 10. Auflage. Stuttgart 1996-98
- Ruttloff 1991** H. Ruttloff [Hrsg.]: Lebensmittelbiotechnologie – Entwicklungen und Aspekte. Berlin 1991
- Ruttloff 1994** H. Ruttloff [Hrsg.]: Industrielle Enzyme. 2. Aufl. Hamburg 1994
- Schembra 1993** M. Schembra, J. Schulze: Schätzung der Investitionskosten bei der Prozeßentwicklung. Chem.-Ing.-Tech. 65 (1993) Nr. 1, S. 41-47
- Schiele 1998** U. Schiele-Trauth: Lebenskünstler gesucht. VDI-Nachrichten 31.7.1998

- Schlesinger 2000** M. Schlesinger et al.: Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Untersuchung der Prognos AG und des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität Köln für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Stuttgart 2000
- Schulze 1985** J. Schulze, M. Weiser: Vermeidungs- und Verwertungsmöglichkeiten von Rückständen bei der Herstellung chlororganischer Produkte. Umweltbundesamt TEXTE 5/85. Berlin 1985
- Schulze 1989** J. Schulze, M. Schembra: Investitionskosten von Chemieanlagen. 7-teilige Serie in Chemische Industrie 11/89 bis 6/90
- Schütte 1998** G. Schütte et al.: Nutzung der Gentechnik im Agrarsektor der USA – Die Diskussion von Versuchsergebnissen und Szenarien zur Biosicherheit. Band 1 und 2. Umweltbundesamt TEXTE 47/98. Berlin 1998
- Schütte 1999** A. Schütte: Schriftliche Mitteilung an das Umweltbundesamt vom 27.7.1999.
- Sheldon 1993** R.A. Sheldon: Homogeneous and Heterogeneous Catalytic Oxidations with Peroxid Reagents. In: Topics in Current Chemistry 164 (1993), p. 21
- Sorup 1999** P. Sorup, C. Tils, O. Wolf: Biokatalysis: State of the art in Europe. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS). Sevilla 1999
- SRU 1998** Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU): Umweltgutachten 1998. Deutscher Bundestag, 13. Wahlperiode, Drucksache 13/10195. Bonn 1998
- Stanley 1992** S.H. Stanley, H. Dalton: The biotransformation of propylene to propylene oxide by *Methylococcus capsulatus* (bath): 1. Optimization of rates. Biocatalysis, 1992, Vol. 6, pp. 163-175
- Stanley 1995** S.R. Stanley et al.: Introduction to Biocatalysis. Using Enzymes and Microorganisms. Cambridge 1995
- Statistisches Bundesamt 1999** Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe. Fachserie 4, Reihe 3.1, Quartalsbände 1998 und Jahresband 1998. Stuttgart 1998 und 1999
- Stinson 1999** S.C. Stinson: Prosperity for Fine Chemicals. Chemical and Engineering News, July 19th 1999, p. 65

- Stocker 1994** A. Stocker et al.: The Reaction Mechanism of Chromanol-Ring Formation Catalyzed by Tocopherol Cyclase from *Anabaena variabilis* KÜTZING (*Cyanobacteria*). Helvetica Chimica Acta Vol. 77 (1994) p. 1721
- Streck 1997** W.R. Streck, B. Pieper: Die biotechnologische Industrie in Deutschland: eine Branche im Aufbruch. ifo Institut für Wirtschaftsforschung. München 1997
- TA Siedlungsabfall** Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall) vom 14.5.1993. In: Beck 1999a
- Thayer 1998** A. Thayer: Living and Loving Life Sciences. Chemical and Engineering News, November 23rd, 1998, p. 17
- Thayer 1999** A. Thayer: Best of all industrial worlds: Chemistry and Biology. Chemical and Engineering News, May 31st 1999, p. 18
- Tramper 1996** J. Tramper: Chemical Versus Biochemical Conversion: When and How to Use Biocatalysts. Biotechnology and Bioengineering, Vol. 52, p. 290 (1996)
- UBA Wien 1997a** Umweltbundesamt Österreich (UBA): Umweltbiotechnologie in Österreich. Schwerpunkt: Grundlagen und Vorsorge. Monographien, Band 85A. Wien 1997
- UBA Wien 1997b** Umweltbundesamt Österreich (UBA): Umweltbiotechnologie in Österreich. Schwerpunkt: Nachsorge. Monographien, Band 85B. Wien 1997
- Uhlig 1991** H. Uhlig: Enzyme arbeiten für uns. München 1991
- Ullmann's** Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Volume A 1-28, 5th Edition. Weinheim 1985-96
- Umweltbundesamt 1999** Handreichung des Umweltbundesamtes "Bewertung in Ökobilanzen. Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043." Umweltbundesamt Berlin, unveröffentlichtes Arbeitspapier, 1999
- US-Patent 5082785** Hoffmann-La-Roche Inc.: Biosynthesis of 2 keto-L-gulonic acid. US-Patent 5082785, Jan 21st, 1992
- US-Patent 5583025** Rutgers (State University of New Jersey): Enzymes for the Production of 2-keto-L-gulonic acid. US-Patent 5583025, Jan 10st, 1996

US-Patent 5614392	Chin-Hang, S. et al. (Food Industry Research Institute, Taiwan): Process of L-Phenylalanine fermentation. US-Patent 5614392, March 25 th , 1997
US-Patent 5633362	DuPont de Némours: Production of 1,3-propanediol by recombinant bacteria expressing recombinant diol dehydratase. US-Patent 5633362, May 27 st , 1997
US-Patent 5705373	Takeda Chemical Industries: Production of 2-keto-L-gulonic acid using pseudogluconobacter. US-Patent 5705373, Jan 6 st , 1998
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG). In: Beck 1999b
VCI 1996	Verband der Chemischen Industrie e.V., Landesverband Bayern/ Verein der Bayerischen Chemischen Industrie e.V.: Zwischenbericht des Expertenkreises Bio- und Gentechnik. München 1996
4. BImSchV	Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV). In: Beck 1999b
Vorlop 1998	K.-D. Vorlop: Entwicklung eines kontinuierlichen Verfahrens zur Bio-konversion von Glycerin in 1,3-Propandiol durch Einsatz immobilisierter Zellen, Abschlußbericht zum Forschungsprojekt im Auftrag der FNR (Förderkennzeichen 96 NR 105-F) 1.7.96-30.6.98
VwVwS	Allgemeine Verwaltungsvorschrift über die nähere Bestimmung wassergefährdender Stoffe und ihre Einstufung entsprechend ihrer Gefährlichkeit – VwV wassergefährdende Stoffe (VwVwS) vom 9. März 1990. GMBI. S. 114
Wandrey 1998	C. Wandrey: Industrielle Biotransformationen – Ein Überblick. Vortrag anlässlich des DECHEMA-Kolloquiums "Einsatzmöglichkeiten der Bio- und Gentechnik in chemischen Produktionsprozessen" am 19. März 1998
Ward 1994	O.P. Ward: Bioreaktionen. Berlin 1994
Weissermel 1978	K. Weissermel, H.-J. Arpe: Industrielle organische Chemie. 2. Aufl. Weinheim 1978
WHG	Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG). In: Beck 1999b

Wick 1995	C.B. Wick: Genencor International Takes A Green Route to Blue Dye. Genetic Engineering News, Vol. 15, No. 2 (January 15, 1995)
Wissenschaftlicher Beirat 1994	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" (WGBU): Jahresgutachten 1994 – Welt im Wandel: Die Gefährdung der Böden. Bonn 1994
Wissenschaftlicher Beirat 1998	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung "Globale Umweltveränderungen" (WGBU): Jahresgutachten 1998 – Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Heidelberg 1999
WRI 1998	World Resources Institute (WRI) et al.: World Resources 1998-99 – A Guide to the global environment. New York 1998
Yamada 1993	H. Yamada: Microbial Reactions for the Production of Useful Organic Compounds. Chimia 47 (1993) 69-74
Yamaguchi 1973	K. Yamaguchi et al.: Microbial Production of L-Tyrosine by an n-Paraffin-grown Bacterium. Agr. Biol. Chem., 37 (9) 2189-2190, 1973
ZKBS 1997	Zentrale Kommission für biologische Sicherheit (ZKBS): Liste risikobewerteter Spender- und Empfängerorganismen für gentechnische Arbeiten. Bundesgesundhbl. 40, 12 (1997)
12. BImSchV	Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung) – 12. BImSchV. In: Beck 1999b

Anhang 1: Kennblätter

Erläuterungen zu den Stoffkennblättern

(1) Nachfolgend sind die in Kapitel 3 im Rahmen einer vergleichenden ökologischen Wirkungsabschätzung betrachteten chemisch-technischen und biotechnischen Verfahren einheitlich in Form von Kennblättern charakterisiert. Die Kategorien der Kennblätter sind:

- **Verwendung** des Stoffs
- **Herstellungsmenge** nach dem chemisch-technischen und – sofern bereits groß-technisch genutzt – nach dem biotechnischen Verfahren. Hier werden die neuesten in der Literatur verfügbaren Angaben wiedergegeben. Diese sind teilweise mehrere Jahre alt. Sofern sich in diesen Fällen im Zuge der Recherchen keine Hinweise zu wesentlichen zwischenzeitlichen Änderungen der Produktionsmengen zeigten, werden mangels aktuellerer Daten auch ältere Angaben verwendet. Andernfalls wird keine Angabe zur Herstellungsmenge getroffen.
- **Prinzip** von chemisch-technischem und biotechnischem Verfahren. Als chemisch-technisches Vergleichsverfahren wird die bei einer allfälligen Substitution des chemisch-technischen Verfahrens durch ein alternatives biotechnisches Verfahren betroffene Synthese genannt (Substitutionsansatz). Dies ist in der Regel das in Deutschland bzw. Europa gängige oder bei Errichtung neuer Anlagen üblicherweise gewählte Herstellungsverfahren.

Die Verfahrensprinzipien bilden den Ausgangspunkt der vergleichenden ökologischen Wirkungsabschätzung (insbesondere die Angaben über eingesetzte Stoffe, Reaktionsbedingungen und Nebenprodukte).
- **Wichtige Akteure** der chemisch-technischen und der biotechnischen Verfahren: Bedeutende Anwender der Verfahren (Hersteller); Institutionen bzw. Unternehmen, welche die Verfahren maßgeblich entwickeln bzw. entwickelt haben.
- **Gegenüberstellung der wichtigsten Umweltschutzaspekte** hinsichtlich
 - ☐ Emissionen (Luft, Wasser, Abfall),
 - ☐ Risikopotential im Störfall¹ durch den Umgang mit gefährlichen (z.B. wassergefährdenden oder explosiven) Stoffen,
 - ☐ Ressourcenverbrauch (im Sinne des Verbrauchs nicht-erneuerbarer fossiler Rohstoffe) und
 - ☐ (Acker-) Flächenbedarf für den Anbau nachwachsender Rohstoffe.

¹ Das Risikopotential kommt nur im Störfall zum Tragen. In der Regel sind für problematische Stoffe besondere Vorkehrungen erforderlich (z.B. Explosionsschutzmaßnahmen), die das Eintreten von Störfällen verhindern bzw. die Auswirkungen von Störfällen begrenzen.

In dieser Kategorie erfolgt ein direkter Vergleich zwischen dem chemisch-technischen und dem biotechnischen Verfahren. Es handelt sich demnach **nicht** um eine Betrachtung des **absoluten** Umweltentlastungs- bzw. -belastungspotentials.

Werden in dieser Kategorie zu einem bestimmten Bereich (z.B. Ressourcenverbrauch) keine Angaben gemacht, so ist davon auszugehen, daß hinsichtlich des betreffenden Bereichs keine wesentlichen Unterschiede zwischen dem biotechnischen und dem chemisch-technischen Verfahren bestehen.

Die Gegenüberstellung bildet – gemeinsam mit den o.g. Verfahrensprinzipien – die Grundlage für das Verständnis der vergleichenden ökologischen Wirkungsabschätzung, die in Tabelle 6 (Kapitel 3) wiedergegeben ist.

- **Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens:** Gründe für die Anwendung des biotechnischen Verfahren (z.B. Kostenvorteile gegenüber dem chemisch-technischen Verfahren); Hemmnisse, die der großtechnischen Nutzung des biotechnischen Verfahrens entgegenstehen (z.B.: das Verfahren ist noch nicht großtechnisch anwendungsreif)
- **Sonstiges.**

Die Kategorien "Gegenüberstellung der wichtigsten Umweltschutzaspekte" und "Prinzip von chemisch-technischem und biotechnischem Verfahren" liefern die zum Verständnis der ökologischen Wirkungsabschätzung in Kapitel 3 erforderlichen Grundlagen. Die Einbeziehung von quantitativen Informationen zu Stoff- und Energieflüssen über die in den Kennblättern enthaltenden Angaben hinaus erforderte aufwendige Primärdatenerhebungen und überstiege den Rahmen dieser Untersuchung bei weitem (und wäre ferner nur für bereits großtechnisch angewendete Verfahren möglich).

(2) Die Kennblätter sind nach **Realisierungsstatus** der biotechnischen Variante gruppiert:

- | | |
|-----------|--|
| Gruppe 1a | Die biotechnische Herstellung erfolgt in industriellem Umfang. |
| Gruppe 1b | Eine biotechnische Produktionsanlage befindet sich in Planung/im Bau. |
| Gruppe 2 | Die biotechnische Herstellung wurde früher in industriellem Umfang praktiziert, ist jedoch inzwischen durch eine chemisch-technische Synthese abgelöst (Historisches Verfahren). |
| Gruppe 3 | Ein biotechnisches Verfahren befindet sich im Entwicklungsstadium (vom Labormaßstab bis zur Pilotanlage). |

Verfahren der Gruppe 3 sind teilweise im Entwicklungsstadium stehengeblieben (d.h. die Entwicklung wurde nicht immer weiterverfolgt). Solche Verfahren können später wieder aufgegriffen und weiterentwickelt werden.

(3) Die Einstufung krebserzeugender Stoffe in der Kategorie "Gegenüberstellung der wichtigsten Umweltschutzaspekte" erfolgt gemäß DFG 1998:

- Kat. 1: "Stoffe, die beim Menschen Krebs erzeugen und bei denen davon auszugehen ist, daß sie einen nennenswerten Beitrag zum Krebsrisiko leisten ..."
- Kat. 2: "Stoffe, die als krebserzeugend für den Menschen anzusehen sind ..."
- Kat. 3: "Stoffe, die wegen möglicher krebserzeugender Wirkungen beim Menschen Anlaß zur Besorgnis geben, aber aufgrund unzureichender Informationen nicht endgültig beurteilt werden können ..."

Die Einstufung hinsichtlich der Giftigkeit von Stoffen erfolgt entsprechend der Gefährlichkeitsmerkmale nach § 4 der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV): sehr giftig, giftig, usw. (siehe Hörath 1997).

Stoffe mit gefährlichen physikalisch/chemischen Eigenschaften werden ebenfalls gemäß GefStoffV klassifiziert: explosionsgefährlich, hochentzündlich, usw.

Die mögliche Wassergefährdung wird durch Einstufung in Wassergefährdungsklassen (WGK) gemäß Verwaltungsvorschrift wassergefährliche Stoffe (VwVwS) erfaßt: stark wassergefährdend (WGK 3), wassergefährdend (WGK 2), schwach wassergefährdend (WGK 1), im allgemeinen nicht wassergefährdend (WGK 0).

Verzeichnis der Kennblätter	Seite
Gruppe 1a: Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang üblich	
Acrylamid	175
Äpfelsäure	176
Essigsäure	177
Ethanol	178
Fumarsäure	179
<i>Vitamin B₂</i>	180
Gruppe 1b: Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang geplant	
Glycerin	181
Indigo	182
Vitamin C	183
Gruppe 2: Biotechn. Verfahren durch chemisch-technisches abgelöst	
Aceton	184
1-Butanol	185
2-Propanol	186
Gruppe 3: Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium	
<i>Adipinsäure</i>	187
2,3-Butandiol	188
Buttersäure	189
Epichlorhydrin	190
Mannitol	191
L-Phenylalanin	192
1,3-Propandiol	193
Propionsäure	194
Propylenoxid	195
Sorbit	196
<i>Vanillin</i>	197

Stoffbezeichnung **fett**: Fallbeispiele (Kapitel 4).

Stoffbezeichnung *kursiv*: Nutzung gentechnischer Verfahren zur Erschließung eines nicht natürlicherweise vorkommenden Stoffwechselwegs der benutzten Mikroorganismen bzw. zur Herstellung des benutzten Enzyms erforderlich.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (1a) Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang üblich
Acrylamid [CAS-Nr. 79-06-1]

Verwendung: Polymerherstellung (Polyacrylamid), Flockungsmittel bei der Wasseraufbereitung und Erzflotation, Hilfsstoff bei der Papierherstellung
Herstellungsmenge: weltweit ca. 200 kt/a, davon ca. 30 kt/a biotechnisch (1991)
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Hydratisierung von Acrylnitril mit Schwefelsäure bei 90°C bzw. bei 80-140°C mit Kupferkatalysator, Abtrennung (mit aufwendiger Regenerierung) des Katalysators, aufwendige Trennung von Nebenprodukten (u.a. Blausäure) und nicht umgesetztem Acrylnitril, Abtrennung verbliebener Cu-Ionen aus dem Produkt [Yamada 1993, Chernier 1992]. <u>biotechnisch:</u> Hydratisierung von Acrylnitril mit Nitrilhydratase aus <i>Pseudomonas chloraphis</i> oder <i>Rhodococcus rhodochrus</i> J1 (immobilisiert in Polyacrylamidgel oder als freie Zellen) bei 10°C. Ausbeute > 99,99%, Endkonzentration 400 g/l nach 8 Stunden, hoher Reinheitsgrad des Produkts [Yamada 1993, Hüsing 1998].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> Dow Chemicals (USA), BASF AG, Mitsui Toatsu (Japan), Mitsubishi Chemicals (Japan) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> Nitto Chemical Industry Ltd. (Yokohama, Japan), DSM-Andeno (Geleen, NL)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Emissionen:</u> Möglicherweise Emissionen in Luft und Abwasser (aufgrund aufwendiger Trenn- und Reinigungsschritte und der Regeneration des Katalysators), blausäurehaltige Abfälle. <u>Risikopotential:</u> Blausäure ist giftig. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Prozeßenergiebedarf (Hydratisierung bei erhöhten Temperaturen).
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Die biotechnische Herstellung von Acrylamid ist bei einem Marktpreis von ca. 2.500 US\$/t etwa 15 US\$/t billiger als die chemisch-technische (Stand: Anfang der 90er Jahre). Das biotechnisch gewonnene Produkt ist von hoher Reinheit und daher dem chemisch-technisch gewonnenen Produkt überlegen.
Sonstiges:

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (1a) Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang üblich
Äpfelsäure [CAS-Nr. 617-48-1] Racemat, [CAS-Nr. 97-67-6] L-Form

Verwendung: Racemat: Lebensmittelindustrie (Geschmacksstoff, Säuerungsmittel)
Herstellungsmenge: weltweit 25 kt/a (90er Jahre), davon 0,5 kt/a biotechnisch
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Katalytische Anlagerung von Wasser an Maleinsäureanhydrid bei 180°C und 10 bar führt zum Racemat. Maleinsäureanhydrid wird durch Umsetzung von Benzol im Luftstrom über Vanadiumpentoxidkatalysator bei 150-160°C und 1,5-2,5 bar hergestellt oder durch katalytische Oxidation von n-Butan [Ullmann's, Römpp]. <u>biotechnisch:</u> Aus Fumarsäure (vgl. entsprechendes Kennblatt) mit Fumarase aus <i>Brevibacterium</i> Stämmen (immobilisiert), 20h bei 37°C, nahezu quantitative Umsetzung zu L-Äpfelsäure [Ruttloff 1991, UBA Wien 1997a, Renneberg 1990]
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> Alberta Gas (USA) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> Tanabe Seiyaku (Japan)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Risikopotential:</u> Eingangsstoff Benzol ist krebserzeugend (Kat. 1) und giftig. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoff Benzol wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen, Prozeßenergiebedarf (Synthese erfordert erhöhte Temperaturen und Drucke).
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Produkthanforderung (Racemat oder L-Form) kann über die Verwendung des biotechnischen Verfahrens entscheiden.
Sonstiges: Fumarsäure, der Eingangsstoff der biotechnischen Synthese, ist biotechnisch aus Kohlenhydraten herstellbar (siehe Kennblatt Fumarsäure).

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (1a) Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang üblich
Essigsäure (Ethansäure) [CAS-Nr. 64-19-7]

Verwendung: Zwischenprodukt zur Polyesterherstellung, Lösungsmittel, Lebensmittel
Herstellungsmenge: weltweit 3.000 kt/a (1991) chemisch-technisch, davon 900 kt/a in EU bzw. 400 kt/a in D. 1992 wurden in der EU 513 Mio. Liter 10%iger Essig biotechnisch hergestellt, weltweit ca. 1.900 Mrd. Liter (entsprechend 190.000 t reiner Essigsäure)
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> a) Umsetzung von Methanol mit Kohlenmonoxid bei 175°C und 30 bar an Rhodium-Iod-Katalysator (überwiegend genutztes Verfahren) [Chenier 1992, Ullmann's]. b) Oxidation von Butan mit Luftsauerstoff über Cobalt-Acetat-Katalysator bei 150-200°C und bis zu 56 bar oder Oxidation von aus Ethen bei 60-80°C und 3-10 bar hergestelltem Acetaldehyd an Mangan- oder Cobalt-Acetat-Katalysator (weniger gängiges Verfahren) [Ullmann's]. <u>biotechnisch:</u> Fermentative Oxidation verdünnter Ethanollösung mit <i>Acetobacter suboxydans</i> [Präve 1994, Ward 1994].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technische Verfahren:</u> Hoechst AG, Wacker Chemie GmbH, BASF AG, Degussa-Hüls AG, Lonza AG, Monsanto (St. Louis, USA) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> Zahlreiche Unternehmen der Lebensmittelbranche
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: (Verfahren a) <u>Emissionen:</u> Beim biotechnischen Verfahren fallen Abfallsalze aus der Aufarbeitung an. <u>Risikopotential:</u> Kohlenmonoxid und Methanol sind giftig. Der Cobalt-Katalysator ist sensibilisierend (wird jedoch nur in geringen Mengen eingesetzt und tritt nicht in atembarer Form auf). <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoffe werden aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Prozeßenergiebedarf (Synthese erfordert erhöhte Temperaturen und erhöhten Druck).
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Als Lebensmittel darf nur fermentativ hergestellte Essigsäure verwendet werden.
Sonstiges:

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (1a) Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang üblich
Ethanol [CAS-Nr. 64-17-5]

Verwendung: Lösungsmittel, Eingangsstoff in der chemischen Industrie
Herstellungsmenge: weltweit 24.000 kt/a aus nachwachsenden Rohstoffen und 2.500 kt/a aus fossilen Rohstoffen (1998)
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Katalytische Hydratisierung von Ethen unter Druck und bei 250-300°C führt zu Ethanol, Produktabtrennung und Reinigung durch Destillation [Ullmann's, Chenier 1992]. <u>biotechnisch:</u> Fermentation von Kohlenhydraten aller Art (auch Abfälle der Papier- oder Holzproduktion, Gras, Stroh etc.) mit Hefen oder Bakterien. Abtrennung des Ethanols durch Destillation [Ward 1994, UBA Wien 1997a]. Verfahren, die GVO verwenden, befinden sich im Entwicklungsstadium [Ast 1998].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> BP (U.K.) u.a. <u>Biotechnisches Verfahren:</u> Diverse Brennereien. Pilotanlagen für neuartige Einsatzstoffe z.B. in U.K., Österreich, Schweiz (vgl. Richert 1998, McCoy 1998b)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoff Ethen wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Prozeßenergiebedarf (Synthese erfordert erhöhte Temperaturen und erhöhten Druck). <u>Flächenbedarf</u> und Verwendung von Agrochemikalien für den Anbau von Getreide.
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Als Lebensmittel darf nur fermentativ hergestelltes Ethanol verwendet werden. Ethanol könnte zukünftig als sauerstoffhaltiger Zusatz zu Vergaserkraftstoff MTBE ersetzen (vgl. Hanson 1999).
Sonstiges:

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (1a) Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang üblich
Fumarsäure [CAS-Nr. 110-17-8]

Verwendung: Zwischenprodukt zur Herstellung von Polyestern, Lebensmittelindustrie
Herstellungsmenge: USA 12 kt/a (1991)
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Thermische oder katalytische Isomerisierung von Maleinsäure in wässriger Lösung, Abtrennung durch Filtration. Maleinsäure entsteht bei Lösen von Maleinsäureanhydrid in Wasser. Das Anhydrid wird durch Umsetzung von Benzol im Luftstrom über Vanadiumpentoxidkatalysator bei 150-160°C und 1,5-2,5 bar hergestellt oder durch Oxidation von n-Butan [Römpf]. <u>biotechnisch:</u> Mit <i>Rhizopus nigricans</i> in einem anaeroben submersen Fermentationsschritt bei 30°C aus Glucose, Saccharose oder Stärke, Neutralisation mit Kalziumcarbonat, Ausbeute 65%, Nebenprodukte: Milchsäure und Ethanol [Rutloff 1991].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> Miles (USA), Pfizer (USA) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> unbekannt
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Emissionen:</u> Der mit Katalysator verunreinigte Filtrationsrückstand ist Sonderabfall. Beim biotechnischen Verfahren fallen Abfallsalze aus der Aufarbeitung an. <u>Risikopotential:</u> Benzol ist krebserzeugend (Kat. 1) und giftig. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoff Benzol wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Prozeßenergiebedarf (Synthese erfordert erhöhte Temperaturen und erhöhten Druck). <u>Flächenbedarf</u> und Verwendung von Agrochemikalien für den Anbau von Zuckerrüben oder anderen nachwachsenden Rohstoffen.
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Lebensmittelrechtliche Einstufung des biotechnisch hergestellten Produkts als "natürlich". Für industrielle Zwecke wird aus Kostengründen i.d.R. chemisch-technisch hergestellte Fumarsäure verwendet (Rutloff 1991).
Sonstiges: Aus Fumarsäure kann Äpfelsäure biotechnisch hergestellt werden, siehe Kennblatt Äpfelsäure.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (1a) Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang üblich
Vitamin B₂ (Riboflavin) [CAS-Nr. 83-88-5]

Verwendung: Viehfutterzusatz, Pharmaka, Lebensmittelzusatz
Herstellungsmenge: weltweit 2,4 kt/a (1995)
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Nitrierung von o-Xylol und katalytische Reduktion zum Amin, Umsetzung mit D-Ribose* und katalytische Reduktion, Reinigung durch Kristallisation, Addition von Azobenzol (aus Anilin und salpetriger Säure), Umsetzung mit Barbitursäure. Reinigung durch Lösen und Wiederausfällen. Barbitursäure wird überwiegend aus 2-Chloracetat (durch katalytische Chlorierung von Essigsäure bei erhöhter Temperatur gewonnen) und Kaliumcyanid hergestellt, anschließend Hydrolyse zum Malonsäureester und dessen Kondensation mit Harnstoff [Ullmann's]. <u>biotechnisch:</u> Fermentation von Glucose oder Pflanzenölen mit verschiedenen, auch gentechnisch veränderten Mikroorganismen bei 30-40°C über mehrere Tage. Keine näheren Angaben [McCoy 1998a, Ullmann's].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> Unbekannt (tatsächliche Nutzung unklar) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> BASF AG, Hoffmann-La Roche AG (ab 2000 in Grenzach), Archer Daniels Midland (ADM) und Rhône-Poulenc S.A. (Joint venture in Decatur/Illinois, USA)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Emissionen:</u> Große Abfallmengen. <u>Risikopotential:</u> Xylol, Kaliumcyanid, Benzol, Anilin, Chlor und 1-Chlor-2-Dichlorethan sind giftig, Benzol ist krebserzeugend (Kat. 1). <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoffe werden aus fossilen Rohstoffen gewonnen. <u>Flächenbedarf</u> und Verwendung von Agrochemikalien für den Anbau von Zuckerrüben oder anderen nachwachsenden Rohstoffen.
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Die biotechnische Herstellung ist erheblich kostengünstiger als die chemisch-technische (McCoy 1998a).
Sonstiges: * D-Ribose (das Edukt des chemisch-technischen Verfahrens) kann sowohl chemisch-technisch als auch biotechnisch hergestellt werden.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (1b) Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang geplant
Glycerin (Glycerol; 1,2,3-Propantriol) [CAS-Nr. 56-81-5]

Verwendung: Zwischenprodukt u.a. zur Herstellung von Polymeren, Kosmetikindustrie, Lebensmittelindustrie
Herstellungsmenge: weltweit 600 kt/a, davon 75% natürliches und 25% synthetisches Glycerin, Deutschland 116 kt/a (1997) chemisch-technisch. USA 25 kt/a (1993) biotechnisch
Prinzip der Verfahren <u>chemisch-technisch:</u> a) "Synthetisches Glycerin" aus Propen durch Umsetzung bei 300-600°C mit Chlor zu Allylchlorid, Umsetzung mit Hypochlorid und Base zu Epichlorhydrin, Hydrolyse bei 80-200°C zu Glycerin [Ullmann's]. b) "Natürliches Glycerin" durch Hochdruck-Fettsäure- und Fettsäureglycerin-Veresterung bei 250-260°C und 50-60 bar als Kuppelprodukt der Fettsäuregewinnung aus natürlichen Ölen und Fetten [Ullmann's]. Ferner (in geringen Mengen) Kuppelprodukt bei der Herstellung von Rapsölmethylester. Bei beiden Synthesewegen sind anschließende Konzentrations- und Reinigungsschritte nötig. <u>biotechnisch:</u> Fermentation von Zucker unter Zusatz von Sulfat. Ausbeute der 2-3-tägigen Fermentation bis zu 30%. Keine näheren Angaben [McCoy 1998a, Ward 1994, Präve 1994].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technische Verfahren:</u> a) Dow Deutschland Inc., b) diverse Unternehmen der fettverarbeitenden Industrie <u>Biotechnisches Verfahren:</u> Archer Daniels Midland (ADM, Cedar Rapids/Iowa, USA)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: Verfahren a): <u>Risikopotential:</u> Epichlorhydrin, Chlor und Allylchlorid sind giftig, Epichlorhydrin ist außerdem als krebserzeugend anzusehen (Kat. 2). Wegen Entzündlichkeit und Giftigkeit des Epichlorhydrins sind bei der Umsetzung umfassende Schutzmaßnahmen nötig. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoff Propen wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Verfahren b): <u>Ressourcenverbrauch:</u> Prozeßenergiebedarf (Verfahren erfordert erhöhte Temperaturen und Drucke).
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Marktaufnahmekapazität beschränkt (aufgrund steigender Mengen natürlichen Glycerins tendenziell Preisverfall). Synthetisches Glycerin ist dem natürlichen in bestimmten Anwendungen qualitativ überlegen (olfaktorisch relevante Verunreinigungen).

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (1b) Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang geplant
Indigo [CAS-Nr. 482-89-3]

Verwendung: Farbstoff
Herstellungsmenge: weltweit 13 kt/a (1993)
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Kondensation von Anilin, Formaldehyd und Cyanwasserstoff zu Anilo-acetonitril, anschließend Hydrolyse zu N-Phenylglycin, Cyclisierung in Natriumamidschmelze zu Indoxyl, spontane Oxidation an Luft zu Indigo [Ullmann's]. <u>biotechnisch:</u> Herstellung von Indol aus D-Glucose mit gentechnisch verändertem <i>E. coli</i> FM5-Stamm, Umsetzung von Indol mit einem weiteren, ebenfalls gentechnisch veränderten <i>E. coli</i> FM5-Stamm zu Cis-indol-2,3-dihydrodiol, spontane Abspaltung von Wasser zu Indoxyl, spontane Oxidation an Luft zu Indigo [Ast 1998, Tramper 1996]. Ferner wurde ein biotechnisches Verfahren, das die Synthese aus Glucose mit einem einzigen transgenen <i>E. coli</i> -Stamm erreicht, entwickelt [Murdock 1993, Wick 1995].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> BASF AG, Buffalo Color Corp. (Niagara Falls/N.Y., USA), ICI (U.K.), Mitsui (Japan) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> Genencor International (Rochester/N.Y., USA), Amgen Inc. (Thousand Oaks/Kalifornien, USA)/Envirogen Inc. (Lawrenceville/New Jersey, USA)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Risikopotential:</u> Anilin, Formaldehyd und Cyanwasserstoff sind giftig. Es entstehen giftige Nebenprodukte. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoffe Anilin und Formaldehyd und Cyanwasserstoff werden aus Erdöl gewonnen. <u>Flächenbedarf</u> und Verwendung von Agrochemikalien für den Anbau von Zuckerrüben oder anderen nachwachsenden Rohstoffen.
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Erwarteter Kostenvorteil des biotechnischen Verfahrens.
Sonstiges: Für den Färbevorgang, für den Indigo reduktiv gelöst werden muß, wurde an Universität Reading (U.K.) ein biotechnisches Verfahren unter Nutzung von <i>Clostridien</i> entwickelt [N.N.1998b].

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (1b) Biotechnische Herstellung in industriellem Umfang geplant
Vitamin C (Ascorbinsäure, L-Ascorbinsäure) [CAS-Nr. 50-81-7]

Verwendung: Pharmazeutika, Lebensmittelzusatz (Konservierungsmittel, Geschmacksstoff)
Herstellungsmenge: weltweit über 60 kt/a (1998) nach dem Reichstein-Verfahren
Prinzip der Verfahren: <u>Kombiniert chemisch-technisch/biotechnisch:</u> (Reichstein-Synthese) Katalytische (Raney-Nickel) Hydrierung von D-Glucose zu D-Sorbit bei hohen Drücken und Temperaturen, Fermentation (<i>Acetobacter suboxydans</i>) bei 30-35°C unter sterilen aeroben Bedingungen zu L-Sorbose. Nach Filtration und Kristallisation Umsetzung mit Aceton und katalytisch wirkendem Schwefelsäureüberschuß bei 4°C zur Einführung von Schutzgruppen, Oxidation mit Oxidationsmitteln (Natriumhypochlorid, elektrochemisch, katalytische Oxidation durch Luft), Deprotektion in inertem organischem Lösungsmittel, Zyklisierung zu L-Ascorbinsäure in inertem Lösungsmittel (z.B. Trichlormethan, Toluol). Aufbereitung durch Filtration, Lösung in Wasser, Reinigung durch Kristallisation. <u>Erweitertes biotechnisches Verfahren:</u> (Ning-Verfahren) Fermentation von L-Sorbose zu Ketogulonsäure in Mischkultur aus <i>Gluconobacter oxydans</i> und <i>Bacillus megaterium</i>. Die übrigen Schritte erfolgen wie bei der Reichstein-Synthese. Daneben bestehen zahlreiche weitere Ansätze für die Ersetzung chemisch-technischer Schritte der Reichstein-Synthese durch biotechnische Stufen (siehe Kapitel 4.3).
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> Hoffmann-La Roche, Takeda (Japan), Merck KGaA, BASF <u>Biotechnische Verfahren:</u> Keto-Gulonsäure Produktions GmbH (Krefeld), Eastman Chemical Co., Genencor International, Archer Daniels Midland, diverse Universitäten (vgl. Kap. 4.3).
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Emissionen:</u> Große Abfallmengen. Diffuse Emissionen organischer Lösungsmittel. <u>Risikopotential:</u> Toluol ist gesundheitsschädlich und wassergefährdend, Trichlormethan ist gesundheitsschädlich stark wassergefährdend, Toluol und Aceton sind leichtentzündlich, Schwefelsäure ist schwach wassergefährdend. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Prozeßenergiebedarf (Destillationen).
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Erwarteter Kostenvorteile biotechnischer Teilschritte.
Sonstiges: Hohe Reinheitsanforderungen an den Eingangsstoff Glucose.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (2) Biotechnisches Verfahren durch chemisch-technisches abgelöst
Aceton [CAS-Nr. 67-64-1]

Verwendung: Lösungsmittel und Eingangsstoff in der chemischen Industrie
Herstellungsmenge: weltweit 3.960 kt/a (1994), Deutschland 450 kt/a (1998); ausschließlich chemisch-technisch
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Kuppelprodukt bei der Phenol-Herstellung (Hock-Verfahren, 70% der Weltproduktion von Aceton, überwiegender Anteil der Weltproduktion von Phenol): Umsetzung von Benzol mit Propen über Phosphorsäure-Katalysator (Friedel-Crafts-Alkylierung bei 200-250°C und 30 bis 40 bar), radikalische Oxidation zu Cumolhydroperoxid bei 80-130°C und Spaltung bei 70-95°C unter Katalyse von verdünnter Schwefelsäure zu Phenol und Aceton. Trennung der beiden Produkte durch Destillation [Ullmann's]. <u>biotechnisch:</u> (Modernes Verfahren der TU Wien) Fermentation von Glucose oder Stärke (auch Verwendung von Reststoffen möglich) mit <i>Clostridium beijerinckii</i> oder anderen <i>Clostridien</i>-Stämmen. Daneben entsteht 1-Butanol (vgl. entsprechendes Kennblatt), das für biologische Systeme giftig ist und daher die Produktkonzentration auf insgesamt 2% begrenzt ("Produktinhibition"). Anstelle von Aceton kann durch Benutzung entsprechender Stämme 2-Propanol hergestellt werden (siehe entsprechendes Kennblatt) [Gapes 1996].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technische Verfahren:</u> Dow Chemicals (USA), Shell, Phenolchemie GmbH <u>Biotechnisches Verfahren:</u> TU Wien u.a. Universitäten. Großtechnische Produktion nach dem historischen Weizmann-Verfahren möglicherweise in China.
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Emissionen:</u> Eventuell Lösemittlemissionen des biotechnischen Verfahrens über die Schlempe. Aus dem Abwasser müssen bei der chem.-techn. Herstellung organische Verbindungen, bei der biotechnischen Herstellung Produktreste entfernt werden. <u>Risikopotential:</u> Benzol ist krebserzeugend (Kat. 1), giftig und stark wassergefährdend. Cumolhydroperoxid ist gesundheitsschädlich und wassergefährdend. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoffe Propen und Benzol aus fossilen Rohstoffen. <u>Flächenbedarf</u> und Verwendung von Agrochemikalien für den Anbau von Zuckerrüben, Getreide oder Kartoffeln (sofern keine Reststoffe als Substrate verwendet werden).
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Kosten. Potential bei Nutzung vorhandener Infrastruktur (ehemalige Ethanolbrennereien). Das Verfahren ist reif für den Scale up in den großtechnischen Maßstab.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (2) Biotechnisches Verfahren durch chemisch-technisches abgelöst
1-Butanol (n-Butanol) [CAS-Nr. 71-36-3]

Verwendung: Lösungsmittel, Eingangsstoff in der chemischen Industrie
Herstellungsmenge: Deutschland 435 kt/a (1998), ausschließlich chemisch-technisch
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Katalytische Umsetzung von Propen mit Kohlenmonoxid und Wasserstoff zu Butanal (sogenannte Oxo-Synthese). Die Herstellung von 1-Butanol erfolgt in der Regel nach dem Niederdruck-Rhodium-Oxoverfahren bei 50-130°C und 10-100 bar über einem modifizierten Rhodiumkatalysator. Anschließend katalytische Reduktion bei 25-196°C und 7 bar zu 1-Butanol und 5-8% 2-Methyl-1-Propanol. [Ullmann's, Römpp] <u>biotechnisch:</u> (Verfahren der TU Wien) Fermentation von Glucose oder Stärke (auch Verwendung von Reststoffen möglich) mit <i>Clostridium beijerinckii</i> oder anderen Clostridien-Stämmen. 1-Butanol (vgl. entsprechendes Kennblatt) ist für biologische Systeme giftig und begrenzt daher die Produktkonzentration auf insgesamt 2%. Neben 1-Butanol entsteht Aceton (vgl. entsprechendes Kennblatt) [Gapes 1996]
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> Ruhrchemie <u>Biotechnisches Verfahren:</u> TU Wien u.a. Universitäten. Großtechnische Produktion nach dem historischen Weizmann-Verfahren möglicherweise in China.
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Emissionen:</u> Eventuell Lösemittlemissionen des biotechnischen Verfahrens über die Schlempe. Aus dem Abwasser der biotechn. Herstellung müssen Produktreste entfernt werden. <u>Risikopotential:</u> Kohlenmonoxid ist giftig und hochentzündlich. Propen und Wasserstoff sind hochentzündlich. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoffe Propen, Kohlenmonoxid und Wasserstoff werden aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Reaktionsenergie des chem.-techn. Verfahrens wird zur Prozeßdampfgewinnung genutzt. <u>Flächenbedarf</u> und Verwendung von Agrochemikalien für den Anbau von Zuckerrüben, Getreide oder Kartoffeln (sofern keine Reststoffe als Substrate verwendet werden).
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Kosten. Potential bei Nutzung vorhandener Infrastruktur (ehemalige Ethanolbrennereien). Das Verfahren ist reif für den Scale up in den großtechnischen Maßstab.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (2) Biotechnisches Verfahren durch chemisch-technisches abgelöst
2-Propanol (Isopropanol) [CAS-Nr. 67-63-0]

Verwendung: Lösungsmittel, Desinfektionsmittel
Herstellungsmenge: Deutschland 215 kt/a Kapazität (1991), ausschließlich chemisch-technisch
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Katalytische Umsetzung von Propen mit Wasser bei 130-160°C und 80-100 bar (Katalysator: sulfoniertes Polystyrol) oder bei 250°C und 25-65 bar mit Phosphor-Katalysator [Ullmann's, Kirk-Othmer]. <u>biotechnisch:</u> Isopropanol kann anstelle von Aceton fermentativ aus Glucose oder Stärke mit geeigneten Clostridien-Stämmen gewonnen werden (vgl. Kennblatt Aceton) [Jones 1986].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> Degussa-Hüls AG, RWE-DEA AG, BP Chemicals Ltd. (U.K.), Shell Chimie S.A. (NL) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> TU Wien u.a. Universitäten
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Emissionen:</u> Eventuell Lösemittlemissionen des biotechnischen Verfahrens über die Schlempe. Aus dem Abwasser der biotechn. Herstellung müssen Produktreste entfernt werden. <u>Risikopotential:</u> Propen ist hochentzündlich. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoff Propen wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen. <u>Flächenbedarf</u> und Verwendung von Agrochemikalien für den Anbau von Zuckerrüben, Getreide oder Kartoffeln (sofern keine Reststoffe als Substrate verwendet werden).
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Kosten. Potential bei Nutzung vorhandener Infrastruktur (ehemalige Ethanol-brennereien). Das Verfahren ist reif für den Scale up in den großtechnischen Maßstab.
Sonstiges: Die Herstellung von 2-Propanol durch indirekte Hydratisierung ist in Europa nicht üblich.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (3) Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium
Adipinsäure (Hexandicarbonsäure) [CAS-Nr. 124-04-9]

Verwendung: Herstellung von Nylon-6,6 u.a. Polymeren, Weichmachern, Farbstoffe
Herstellungsmenge: weltweit ca. 2 Mio. t/a, Deutschland 350 kt/a (1998); ausschließlich chemisch-technisch
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Oxidation einer Mischung von Cyclohexanon und Cyclohexanol, sog. Keto-Alkohol-Öl (KA-Öl), bei 60-90°C und 1-4 bar mit 50%iger Salpetersäure, die Kupfer und Vanadium als Katalysator enthält. Die dabei entstehenden Stickstoffoxide (außer Lachgas) werden in Wasser absorbiert als Säure wiedereingesetzt. KA-Öl wird durch Oxidation von Cyclohexan mit Luftsauerstoff gewonnen. Die Reaktionsbedingungen differieren je nach Oxidationsverfahren. Cyclohexan wird durch Hydrierung von Benzol bei 210°C und 200-300 bar an Edelmetall-Katalysatoren hergestellt [BUA 1992, Kirk-Othmer, Ullmann's]. <u>biotechnisch:</u> 1) Fermentation von Glucose mit gentechnisch verändertem <i>E. coli</i> zu Muconsäure. Aus Muconsäure wird chemisch-technisch Adipinsäure durch Hydrierung über Platinkatalysator hergestellt [N.N. 1994, Draths 1994]. 2) Fermentation von Paraffinen bzw. 1,4-Dicyanobutan [N.N. 1986, Moreau 1994].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> BASF AG, Bayer AG, Rhône-Poulenc S.A. (F), ICI (U.K.) <u>Biotechnische Verfahren:</u> 1) Purdue University (West Lafayette/Indiana, USA), Genencor International (Rochester/N.Y., USA); 2) Mitsui Petrochemical Industries (Japan), Universität Montpellier (Frankreich)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: (Verfahren 1) <u>Emissionen:</u> Hohe Lachgas-Emissionen (sofern nicht durch Abgasbehandlung eliminiert), diffuse Emissionen von Kohlenwasserstoffen (einschl. Benzol) <u>Risikopotential:</u> Eingangsstoff Benzol ist krebserzeugend (Kat. 1), giftig und stark wassergefährdend, Cyclohexanon ist möglicherweise krebserzeugend. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoff Benzol wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen, Prozeßenergiebedarf. <u>Flächenbedarf</u> und Verwendung von Agrochemikalien für den Anbau von Zuckerrüben oder anderen Pflanzen.
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Das Verfahren ist noch nicht großtechnisch einsatzreif (bislang Labormaßstab).

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (3) Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium
2,3-Butandiol [CAS-Nr. 513-85-9]

Verwendung: Frostschutzmittel, Zwischenprodukt bei der Herstellung von Insektiziden, Pharmaka und Polyurethanen
Herstellungsmenge: Keine Angaben
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Umsetzung von Buten mit Chlor in wässriger alkalischer Lösung zu Butylenchlorhydrin, Cyclisierung zu Epoxid unter Abspaltung von Salzsäure, Hydrolyse bei 160-220°C und 50 bar. Isolierung von 2,3-Butandiol durch Vakuumdestillation [Ullmann's]. <u>biotechnisch:</u> 1) Fermentation von Glucose oder Xylose mit <i>Klebsiella pneumoniae</i> führt überwiegend zu 2,3-Butandiol. Isolierung des Produkts durch Vakuumdestillation. [Ward 1994, Präve 1994]. 2) Fermentation von Pentosen und Hexosen mit <i>Bacillus polymyxa</i> führt zu 2,3-Butandiol und Ethanol. Produktabtrennung durch Hohlfasern [Garg 1995, N.N. 1984].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> unklar <u>Biotechnisches Verfahren:</u> 1) Universität Faizabad (Indien); 2) Rensselaer Polytechnic Institute (New York)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: (Verfahren 2) <u>Risikopotential:</u> Epoxide sind mutagen, bei Hautkontakt bewirken sie Verbrennungen und allergische Kontaktekzeme; Chlor ist giftig, reizend und wassergefährdend. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoff Buten wird aus Erdöl gewonnen, Prozeßenergiebedarf (Synthese erfordert erhöhte Temperaturen und erhöhten Druck). <u>Flächenbedarf</u> und Verwendung von Agrochemikalien für den Anbau von Zuckerrüben oder anderen Pflanzen.
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Das Verfahren ist noch nicht großtechnisch einsatzreif (bislang Labormaßstab).
Sonstiges: 2,3-Butandiol kann 1,4-Butandiol bei der Herstellung von Polyestern und Polyurethanen partiell ersetzen.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (3) Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium
Buttersäure (Butansäure) [CAS-Nr. 109-52-4]

Verwendung: Zwischenprodukt bei der Herstellung von Lacken, Polymeren und Parfüm
Herstellungsmenge: weltweit 50 kt/a (1984), ausschließlich chemisch-technisch
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Umsetzung von Propen mit Kohlenmonoxid und Wasserstoff bei 100-200°C und 200-450 bar über Cobaltkatalysator (Oxosynthese) zu Butanal, säurekatalysierte Oxidation mit Luftsauerstoff zu Buttersäure [Ullmann's, Hopp 1987, Weissermel 1978]. <u>biotechnisch:</u> Fermentation von Glucose oder Saccharose mit <i>Clostridium butyricum</i> [UBA Wien 1997a, Präve 1994, Muheim 1999].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> Degussa-Hüls AG, BASF AG, Rhône-Poulenc S.A. (Frankreich), Hoechst-Celanese (USA), Eastman Chemical Inc. (USA) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> unklar
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Emissionen:</u> Beim biotechnischen Verfahren Abfallsalze aus der Aufarbeitung. <u>Risikopotential:</u> Kohlenmonoxid ist giftig. Cobalt ist sensibilisierend (wird als Katalysator nur in geringen Mengen eingesetzt und tritt nicht in atembarer Form auf). <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoffe Propen, Kohlenmonoxid und Wasserstoff werden aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Prozeßenergiebedarf (Synthese erfordert erhöhte Temperaturen und erhöhten Druck). <u>Flächenbedarf</u> und Verwendung von Agrochemikalien für den Anbau von Zuckerrüben oder anderen Pflanzen.
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Kosten?
Sonstiges: Es gibt Hinweise auf die industrielle Nutzung des biotechnischen Verfahrens für spezielle Anwendungen (Aromastoff) [Muheim 1999].

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (3) Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium
Epichlorhydrin (Chlormethyloxiran; 1-Chlor-2,3-Epoxypropan) [CAS-Nr. 106-89-8]

Verwendung: Polymerherstellung (Epoxidharze), Zwischenprodukt in der chemischen Industrie (u.a. für Hilfsstoffe für die Papierverarbeitung, Ammoniumsalze)
Herstellungsmenge: Deutschland ca. 100 kt/a (1993)
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Hochtemperaturchlorierung von Propen (500°C) zu Allylchlorid (Chlorpropen), Umsetzung von Allylchlorid mit Hypochlorid zum Propylenchlorhydrin. Behandlung mit Base führt unter Abspaltung von Salzsäure zu Epichlorhydrin. Produktabtrennung durch Wasserdampfdestillation. Neutralisation mit Kali- oder Natronlauge. Als Kuppelprodukt entsteht 0,08 t 1,2,3-Trichlorpropan pro t Epichlorhydrin [Prognos 1994, Chernier 1992]. <u>biotechnisch:</u> 1) Stereospezifische Abspaltung von Salzsäure aus 1,3-Dichlor-2-Propanol durch Dehalogenase aus <i>Arthrobacter erithii</i> [Assis 1998, McCoy 1998a]. 2) Umsetzung von Propen mit Chlorid und Wasserstoffperoxid mittels Haloperoxidase zu Propylenchlorhydrin, Abspaltung des Chlors als Chlorid mittels Halohydrin-Epoxidase [Neidleman 1983, Leak 1992, Brink 1998, Ciba Foundation 1985].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> Dow Deutschland Inc. (Stade), Solvay <u>Biotechnische Verfahren:</u> 1) Dow Chemicals/Diversa (San Diego, USA; 2) Cetus Corporation (USA), Nippon Mining Co. (Japan), Agriculture University Wageningen (NL)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: (Verfahren 2) <u>Emissionen:</u> Bei der Herstellung von 1 t Allylchlorid fallen 0,26 t chlorierte Kohlenwasserstoffe an. Bei der Umsetzung zu Epichlorhydrin entstehen weitere 0,05 t (u.a. chlorierte Diisopropylether) pro 1 t Epichlorhydrin. Die Rückstände werden verbrannt. Organische Verunreinigungen im Abwasser (1-Chlor-Propan-2,3-Diol u.a.) werden durch biologische Abwasserreinigung entfernt. Das Abwasser ist salzhaltig (1,4 t Calciumchlorid pro 1 t). <u>Risikopotential:</u> Chlor ist giftig, reizend und wassergefährdend. Allylchlorid ist sehr giftig und leicht entzündlich, wassergefährdend und potentiell krebserzeugend (Kat. 3). Der Umgang mit Allylchlorid erfordert umfassende Schutzmaßnahmen. 1,2,3-Trichlorpropan ist gesundheitsschädlich und als krebserzeugend anzusehen (Kat. 2). <u>Ressourcenverbrauch:</u> Prozeßenergiebedarf.
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Das Verfahren ist nicht großtechnisch anwendungsfähig (Labormaßstab).

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (3) Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium
Mannitol (Mannit; D-Mannohexan-1,2,3,4,5,6-hexaol) [CAS-Nr. 69-65-8]

Verwendung: Wirkstoffträger in Pharmaka, Lebensmittelzusatzstoff
Herstellungsmenge: weltweit 20 kt/a (1992)
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Hydrierung von Sucrose (Saccharose, aus Stärke durch enzymatische Spaltung gewonnene Glucose-Fructose-Mischung) unter hohem Druck und Katalyse durch Raney-Nickel zu Mannitol (25%) und Sorbit (75%). Abtrennung des Mannitols aufgrund seiner geringeren Löslichkeit [Ullmann's, Römpf]. <u>biotechnisch:</u> Enzymatische Umsetzung von Stärke zu Mannitol und Sorbit [UBA Wien 1997a, Präve 1994, Kulbe 1991].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> Merck KGaA, Cerestar (Vilvoorde, Belgien), ICI (USA) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> Universität für Bodenkultur Wien
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Risikopotential:</u> Nickel ist sensibilisierend (wird als Katalysator nur in geringen Mengen eingesetzt und tritt nicht in atembare Form auf). Für die Verwendung von Mannitol in Lebensmitteln und Pharmaka muß der Katalysator restlos entfernt werden (Ionenaustausch). <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsprodukt Wasserstoff wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Prozeßenergiebedarf (Synthese erfordert erhöhten Druck).
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Verfahren nicht großtechnisch anwendungsreif (Labormaßstab).
Sonstiges: Vgl. Kennblatt Sorbit.

prognos 2000

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (3) Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium
L-Phenylalanin [CAS-Nr. 63-91-2]

Verwendung: Eingangsstoff zur Herstellung von Aspartam
Herstellungsmenge: weltweit 3 kt/a
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> a) Umsetzung von Benzylchlorid mit Kohlenmonoxid und Wasser bei 60°C und 50 bar über Cobalt-Katalysator und anschließend reduzierende Aminierung mittels Ammoniak und Wasserstoff über Nickel-Katalysator. Benzylchlorid wird durch Chlorierung von Toluol hergestellt [Rehm 1996, Kirk-Othmer]. b) Umsetzung von Benzylchlorid mit Acetamid zu N-Acetyl-D,L-Phenylalanin, chemisch-technische oder enzymatische Hydrolyse. Im ersten Fall entsteht ein Racemat, das ggf. getrennt werden muß. Acetamid wird u.a. durch Erhitzen von Ammoniumacetat (aus Essigsäure und Ammoniumcarbonat) hergestellt [Rehm 1996, Kirk-Othmer]. <u>biotechnisch:</u> 1) Fermentativ aus Glucose mit Coryneform Stämmen bei 30-35°C, Ausbeute bis 98% [US-Patent No. 5614392 (1997)]. Ferner Fermentation mit <i>E. coli</i> [Rehm 1996]. 2) Fermentativ aus n-Alkanen mit <i>Arthrobacter paraffineus</i> [Yamaguchi 1973].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technische Verfahren:</u> Degussa-Hüls AG, Ajinomoto (Japan) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> 1) Food Industry Research and Development Institute (Taiwan); 2) Tokio Research Laboratory (Japan)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: (Verfahren 1) Verfahren a): Risikopotential: Kohlenmonoxid und Chlor sind giftig, Benzylchlorid ist als krebserzeugend anzusehen (Kat. 2). Die Co- und Ni-Katalysatoren sind sensibilisierend. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Prozeßenergiebedarf? Verfahren b): Risikopotential: Chlor ist giftig. Benzylchlorid ist als krebserzeugend anzusehen (Kat. 2). Acetamid ist möglicherweise krebserzeugend (Kat. 3). <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoffe Toluol, Wasserstoff und Kohlenmonoxid werden aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Prozeßenergiebedarf?
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Das Verfahren ist nicht großtechnisch anwendungsreif (Labormaßstab).
Sonstiges:

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (3) Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium
1,3-Propandiol [CAS-Nr. 504-63-2]

Verwendung: Lösungsmittel, Additiv für Schmierstoffe, Polymerherstellung (Polyurthane, zukünftig auch Polytrimethylenterephthalat = PTT)
Herstellungsmenge: weltweit 100 kt (1993), aktuelle Menge unklar, da weltweit Kapazitätsausbau für das chemisch-technische Verfahren
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> a) Katalytische Oxidation von Propen zu Acrolein (2-Propenal) bei 300-400°C und 15-25 bar, Hydrolyse zu 3-Hydroxypropenal, katalytische Reduktion der Aldehydgruppe mit Raney-Nickel bei 110-150°C und 20-40 bar zu Alkohol, Gewinnung des 1,3-Propandiols aus dem Lösungsmittel durch Destillation [Ullmann's, Römpf, BUA 1995] b) Hydroformylierung von Ethylenoxid mit Rhodiumkatalysator [Ullmann's, Römpf] <u>biotechnisch:</u> 1) Fermentation von Rohglycerin (z.B. aus der Fettsäurespaltung) mit <i>Clostridium butyricum</i> [Vorlop 1998] 2) Fermentation von Glucose oder Stärke mit gentechnisch veränderten Bakterien [Menzel 1998, N.N. 1998d, McCoy 1998]
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> a) Degussa-Hüls AG; b) Shell (Geismar, USA) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> 1) Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (Braunschweig); 2) Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (Braunschweig), Gesellschaft für Biotechnologische Forschung mbH (Braunschweig), DuPont/Genencor International (USA)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Emissionen:</u> Diffuse Emissionen von Acrolein. <u>Risikopotential:</u> Acrolein ist sehr giftig, möglicherweise krebserzeugend (Kat. 3) und hochentzündlich. Propen ist hochentzündlich. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Der Eingangsstoff Propen wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen. Möglicherweise hoher Prozeßenergiebedarf des biotechnischen Verfahrens (abhängig von Produktisolation und -aufbereitung).
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Kosten, Einsatzspektrum PTT als Ersatz für Nylon.
Sonstiges: Der Bedarf an 1,3-Propandiol wird voraussichtlich stark steigen, da der daraus produzierte Kunststoff PTT nylonartige Eigenschaften hat.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (3) Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium
Propionsäure (Propansäure) [CAS-Nr. 79-09-4]

Verwendung: Lebensmittelindustrie (Konservierungsmittel), Futtermittelindustrie
Herstellungsmenge: Kapazität weltweit 190 kt/a, Deutschland 60 kt/a (1989)
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> a) Carbonylierung von Ethen mit Kohlenmonoxid und Wasser über Nickeltetracarbonyl-Katalysator bei 100-300 bar und 250-320°C [Ullmann's]. b) Oxidation von Propanal bei 40-50°C. Propanal wird durch Carbonylierung von Ethen mit Kohlenmonoxid und Wasser über Cobalt-Katalysator bei 200-280°C und 130-150°C bzw. über Rhodium- oder Iridium-Katalysator bei 20 bar und 100°C hergestellt [Ullmann's]. c) Direkte Oxidation der Leichtbenzin-Fraktion (Siedebereich 30-100°C) aus Erdöl bei 40-45 bar und 170°C in Reaktorserie, Abtrennung von Nebenprodukten (Ameisensäure, Essigsäure, isomere Butansäuren) durch fraktionierte Destillation [Ullmann's]. <u>biotechnisch:</u> Anaerobe Fermentation von Zucker oder Stärke mit <i>Propionibacterium shermanii</i> [Jonas 1998, Renneberg 1990, Dellweg 1987].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technische Verfahren:</u> a) BASF AG; b) Union Carbide (USA), Eastman Chemical (USA); c) BP Chemicals (U.K.), Hoechst-Celanese (USA), Daicel (Japan) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> Gesellschaft für Biotechnologische Forschung mbH (Braunschweig)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: <u>Emissionen:</u> Beim biotechnischen Verfahren Abfallsalze aus der Aufarbeitung. <u>Risikopotential:</u> Kohlenmonoxid ist giftig. Ethen ist hochentzündlich. Die Nickel- bzw. Cobaltkatalysatoren sind sensibilisierend. <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsstoffe werden aus fossilen Rohstoffen gewonnen, Prozeßenergiebedarf? <u>Flächenbedarf</u> und Verwendung von Agrochemikalien für die Erzeugung nachwachsender Rohstoffe.
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Das Verfahren ist nicht großtechnisch anwendungsreif (Labormaßstab). Vermutlich ist die biotechnische Herstellung teurer als die chemisch-technische.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (3) Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium
Propylenoxid (1,2-Epoxypropan) [CAS-Nr. 75-56-9]

Verwendung: Polymerherstellung (Polyester, Polyurethane), bei Herstellung mittels Ethylbenzol Kuppelprodukt zu Styrol, Bestandteil von Frostschutzmitteln u.a.
Herstellungsmenge: Deutschland 761 kt/a (1997), ausschließlich chemisch-technisch
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> a) Chlorhydrinsynthese: Umsetzung von Propen mit Chlor in wässriger alkalischer Lösung bei 50°C und geringem Druck zu Propylenchlorhydrin, Cyclisierung zu Epoxid unter Abspaltung von Salzsäure. Nebenprodukte sind Dichloride (1,2-/1,3-Dichlorpropan) und Halogenether. Abtrennung des Propylenoxids durch Destillation. b) Peroxidsynthese (Halcon-Prozeß): Umsetzung von Propen mit t-Butyl- oder Ethylbenzylhydroperoxid zum Epoxid und zum entsprechenden Alkohol bei 100-130°C und 148-355 bar. Aufwendige Abtrennung des Propylenoxids durch Destillation. Die Hydroperoxide werden durch Oxidation von Isobutan bzw. Ethylbenzol (aus Benzol und Ethen bei 90°C über Aluminiumchlorid) bei 95-150°C und 200-550 bar hergestellt. <u>biotechnisch:</u> Oxidation von Propen direkt zum Epoxid mit Monooxygenase aus <i>Methylococcus capsulatus</i> [Stanley 1992, Ciba Foundation 1985, Renneberg 1990].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technische Verfahren:</u> a) Dow Deutschland Inc., BASF AG. b) ARCO (USA) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> Universität Warwick (Coventry, U.K.), Cetus Corporation (USA)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: (Verfahren a) <u>Emissionen:</u> Chlorierte und nicht chlorierte Kohlenwasserstoffe müssen aus dem Abwasser entfernt werden, Das Abwasser enthält 2 t Salz pro 1 t produziertes Propylenoxid. <u>Risikopotential:</u> Propylenchlorhydrin und Chlor sind giftig, t-Butylalkohol ist leichtentzündlich, 1,2-Dichlorpropan ist möglicherweise krebserzeugend (Kat. 3). <u>Ressourcenverbrauch:</u> Hoher Wasserbedarf.
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Das Verfahren ist nicht großtechnisch anwendungsreif.
Sonstiges: Die biotechnische Synthese von Epoxyalkanen kann nur bei Propylenoxid wirtschaftlich sein, da andere Epoxyalkane katalytisch direkt aus Sauerstoff und dem entsprechenden Alken herstellbar sind. Für die entsprechende chemisch-technische Synthese von Propylenoxid aus Propen gibt es (noch?) keinen geeigneten Katalysator.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (3) Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium
Sorbit (Sorbitol; D-Sorbit; D-Sorbitol; D-Glucit) [CAS-Nr. 50-70-4]

Verwendung: Zuckersubstitut für Diabetiker; Feuchtigkeitsbewahrer in Lebensmitteln, Kosmetika und Pharmazeutika
Herstellungsmenge: weltweit 650 kt/a (1992)
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> Durch Raney-Nickel katalysierte Hydrierung von Glucose unter hohem Druck (70-180 bar) bei 120-150°C. Abkühlung, Abtrennung des Katalysators durch Präzipitation und Filtration, Reinigung mit Aktivkohle und Ionenaustauscher [Ullmann's, Römpp]. <u>biotechnisch:</u> 1) Enzymatische Umsetzung von Stärke zu Sorbit und Mannitol [UBA Wien 1997a, Präve 1994, Kulbe 1991]. 2) Umsetzung von Glucose/Fructose mit Glucose-Fructose Oxidoreduktase (aus <i>Zymomonas mobilis</i>) [Jonas 1998].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technisches Verfahren:</u> Merck KGaA, Cerestar (Vilvoorde, Belgien), ICI (U.K.) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> Universität für Bodenkultur Wien, Gesellschaft für biotechnologische Forschung mbH (GBF)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: (Verfahren 1) <u>Risikopotential:</u> Nickel ist sensibilisierend (wird als Katalysator nur in geringen Mengen eingesetzt und tritt nicht in atembarer Form auf). Für die Verwendung von Sorbit in Lebensmitteln muß der Katalysator restlos entfernt werden (durch Ionenaustauscher). <u>Ressourcenverbrauch:</u> Eingangsprodukt Wasserstoff wird aus fossilen Rohstoffen gewonnen, Prozeßenergiebedarf (Synthese erfordert hohen Druck und hohe Temperaturen).
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Das Verfahren ist noch nicht großtechnisch anwendungsreif (Labormaßstab).
Sonstiges: Vgl. Kennblätter Mannitol und Vitamin C.

Vergleich chemisch-technischer Synthesen mit biotechnischen Verfahren
Gruppe: (3) Biotechnisches Verfahren im Entwicklungsstadium
Vanillin (4-Hydroxy-3-Methoxybenzaldehyd) [CAS-Nr. 121-33-5]

Verwendung: Lebensmittelzusatzstoff, Zwischenprodukt der Pharmaindustrie
Herstellungsmenge: Weltweit ca. 8 kt/a, davon 80% chemisch-technisch (überwiegend aus Lignin), 20% durch Extraktion aus Vanille-Schoten
Prinzip der Verfahren: <u>chemisch-technisch:</u> a) Umsetzung von Guaiacol mit Glyoxylsäure, katalytische Oxidation mit Luftsauerstoff und anschließende Abspaltung von Kohlendioxid. Das Edukt Guaiacol wird aus Phenol (Herstellung nach dem Hock-Verfahren, siehe Kennblatt Aceton) durch Oxidation mit Wasserstoffperoxid und Veresterung mit Methanol hergestellt. Glyoxylsäure entsteht bei Oxidation von Ethen über Paladium-Katalysator [Römpp, Ullmann's]. b) Behandlung von Lignin (aus Sulfit-Abfällen der Celluloseindustrie) mit Natron- oder Kalilauge unter Druck und bei erhöhter Temperatur (wichtigstes Verfahren Herstellung von synthetischem Vanillin). Trennung von Nebenprodukten (insbesondere Acetovanillin) durch Extraktion, Destillation und Kristallisation [Ullmann's]. <u>biotechnisch:</u> 1) Fermentation von Glucose mit gentechnisch veränderten <i>E. coli</i> und anschließender Reduktion durch Dehalogenase aus <i>Neurospora crassa</i> [Li 1998]. 2) Mikrobielle Umsetzung von Ferulasäure zu Vanillin. Produktisolierung durch Mikrofiltration und Gegenstromextraktion. Reinigung mit Aktivkohle und anschließender Kristallisation und Filtration. Die Ferulasäure kann entweder aus Reisspelzen – einem Nebenprodukt bei der Reisölherstellung – oder durch mikrobielle Oxidation von Eugenol, das durch Extraktion aus verschiedenen Pflanzen gewonnen wird, hergestellt werden [Muheim 1999, McCoy 1998].
Wichtige Akteure: <u>Chemisch-technische Verfahren:</u> Rhône-Poulenc S.A. (Frankreich) <u>Biotechnisches Verfahren:</u> 1) Michigan State University (East Lansing/MI, USA). 2) Givaudan Roure Aromen AG (Dübendorf, Schweiz), Haarmann und Reimer GmbH (Holzminden)
Bilanz der wichtigsten Umweltschutzaspekte: (Verfahren b und 2) <u>Ressourcenverbrauch:</u> Prozeßenergiebedarf? Bei Herstellung von Ferulasäure aus Reisspelzen (Verwertung von Reststoffe) sind keine eigens erzeugten landwirtschaftlichen Rohstoffe erforderlich.
Kritische Bedingungen für die großtechnische Nutzung des biotechnischen Verfahrens: Nach den vorliegenden Informationen sind die biotechnischen Verfahren nicht anwendungsreif. Biotechnisch hergestelltes Vanillin darf als "natürlich" deklariert werden.

Anhang 2: Liste der im Zuge der Untersuchung kontaktierten Unternehmen und Institutionen

- BASF AG, Ludwigshafen
- BASF Schwarzheide GmbH, Schwarzheide
- Bayer AG, Leverkusen
- Biotectra-Technologietransfer, Basel
- Ciba Spezialitätenchemie AG, Basel
- Creavis – Gesellschaft für Technologie und Innovation mbH, Marl
- Degussa-Hüls AG, Hanau-Wolfgang
- Department of Chemistry, Michigan State University, East Leansing, USA
- Deutsche Gesellschaft für chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA), Frankfurt
- Dow Deutschland Inc., Stade
- Dow Europe S.A., Horgen, Schweiz
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gützow
- Fraunhofer Institut Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe
- Gesellschaft für Biotechnologische Forschung mbH (GBF), Braunschweig
- Haarmann & Reimer GmbH, Holzminden
- Hoffmann-La Roche AG, Basel
- Institut für Biotechnologie, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich
- Institut für Lebensmitteltechnologie, Universität für Bodenkultur Wien, Wien
- Institut für Technologie, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig

- Institut für Technologische Zukunftsforschung (IPTS), Sevilla
- Institut für Verfahrens, Brennstoff- und Umwelttechnik, Technische Universität Wien
- Lonza AG, Basel
- Merck KGaA, Darmstadt
- Peroxid-Chemie GmbH, Pullach
- Verband der Chemischen Industrie e.V. – Landesverband Bayern/
Verein der Bayerischen Chemischen Industrie e.V., München
- Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt/M.

Anhang 3: Programm des Workshops vom 8. Juli 1999 beim Umweltbundesamt in Berlin

- 10.00 h **Begrüßung**
Frau Dr. med. habil. Jutta Dürkop, Umweltbundesamt
- 10.10 h **Einführung:** Ziele und Ansatz der Untersuchung "Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren"
Herr Dr. Heimfrid Wolff, Prognos AG
- 10.20 h **Vortrag:** Stand der Verfahrensentwicklung und Anwendung biotechnischer Verfahren in den Bereichen Fein- und Grundchemikalien
Herr Klaus Kämpf, Prognos AG
- 11.00 h **Vortrag:** Fallbeispiel 1: Aceton/Butanol
Herr Dr. Richard Gapes, Technische Universität Wien
Herr Klaus Kämpf, Prognos AG
- 12.10 h **Mittagspause**
- 12.50 h **Vortrag:** Fallbeispiel 2: 1,3-Propandiol
Herr Klaus Kämpf, Prognos AG
- 13.40 h **Vortrag:** Juristische Aspekte der biotechnischen Herstellung von Chemikalien
Frau Anja Schmolke, Prognos AG
- 14.15 h **Gemeinsame Diskussion**
Moderation: Herr Dr. Heimfrid Wolff, Prognos AG

Einführung: Schlußfolgerungen und Fragen:
Herr Klaus Kämpf, Prognos AG
- 15.10 h **Schlußwort**
Herr Dr. Heimfrid Wolff, Prognos AG
- 15.15 h Ende der Veranstaltung

Anhang 4: Teilnehmer des Workshops am 8. Juli 1999 beim Umweltbundesamt in Berlin

- Bünning, Dr. Rüdiger Linde-KCA-Dresden GmbH, Dresden
- Drechsler, Dr. Wolf Umweltbundesamt, Fachgebiet III 2.6, Berlin
- Drotleff, Johannes Umweltbundesamt, Fachgebiet III 2.6, Berlin
- Dubbert, Dr. Wolfgang Umweltbundesamt, Fachgebiet IV 2.6, Berlin
- Dürkop, Dr. med. habil. Jutta Umweltbundesamt, Fachgebiet IV 2.6, Berlin
- Fischer, Dr. Horst Umweltbundesamt, Fachgebiet III 3.4, Berlin
- Gapes, Dr. Richard Institut für Verfahrens, Brennstoff- und Umwelttechnik, Technische Universität Wien
- Hausdorf, Dr. Gabriele Bundesministerium für Bildung und Forschung, Ref. 611, Bonn
- Heiden, Dr. Stefanie Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
- Heinze, Prof. Dr. Elmar Universität des Saarlandes, Saarbrücken
- Holland, Dr. Doris Creavis – Gesellschaft für Technologie und Innovation mbH, Marl
- Jenal-Wanner, Dr. Ursula Schweizerische Bundesanstalt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- Junge, Dr. Claudia Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger BEO, Berlin
- Kämpf, Klaus Prognos AG, Basel
- Knorst, Marion Deutsche Gesellschaft für chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA), Frankfurt
- Kolbeck, Dr. Winfried Collegium Economy Research Technology, München

- Lange, Dr. Ulf Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn
- Müller, Dr. Roland Umweltforschungszentrum Leipzig Halle GmbH,
Umweltbiotechnologisches Zentrum, Leipzig
- Peterek, Dr. Gabriele Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gützow
- Pleuß, Holger Umweltbundesamt, Fachgebiet IV 2.5, Berlin
- Poel, Marion Bundesministerium für Umwelt, Reaktorsicherheit und
Naturschutz, Ref. N II 4, Bonn
- Treffenfeldt, Prof. Dr. Wiltrud Degussa-Hüls AG, Hanau-Wolfgang
- Reblin, Nicole Umweltbundesamt, Fachgebiet IV 1.1, Berlin
- Schmolke, Anja Prognos AG, Basel
- Schwarz, Dr. Thomas bitop – Gesellschaft für Biotechnische Optimierung
mbH, Witten
- Sell, Dr. Dieter Deutsche Gesellschaft für chemisches
Apparatewesen, Chemische Technik und
Biotechnologie e.V. (DECHEMA), Frankfurt
- Steinhäuser, Dr. Klaus-G. Umweltbundesamt, Abteilung IV 2, Berlin
- Tiedemann, Albrecht Umweltbundesamt, Fachgebiet III 3.3, Berlin
- Vetter, Dr. Joachim Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger BEO,
Jülich
- Weiland-Wascher, Dr. Annett Umweltbundesamt, Fachgebiet III 3.6, Berlin
- Wolf, Oliver Institut für Technologische Zukunftsforschung (IPTS),
Sevilla/Spanien
- Wolff, Dr. Heimfrid Prognos AG, Basel