

**Entlastungseffekte für die Umwelt
durch Substitution konventioneller
chemisch-technischer Prozesse und Produkte
durch biotechnische Verfahren
– vergleichende Analyse***

Dr. Klaus Hoppenheidt, Rene Peche, Dr. Dieter Tronecker, Udo Roth, Sarah Hottenroth

Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und –technik – BIfA GmbH
Am Mittleren Moos 46, D-86167 Augsburg

* Der Beitrag enthält ausgewählte Ergebnisse einer im Juli 2004 abgeschlossenen umfassenden Studie (Hoppenheidt et al., 2004). Dieses Vorhaben wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Umweltforschungsplanes – Förderkennzeichen 202 66 326 erstellt und mit Bundesmitteln finanziert.

Ausgangssituation

Die internationale Staatengemeinschaft hat sich auf der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro zum Leitbild der Nachhaltigen Entwicklung bekannt, das die Brundtland-Kommission für Umwelt und Entwicklung 1987 in ihrem Bericht „Our Common Future“ vorstellte (WCED, 1987). Mit der Agenda 21 wurde ein globales Aktionsprogramm formuliert, das von den Unterzeichnerstaaten die Entwicklung von Strategien fordert, die eine wirtschaftlich leistungsfähige, sozial gerechte und ökologisch verträgliche Entwicklung zum Ziel haben. Die Bundesregierung hat 2002 eine Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland veröffentlicht und 21 Schlüsselindikatoren benannt, deren Monitoring die Annäherung Deutschlands an die benannten Nachhaltigkeitsziele aufzeigen soll (Bundesregierung Deutschland, 2002). 6 der 21 Schlüsselindikatoren betreffen Umweltbelange und es werden folgende Ziele angestrebt.

6 von 21 Nachhaltigkeitsindikatoren betreffen Umweltbelange	
▪ <u>Ressourcenschonung:</u>	
Ressourcenproduktivität (Materialien):	1990 → 2020: + 100 %
Ressourcenproduktivität (Energie):	1994 → 2020: + 100 %
▪ <u>Erneuerbare Energien:</u>	
Anteil am Primärenergieverbrauch:	2000 → 2010: + 100 %
Anteil am Stromverbrauch:	2000 → 2010: + 100 %
<u>Klimaschutz:</u>	
Reduktion der Treibhausgase:	1990 → 2010: - 15 %
▪ <u>Luftqualität:</u>	
Emissionen von Luftschadstoffen:	1990 → 2010: - 70 %
▪ <u>Flächeninanspruchnahme:</u>	
Begrenzung der Zunahme:	jetzt → 2020: - 77 %
▪ <u>Artenvielfalt:</u>	
Stabilisierung der Artenvielfalt auf hohem Niveau	

Abbildung 1: Umweltbezogene Ziele der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie

Ansätze zur Entkopplung des Wirtschaftswachstums von der Nutzung der Umweltressourcen sind in Deutschland inzwischen erkennbar. Das Umweltbundesamt hat einen Kennwert eingeführt, der Entwicklungstrends des Umweltschutzes in Deutschland widerspiegelt - den Deutschen Umweltindex, kurz DUX. Derzeit wurden erst 2.013 von angestrebten 6.000 DUX-Punkten erreicht (Zwischenstände der DUX-Kategorien 09/2003: Zielwert: jeweils 1.000 Pkt.; Istwerte: Luft: 704 Pkt.; Klima: 615 Pkt.; Wasser: 320 Pkt.; Energie: 242 Pkt.; Rohstoffe: 99 Pkt.; Boden: 33 Pkt.).

Die angestrebten Zielwerte entsprechen den oben genannten Zielwerten der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. Beim Klimaschutz und der Luftreinhaltung wurden Zielvorgaben bereits zu 70 bzw. 62 % realisiert, doch werden erhebliche Anstrengungen erforderlich sein,

um die nationalen Zielvorgaben für die Rubriken Wasser, Energie, Ressourcen und Boden erreichen zu können. Obwohl der Stand der in Deutschland realisierten Umweltschutzmaßnahmen im europäischen und im weltweiten Vergleich als fortgeschritten eingestuft werden kann (EEA, 2003; UNEP, 2002), ist der Handlungsbedarf auf nationaler wie internationaler Ebene unverändert groß, wenn das 1987 formulierte Leitbild einer Nachhaltigen Entwicklung Realität werden soll.

Beitrag der Biotechnologie zur Nachhaltigen Entwicklung

Bis Mitte der 90er Jahre waren die Haupteinsatzbereiche der Biotechnologie der Nahrungsmittelsektor und der Umweltschutzbereich (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Weltmarkt der traditionellen Biotechnologie um 1990 (n. Leuchtenberger, 1998)

Applikationsgebiet	Produktbeispiele	Wert US-\$ pro Mg	Gesamt (Mrd. US-\$)
Nahrungs- und Genussmittel-Industrie	Getränke (Bier, Wein u. a.), Fleisch- und Fischprodukte, Backwarenzusätze (z. B. Hefe), Lebensmittelzusätze (Antioxidantien, Färb- und Geschmacksstoffe u. a.), Vitamine, Stärkeprodukte	500 - 7.000	280
Umweltschutz	Abwasserreinigung, Abfallverwertung, Beseitigung von Ölverschmutzungen	1 - 300	250
Pharma-Industrie	Antibiotika, Diagnostika (Antikörper u. a.) Vakzine, Steroide, Vitamine, Alkaloide	0,05 - 20 Mio.	15
Chemie-Industrie	Grundchemikalien/Massenprodukte: Ethanol, Aceton, Butanol, Glucose u. a. Feinchemikalien: Enzyme, Duftstoffe u. a.	500 - 5.000	5
Landwirtschaft	Futterzusätze, Vakzine, Biopestizide, Silage, Wachststoffe, Kompost	100 - 500.000	2
Energiesektor	Ethanol, Biomasse als Ausgangsstoff	500 - 2.000	1,5

Die 1992 formulierte Agenda 21 zur Rio-Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung wies jedoch im Abschnitt 16 auf das Entwicklungspotential der Biotechnologie hin:

„Die Biotechnologie umfaßt sowohl die im Rahmen der modernen Biotechnologie entwickelten neuen Techniken als auch die bewährten Ansätze der traditionellen Biotechnologie. Als innovativer, wissensintensiver Forschungsbereich bietet sie eine Vielzahl nützlicher Verfahrenstechniken für vom Menschen vorgenommene Veränderungen der Desoxyribonukleinsäure (DNS), oder des genetischen Materials in Pflanzen, Tieren und Mikroorganismengruppen, deren Ergebnis überaus nützliche Produkte und Technologien sind. Die Biotechnologie ist nicht in der Lage, von sich aus all die grundlegenden Umwelt- und Entwicklungsprobleme zu lösen, weshalb die Erwartungen durch eine realistischere Sicht eingeschränkt werden sollten. Dennoch verspricht die Biotechnologie, einen bedeutenden Beitrag zur Erzielung von Fortschritten beispielsweise in der Gesundheitsversorgung, in der Ernährungssicherung in Form von nachhaltigen Anbaupraktiken, einer verbesserten Versorgung mit Trinkwasser, leistungsfähigeren industriellen Erschließungsprozessen für die Umwandlung von Rohstoffen, der Förderung nachhaltiger Aufforstungs- und Wiederaufforstungsverfahren und der Entgiftung von Sonderabfällen zu leisten.“

Heute zeichnet sich eine Umsetzung der in Agenda 21 benannten Entwicklungen ab. Einsatzbereiche der traditionellen Biotechnologie weiten sich aus: So werden in Deutschland nunmehr nicht nur in rd. 10.000 kommunalen Kläranlagen biologische Reinigungsstufen betrieben, sondern inzwischen 7,6 Mio. Mg Bioabfälle in biologischen Verwertungsanlagen genutzt (BMU, 2004a). Innerhalb von einem Jahrzehnt sind zudem mehr als 1.900 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 250 MW neu in Betrieb genommen worden (Fachverband Biogas, 2004). Insgesamt ist der Beitrag der Biomassenutzung zur Stromproduktion von 222 GWh in 1990 auf nunmehr 5.140 GWh in 2003 angestiegen (BMU, 2004b).

Die Fortschritte der Molekularbiologie und vor allem der Gentechnik tragen zudem dazu bei, dass sich die Biotechnologie auch in jenen Anwendungsbereichen rasch fortentwickelt, in denen sie bislang erst ein geringes Marktpotential besaß. Die European Association for Bioindustries nennt als Anwendungsfelder der modernen Biotechnologie die Bereiche:

- *Healthcare Biotechnology* („Rote Biotechnologie“): Aktuell sollen Bioprodukte (Proteine, Antikörper, Enzyme) bereits einen Marktanteil von ~ 20 % haben und Neuentwicklungen sollen zu 50 % Bioprodukte sein.
- *Green Biotechnology* („Grüne Biotechnologie“): Die Nutzung von gentechnisch veränderten Pflanzen (und Tieren) in der Landwirtschaft begann vor 10 Jahren. In den USA werden inzwischen 46 % des Mais, 86 % des Sojas und 76 % der Baumwolle mit gentechnisch verändertem Saatgut angebaut (BIO, 2004). Aktuelle Entwicklungen haben die Nutzung von Pflanzen (und Tieren) für die kostengünstige Produktion von Pharmaprodukten und Industrierohstoffen zum Ziel (D'Aquino, 2003).
- *White Biotechnology* („Weiße Biotechnologie“): Nutzung der Biotechnologie als einen Baustein für eine nachhaltige zukunftsverträgliche Chemie („Green Chemistry“) (BACAS, 2004).

Im Rahmen dieses Beitrags sind vor allem die Entwicklungen im Bereich der *White Biotechnology* von Interesse.

Die in Abbildung 2 dargestellte Prognose verdeutlicht, dass der Umsatz mit industriell hergestellten Bioprodukten im Vergleich zum weltweiten Gesamtumsatz der Chemischen Industrie derzeit noch relativ gering ist. Allerdings wird für die nächsten Jahre ein starkes Wachstum biotechnischer Anwendungen erwartet, da die Nutzung von modernen biotechnischen Verfahren deutliche Reduktionen der Kosten und der Umweltbelastungen in Aussicht stellen. Sowohl Bachmann et al. (2000) als auch Festel et al. (2004) gehen davon aus, dass sich der Umsatz biotechnischer Produkte bis 2010 verzehnfacht und auf rd. 20 % des weltweiten Chemieumsatzes ansteigen wird.

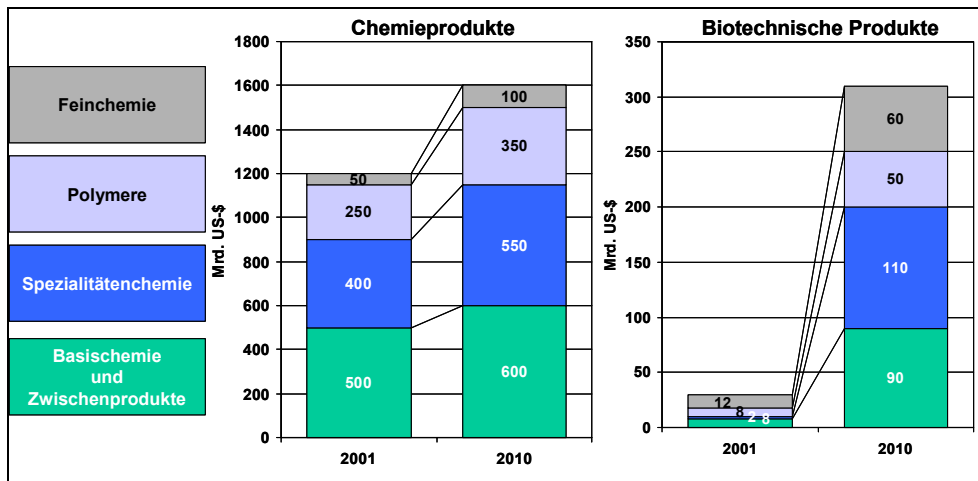


Abbildung 2: Weltweiter Umsatz chemischer und biotechnischer Produkte im Jahr 2001 und Progesedaten für 2010 (Daten: Festel, 2004)

Beispielhaft zeigt Abbildung 3, dass die Wettbewerbsfähigkeit biotechnischer Produktionsverfahren durch gentechnische Optimierungen der Produktionsstämme inzwischen erheblich verbessert wurde: Im Vergleich zur Enzymproduktion mit einem konventionellen Produktionsstamm werden durch die Anwendung des gentechnisch optimierten Produktionsstammes Ressourcen und Energie eingespart. Gentechnische Optimierungen können die Produktausbeuten und die Produkteigenschaften verbessern, sodass sich z.B. Einsparungen bei der Fermentation, der Enzymisolierung und der Enzymanwendung erzielen lassen. Aufgrund der ökonomischen und ökologischen Vorteile kommen heute nahezu ausschließlich gentechnisch optimierte Enzymproduzenten für die Herstellung technischer Enzyme zum Einsatz.

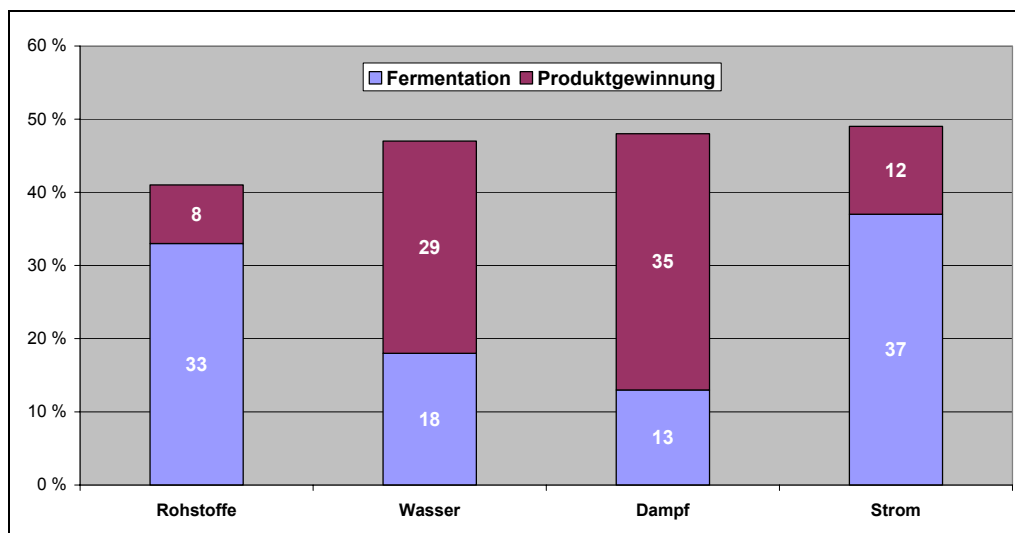


Abbildung 3: Einsparungen an Rohstoffen, Wasser, Dampf und Strom durch die Verwendung eines genetisch optimierten Enzymproduzenten

Daten jeweils im Vergleich zum Verfahren mit einem konventionellen Produktionsstamm (Daten von Novo Nordisk, zitiert in OECD, 1998)

Analoge Optimierungen der Produktionsprozesse wurden für unterschiedlichste Anwendungsbereiche der Biotechnologie erarbeitet und neuartige Anwendungen der Biotechnologie befinden sich in der Entwicklung (Aristidou et al., 2000; Chartrain et al., 2000; Cotassa et al., 2002; Desai, 2002; Wubbolts, 2002).

Obwohl die Prozessoptimierungen primär aus ökonomischen Gründen erfolgten, können sich dadurch auch ökologische Vorteile ergeben. Die OECD (2001) hat in 21 Fallstudien überprüft, inwieweit durch die Anwendung moderner biotechnischer Verfahren eine Reduktion der produktionsbedingten Umweltbelastungen erzielt wurde. In Tabelle 2 sind die bei den Auswertungen ermittelten Umweltentlastungspotentiale zusammengefasst, die bei den überprüften Anwendungsfällen (über einen weiten Bereich streuende) Umweltentlastungen dokumentieren.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse der 21 von der OECD ausgewerteten Fallstudien zum Umweltentlastungspotential innovativer Biotechnologie (OECD, 2001)

Fallstudie	Einsatz von		Emission in		Betriebskosten
	Energie	Rohstoffen	Luft	Wasser	
1	Gleich	-75 % fossile Rohst.	-50 %	-66 %	-50 %
2			-90 %	-33 %	-90 % (umweltbez.)
3	Strom +; Dampf -		-80 %	-80 %	Reduktion
4	Gleich				-43 %
6	-80 %		Geringer	Geringer	Geringer
7		Geringer	Geringer	Geringer	-54 % (Rohstoffe)
8	Geringer		Geringer		Geringer
10	-70 %			-80 %	-40 %
11		-50 % Grundwasser			-30 % (Grundwass.)
12	-15 %	Geringer (Wasser)		Geringer	-9 %
13	-30 – 40 %	Geringer		Geringer	
16		-35% Cl ₂ ; -65% ClO ₂		Geringer	
17		Geringer (Recycling)		Geringer	
18	Geringer		Geringer		Geringer
21				Geringer	Produktivitätsanstieg

Titel der Fallstudien: 1 Manufacture of Riboflavin (Vitamin B2); 2 Production of 7-Amino-cephalosporanic Acid; 3 Biotechnological Production of the Antibiotic Cephalexin; 4 Bioprocesses for the Manufacture of Amino Acids; 6 Enzymatic Production of Acrylamide; 7 Enzymatic Synthesis of Acrylic Acid; 8 Enzyme-Catalysed Synthesis of Polyesters; 10 A Vegetable Oil Degumming Enzyme; 11 Water Recovery in a Vegetable-processing Company; 12 Removal of Bleach Residues in Textile Finishing; 13 Enzymatic Pulp Bleaching Process; 16 On-site Production of Xylanase; 17 A Gypsum-free Zinc Refinery; 18 Copper Bioleaching Technology; 21 Use of Enzymes in Oilwell Completion

Aufgabenstellung

Das Umweltbundesamt hat Teilaspekte der oben skizzierten Entwicklungstendenzen in zahlreichen Studien untersuchen lassen (Mieschendahl, 2004), die insgesamt eine Diskrepanz zwischen den oben skizzierten Erwartungen zum Beitrag der Biotechnologie für eine nachhaltige Entwicklung und dem aktuellen Realisierungsstand ergeben haben. Die vom Umweltbundesamt für den UFOPLAN 2002 formulierte Projektausschreibung sah deshalb vor, das Potential der Biotechnologie für eine umweltverträgliche Produktion weiter zu untersuchen:

„Die Biotechnik, definiert als „Nutzung biologischer Organismen, Systeme und Verfahren zur Produktion von Waren und Dienstleistungen“, ist eine vielseitig einsetzbare Basistechnik und gilt, insbesondere auch unter Einbeziehung der Gentechnik, als eine Schlüsseltechnik für das 21. Jahrhundert. Als typische Querschnittstechnologie erfasst sie eine Vielzahl von Wirtschaftsbereichen: Biologie, Chemie, Pharmazie, Human- und Veterinärmedizin, Umweltschutz, Land- und Forstwirtschaft. In Bezug auf die chemische Industrie bietet die Biotechnik umfassende Möglichkeiten für eine umweltverträgliche industrielle Produktion und Verfahren. Solche sind bereits in einigen Industriezweigen, insbesondere der Pharma-, Wasch- und Reinigungsmittelindustrie sowie der Lebensmittelindustrie, etabliert.

Zu den umweltschonenden bzw. umweltverträglichen Potentialen der Biotechnik im Bereich der industriellen Produktion zählen insbesondere die Ressourcenschonung, die Verringerung von Emissionen, die Substitution fossiler Rohstoffe durch biologisch abbaubare Reststoffe/Biomasse, der Stoffen und Chemikalien sowie der Verzicht auf den Einsatz gefährlicher Stoffe und die Vermeidung kritischer Reaktionsbedingungen.

Die Biotechnik kann aber nicht von vornherein als umweltfreundlich eingestuft werden. Auch bei der biotechnischen Produktion werden Energie und Rohstoffe benötigt, fallen Abfälle und Abwasser an oder können toxische Zwischenprodukte gebildet werden. Daher sind die Potentiale der Biotechnik im Sinne eines produktionsintegrierten Umweltschutzes zu analysieren und es kann ihr Einsatz nur da gefördert werden, wo nachweislich Entlastungseffekte für die Umwelt erkennbar sind.“

Die Projektausschreibung sah im Detail folgende Projektaufgaben vor:

1. *„Sammlung und Analyse von Daten aus biotechnischen Verfahren, die bereits in der Industrie eingesetzt werden oder sich zumindest im Technikumsmaßstab befinden. Dabei sollen Entlastungseffekte für die Umwelt im Vergleich zu chemisch-technischen Verfahren ermittelt und deutlich gemacht werden. Das Umweltentlastungspotenzial ist quantitativ unter Berücksichtigung spezifisch biotechnischer Fragestellungen zu erfassen. Als Datengrundlage können z.B. die OECD Studie „The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability“ (OECD 2001) oder die UBA-Veröffentlichung „Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren am Beispiel ausgewählter Grund- und Feinchemikalien“ (UBA-Texte 16/01) herangezogen werden.“*
2. *„Neben Verfahrensumstellungen können aber auch Produktsubstitutionen Entlastungseffekte bewirken. Der Ersatz eines chemischen Produktes durch ein biotechnisches Produkt von funktionaler Gleichwertigkeit (Beispiel Biopolymere) kann sich ebenfalls positiv für die Umwelt auswirken. Produktsubstitutionen sind zu ermitteln und Entlastungseffekte an Beispielen quantitativ zu bestimmen.“*
3. *„Während chemische Produktionsverfahren oft bei hohen Temperaturen und Drücken und unter Einsatz organischer Lösungsmittel gefahren werden, gilt die Biotechnik als vergleichsweise sanfte Technologie, da hier unter milden Bedingungen gearbeitet wird: Raumtemperatur, Normaldruck, wässriges Milieu. Das sollte Auswirkungen auf die Konzeption einer Produktionsanlage haben. Sowohl in Hinblick auf die notwendige Mess- und Regeltechnik, die Materialbeschaffenheit, den Materialaufwand als auch generell auf die Frage der Anlagensicherheit sollte die Biotechnik Vorteile gegenüber chemischen Produktionsverfahren aufweisen. Diese Aspekte sollen an einer Beispielanlage ermittelt und unter Bezug auf mögliche positive Umwelteffekte dargestellt werden.“*

Dieser Beitrag stellt Teilergebnisse zu den unter 1. und 2. genannten Aufgaben vor.

Vorgehensweise

Die praktische Bearbeitung des Vorhabens erforderte zunächst eine Recherche der zu Projektbeginn (November 2002) verfügbaren Informationen zu auswertbaren Verfahren und Produkten. Nach Abstimmung mit dem Umweltbundesamt wurden 2 Herstellungsverfahren ausgewählt, die einen ökobilanziellen Vergleich je einer biotechnischen und einer chemisch-technischen Herstellungsvariante für das gleiche Produkt ermöglichten. Außerdem wurden 3 Prozesse ausgewählt, mit denen auf biotechnischem und auf chemisch-technischem Weg funktionsanaloge Produkte hergestellt werden. Die aus der Nutzung der Produktvarianten resultierenden Umweltbelastungen wurden ebenfalls mit Hilfe von ökobilanziellen Vergleichen ausgewertet.

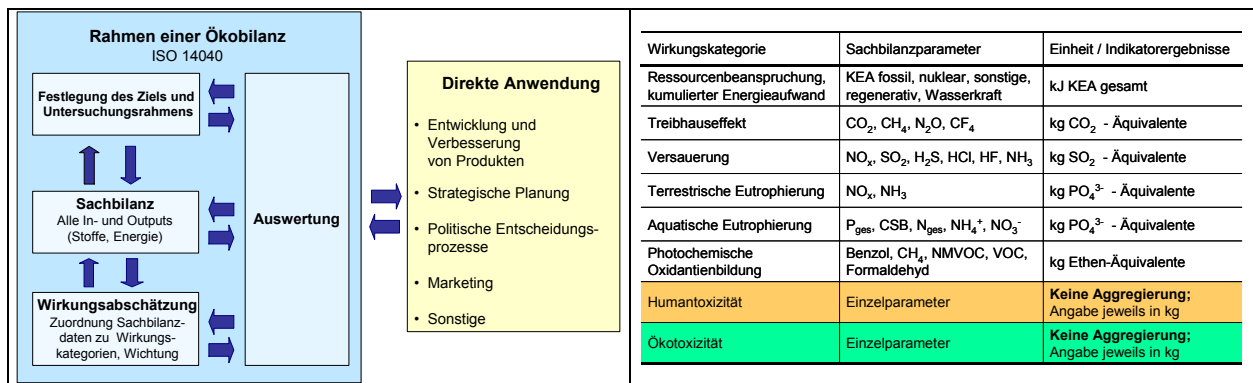


Abbildung 4: Elemente einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff. (links) und im Projekt berücksichtigte Wirkungskategorien

Die aus der Nutzung biotechnischer bzw. chemisch-technischer Herstellungsverfahren resultierenden Umweltbelastungen wurden mithilfe der Bilanzierungssoftware UMBERTO® in einem ökobilanziellen Vergleich ausgewertet. Dazu wurden – wie in Abbildung 4 schematisch dargestellt – standardisierte ökobilanzielle Auswertungen durchgeführt, wobei jedoch nur die angegebenen Wirkungskategorien betrachtet werden konnten. Vollumfängliche Ökobilanzen würden noch weiter gehende Auswertungen erfordern.

Bereits die durchgeführten Auswertungen haben umfangreiche Datenbestände ergeben, für deren zusammenfassende Darstellung eine Normierung der Ergebnisse auf Einwohnerwerte durchgeführt wurde. Je höher die Einwohnerwerte sind, desto bedeutender ist die Wirkungskategorie bzw. der Einzelwert für die Umweltbelastung. Durch den Vergleich der verschiedenen Kategorien bzw. Werte miteinander, wird die unterschiedliche Bedeutung hinsichtlich der Umweltbelastung deutlich. Die Ergebnisse aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung beziehen sich auf die jeweilige funktionelle Einheit der Szenarien. Die normierten Werte lassen keine Rückschlüsse zu, ob die Prozesse bzw. die Unterschiede für Deutschland von Bedeutung sind, da die Werte auf die jeweilige funktionelle Einheit bezogen sind und nicht

auf eine Jahresproduktion. Erst die Normierung der Jahresproduktion der einzelnen Szenarien auf Einwohnerwerte würde diese Auswertung zulassen.

Tabelle 3 zeigt ein Beispiel für die normierte Darstellung der Ergebnisse. Die Bedeutung der absoluten Werte, der berechneten Einwohnerwerte und der Differenzen der Einwohnerwerte wurde durch Anwendung folgender Formatierungen von Schrift und Hintergrundfarbe hervorgehoben:

25	Höherer Wert: Schwarze Zahl mit Fettdruck im weißen Kasten
-12	Umweltentlastung durch biotech. Verfahren: Weiße Zahl mit Fettdruck im dunklen Kasten
10	Mehrbelastung durch biotech. Verfahren: Schwarze Zahl mit Fettdruck im hellen Kasten
0,02	Unrelevante Differenz der Umweltbelastungen: Zahl ohne Fettdruck im weißen Kasten

Tabelle 3: Beispiel der normierten Darstellung der Netto-Ergebnisse (Details: s. Hoppenheidt et al., 2004)

		Bio- technisch	Chemisch- technisch	Bio- technisch	Chemisch- technisch	Differenz (Bio. - Chem.)
	Einheit			Einwohner- werte	Einwohner- werte	Einwohner- werte
Wirkungskategorien, aggregiert						
KEA	GJ	391	590	2,24	3,38	-1,14
Treibhauspotential	kg CO ₂ -Äq.	25,0	33,5	2,12	2,84	-0,72
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Äq.	115	229	2,84	5,63	-2,79
Eutrophierungspot. (terrestr.)	kg PO ₄ -Äq.	11,4	15,2	2,19	2,91	-0,73
Eutrophierungspot. (aquat.)	kg PO ₄ -Äq.	21,4	5,8	3,85	1,04	2,81
Humantoxische Einzelstoffe						
Benzo(a)pyren	g	0,0067	0,0034	0,04	0,02	0,02
Blei	g	0,28	0,16	0,04	0,02	0,02
Cadmium	g	0,095	0,034	0,71	0,26	0,45

Anwendungsbeispiel 1: Verfahrensvergleich der chemisch-technischen und der biotechnischen Vitamin B2-Produktion

DSM Nutritional Products (vormals Roche Vitamine GmbH) aus Grenzach hat im Jahr 2000 den bisher genutzten mehrstufigen chemisch-technischen Prozess für die Vitamin B2-Herstellung durch einen biotechnischen Prozess ersetzt. Die von DSM bereitgestellten und durch eigene Recherchen ergänzten Daten waren die Grundlage für den durchgeführten Verfahrensvergleich.

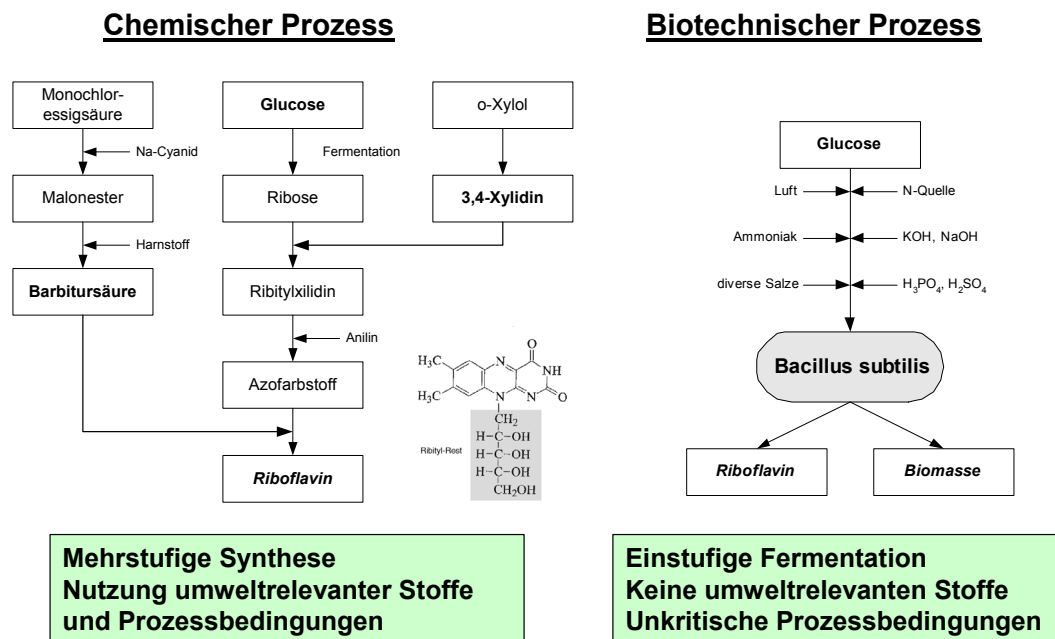


Abbildung 5: Schematischer Vergleich der chemisch-technischen und der biotechnischen Vitamin B2-Produktion

Als funktionelle Einheit (die Bezugsbasis für die Auswertungen) wurde die Produktion von 1.000 kg Vitamin B2 mit einer Reinheit von 96 % sowie der nachfolgenden Weiterverarbeitung von 19 Gew.-% zu 167 kg Vitamin B2 mit einer Reinheit von 98 % genutzt.

Für die chemisch-technische Vitamin B2-Produktion wurde ein mehrstufiger Syntheseprozess genutzt, für den neben nachwachsenden Rohstoffen auch verschiedene umweltrelevante Chemikalien eingesetzt wurden. Der biotechnische Herstellungsprozess erfordert dagegen nur einen einstufigen Fermentationsprozess, für den neben nachwachsenden Rohstoffen nur geringe Mengen chemischer Hilfsmittel mit geringer Umweltrelevanz benötigt werden. Die in vergleichsweise großen Mengen anfallenden Abfallbiomassen können biologisch verwertet werden, sodass diese keinen negativen Einfluss auf die Gesamtbilanz des Prozesses haben.

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der vergleichenden Wirkungsabschätzung zusammengefasst. Beim biotechnischen Prozess wurden im Vergleich zum chemisch-technischen Prozess für die aggregierten Wirkungskategorien kumulierter Energieaufwand (KEA-Ressourcenbeanspruchung), Treibhaus-, Versauerungs-, terrestrisches Eutrophierungs- und Ozonbildungspotential deutliche Umweltentlastungen ermittelt. Das aquatische Eutrophierungspotential war beim biotechnischen Prozess allerdings um 2,8 Einwohnerwerte höher als beim chemisch-technischen Prozess.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzungen für den Verfahrensvergleich der Vitamin B2-Produktion bezogen auf die funktionelle Einheit

		Biotechnischer Prozess	Chemisch-technischer Prozess	Biotechnischer Prozess	Chemisch-technischer Prozess	Differenz (Bio. - Chem.)
	Einheit			Einwohnerwerte	Einwohnerwerte	Einwohnerwerte
Wirkungskategorien, aggregiert						
KEA	GJ	391	590	2,24	3,38	-1,14
Treibhauspotential	Mg CO ₂ -Äq.	25,0	33,5	2,12	2,84	-0,72
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Äq.	115	229	2,84	5,63	-2,79
Eutrophierungspotential (terrestr.)	kg PO ₄ -Äq.	11,4	15,2	2,19	2,91	-0,73
Eutrophierungspotential (aquat.)	kg PO ₄ -Äq.	21,4	5,8	3,85	1,04	2,81
Ozonbildungspotential (POCP)	kg Eth-Äq.	8,6	20,3	0,99	2,35	-1,36
Humantoxische Einzelstoffe						
Benzo(a)pyren (L)	g	0,0067	0,0034	0,04	0,02	0,02
Blei (L)	g	0,28	0,16	0,04	0,02	0,02
Cadmium (L)	g	0,095	0,034	0,71	0,26	0,45
Schwefeldioxid (L)	kg	53,2	145,56	5,51	15,1	-9,55
Staub (L)	kg	11,7	37,7	3,73	12,0	-8,25
Ökotoxische Einzelstoffe						
Ammoniak (L)	kg	8,42	1,15	1,11	0,15	0,96
Fluorwasserstoff (L)	kg	0,05	0,05	0,03	0,03	0,00
Schwefeldioxid (L)	kg	53,2	146	5,51	15,1	-9,55
Schwefelwasserstoff (L)	g	0,061	0,36	--	--	--
Stickoxide (L)	kg	65,3	114	3,36	5,85	-2,49
Ammonium (W)	kg	8,16	1,48	2,92	0,53	2,39
AOX (W)	g	0,0024	7,75	0,000045	0,15	-0,15
Chlorid (W)	kg	100	239	--	--	--
Kohlenwasserstoffe (W)	kg	0,001	2,04	0,01	39,3	-39,25

L: Stoffeintrag in die Luft; W: Stoffeintrag in Wasser

Bei den als humantoxisch eingestuft und ausgewerteten 5 Einzelstoffen ergab der Verfahrensvergleich für die Parameter Benzo(a)pyren und Blei nur geringfügige Unterschiede bei einem geringen Belastungsniveau. Die relativ geringen Cadmiumemissionen waren beim biotechnischen Prozess um 0,45 Einwohnerwerte höher als beim chemisch-technischen Prozess. Bei den in relevanten Mengen emittierten Schwefeldioxid und Staub ergab der Verfahrensvergleich für die Anwendung des biotechnischen Verfahrens eine ausgeprägte Umweltentlastung.

Bei den als ökotoxisch eingestuft und ausgewerteten 9 Einzelstoffen dokumentieren die Daten des biotechnischen Verfahrens bei 6 Parametern (Schwefeldioxid (L); Schwefelwasserstoff (L); Stickoxide (L); AOX (W); Chlorid (W); Kohlenwasserstoffe (W)) z.T. deutliche

Umweltentlastungen im Vergleich zum chemisch-technischen Verfahren. Bei 2 Parametern (Ammoniak (L); Ammonium (W)) ergaben sich für den biotechnischen Prozess höhere Emissionswerte und bei einem Parameter (Fluorwasserstoff (L)) lagen die Emissionen bei beiden Verfahren auf einem niedrigen Niveau.

Anwendungsbeispiel 2: Verfahrensvergleich des enzymatischen und des chemisch-technischen Weichens/Äscherns bei der Lederherstellung

Die Lederherstellung besteht aus einer Kette von Einzelschritten, die sich nach dem eingesetzten Verfahren, nach der Art der Rohware und dem herzustellenden Produkt voneinander unterscheiden können. Für den Verfahrensvergleich wurde der Teilschritt des Weichens und Äscherns betrachtet. Die Weiche hat die Aufgabe, die Rohhaut von anhaftenden Verunreinigungen zu befreien, Konservierungsmittel zu entfernen und den Quellungszustand wie am Körper des lebenden Tieres wieder herzustellen. Unter Äschern wird der Prozessschritt verstanden, bei dem die Häute enthaart werden und die Faserstruktur der Haut aufgeschlossen wird. Die Auswertungen umfassten den Vergleich eines „haarzerstörenden chemischen Prozesses“ und eines „haarerhaltenden enzymatischen Prozesses“. Beim haarzerstörenden Prozess werden die Haare durch den Chemikalieneinsatz weitgehend hydrolytisch zersetzt und ins Abwasser eingetragen. Beim haarerhaltenden Prozess werden die Haare lediglich gelockert und dann mechanisch durch Abwalken oder eine maschinelle Enthaarung entfernt. Sie können dann abgetrennt und einer Verwertung zugeführt werden.

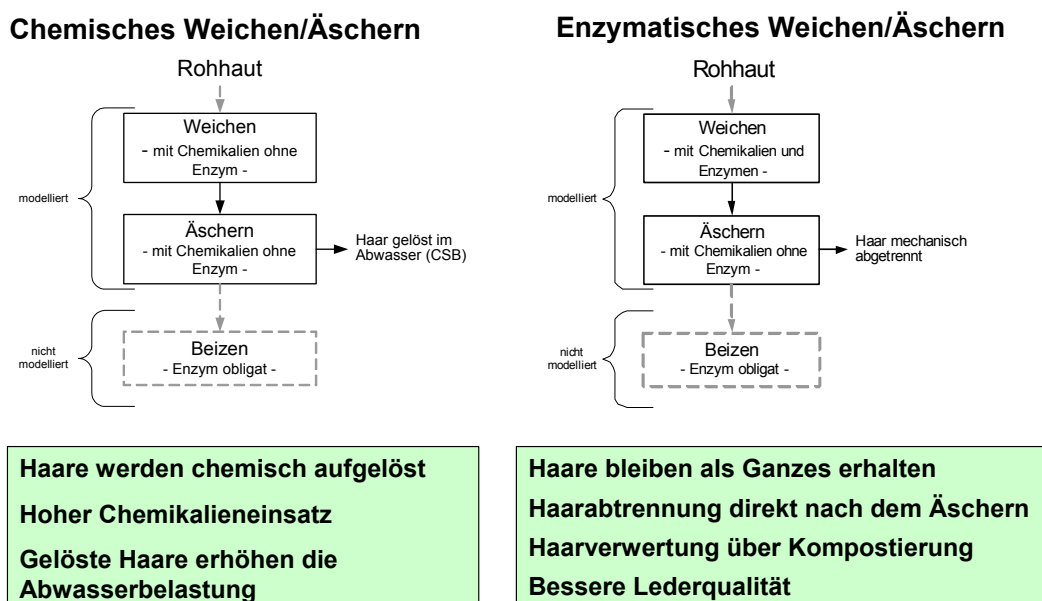


Abbildung 6: Schematischer Vergleich der chemisch-technischen und der biotechnischen Verfahrensalternative des Weichens/Äscherns bei der Lederherstellung

Als funktionelle Einheit wurde **1.000 kg Leder** als Produkt des gesamten Gerbprozesses gewählt. Dies ist gleichbedeutend mit dem Einsatz von 4.167 kg gesalzener Rohhaut (Salzgewicht), da nach Feikes (1990) aus 1 Mg gesalzener Rohhaut 240 kg Leder hergestellt werden können, was einer Ausbeute von 24 % entspricht.

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für den Vergleich enzymatischer und chemischer Prozessführung beim Weichen und Äschern sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Zum Vergleich wurden zudem die Einwohnerwerte für die hier betrachtete funktionelle Einheit berechnet. Hierbei ist zu beachten, dass alle Daten der Einwohnerwerte (EWW) mit Faktor 1.000 multipliziert wurden, um die Lesbarkeit der Zahlen zu erleichtern.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse des Verfahrensvergleichs des Weichens/Äscherns bei der Lederherstellung bezogen auf die funktionelle Einheit

		Enzymatisches Weichen u. Äschern	Chemisches Weichen u. Äschern	Enzymatisches Weichen u. Äschern	Chemisches Weichen u. Äschern	Differenz (Enz. - Chem.)
	Einheit			10 ⁻³ EWW	10 ⁻³ EWW	10 ⁻³ EWW
Wirkungskategorien, aggregiert						
KEA	GJ	8,89	10,49	50,9	60,1	-9,15
Treibhauspotential	kg CO ₂ -Äq.	703	874	59,6	74,1	-14,51
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Äq.	2,32	3,00	57,0	73,8	-16,77
Eutrophierungspotential (terrestr.)	kg PO ₄ -Äq.	0,20	0,24	39,0	46,6	-7,62
Eutrophierungspotential (aquat.)	kg PO ₄ -Äq.	0,37	0,45	67,2	80,1	-12,89
Ozonbildungspotential (POCP)	kg Eth-Äq.	0,35	0,35	40,5	40,8	-0,31
Humantoxische Einzelstoffe						
Benzo(a)pyren (L)	mg	0,33	0,34	1,97	2,05	-0,09
Blei (L)	kg	0,0000089	0,0000084	1,16	1,09	0,07
Cadmium (L)	kg	0,0000039	0,0000048	29,5	35,9	-6,42
Schwefeldioxid (L)	kg	1,21	1,68	125	173	-48,36
Staub (L)	kg	0,55	0,70	176	222	-46,28
Ökotoxische Einzelstoffe						
Ammoniak (L)	kg	0,008	0,016	1,06	2,08	-1,02
Fluorwasserstoff (L)	kg	0,0010	0,0011	0,65	0,73	-0,08
Schwefeldioxid (L)	kg	1,21	1,68	125	173	-48,36
Schwefelwasserstoff (L)	kg	0,000083	0,000067	--	--	--
Stickoxide (L)	kg	1,54	1,83	79,2	93,9	-14,65
Ammonium (W)	kg	0,064	0,073	22,9	26,2	-3,29
AOX (W)	kg	0,0048	0,0060	90,7	114	-22,98
Chlorid (W)	kg	6,08	9,69	--	--	--
Kohlenwasserstoffe (W)	kg	0,008	0,016	1,06	2,08	-1,02

L: Stoffeintrag in die Luft; W: Stoffeintrag in Wasser

Die Tabelle zeigt, dass das enzymatische Weichen/Äschern gegenüber dem chemischen Weichen/Äschern Umweltentlastungspotentiale für alle aggregierten Wirkungskategorien aufwies. Beim Ozonbildungspotential waren die Unterschiede der Verfahrensvarianten jedoch vernachlässigbar.

Bei den als humantoxisch eingestuft und ausgewerteten 5 Einzelstoffen waren die Emissionen bei den Parametern Cadmium (L), Schwefeldioxid (L) und Staub (L) beim enzymati-

schen Weichen/Äschern deutlich niedriger als beim chemischen Weichen/Äschern. Für die anderen beiden Parameter wurden keine relevanten Unterschiede ermittelt.

Bei den als ökotoxisch eingestuft und ausgewerteten 9 Einzelstoffen dokumentieren die Ergebnisse bei 7 Stoffen deutliche Minderemissionen bei der Anwendung des enzymatischen Weichens/Äscherns. Bei zwei Einzelstoffen waren die Unterschiede der Emissionen der beiden Verfahren sehr gering.

Derzeit sollen weltweit etwa 15 Prozent der praktizierten Verfahren zum Weichen und Äschern bereits den Einsatz von Biokatalysatoren nutzen (IPTS, 2002).

Anwendungsbeispiel 3: Produktvergleich für biotechnische und chemische Leistungsförderer bei der Tiermast

Während bei den Anwendungsbeispielen 1 und 2 jeweils zwei Herstellungsverfahren für dasselbe Produkt ausgewertet wurden, sind beim nachfolgend beschriebenen Anwendungsbeispiel mehrere funktionsanaloge Produkte in einem Produktvergleich ausgewertet worden.

Trotz fortschreitendem Strukturwandel in der Landwirtschaft und rückläufigen Bestandszahlen in der Nutztierhaltung, ist die tierische Veredlungswirtschaft nach wie vor von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Der Nutztierbestand lag nach den statistischen Angaben aus dem Jahr 2003 bei rd. 13,6 Mio. Rindern, 26,5 Mio. Schweinen, 2,6 Mio. Schafen und 122 Mio. Geflügeltieren. Die Erzeugung tierischer Produkte in Deutschland erreicht dabei einen Wert von 18,9 Mrd. Euro (Statistisches Bundesamt, 2004).

Für die Nutztierhaltung in Deutschland werden jährlich etwa 68 Mio. Mg Getreideeinheiten benötigt, von denen im Jahr 2001 19 Mio. Mg als Mischfutter im Gesamtwert von 4,25 Mrd. Euro zugekauft wurden (DVT, 2003). Etwa 40 bis 60 Prozent der Produktionskosten in der Tierhaltung entfallen auf die Tierernährung (Menke u. Huss, 1980). Vor diesem Hintergrund wird die wirtschaftliche Bedeutung von Leistungsförderern deutlich. Die Produktivität der Erzeugung tierischer Lebensmittel wird bei deren Einsatz gesteigert (Losand, 2000). Leistungsförderer sollen den Futtermittelverbrauch verringern, die täglichen Zunahmen verbessern, die Tierverluste senken und die Kosten mindern, die zur Gesunderhaltung der Tiere notwendig sind. Ein weiterer Effekt ist die unter den heutigen gesellschaftlichen Bedingungen bedeutsame deutlich geringere Belastung der Umwelt mit Schadstoffen (vor allem N und P) je Produkteinheit infolge der besseren Nährstoffausnutzung (Losand, 2000).

Basis der Bewertung der Umweltbelastungen war die frühe Mastphase von Schweinen (9. - 20. Lebenswoche, im Gewichtsbereich von 18 – 76 kg). Als funktionelle Einheit wurde die Lebendmassezunahme der Tiere (58 kg) sowie die weiteren Mastleistungsparameter Futtermittelverbrauch bzw. Futtermittelverwertung herangezogen.

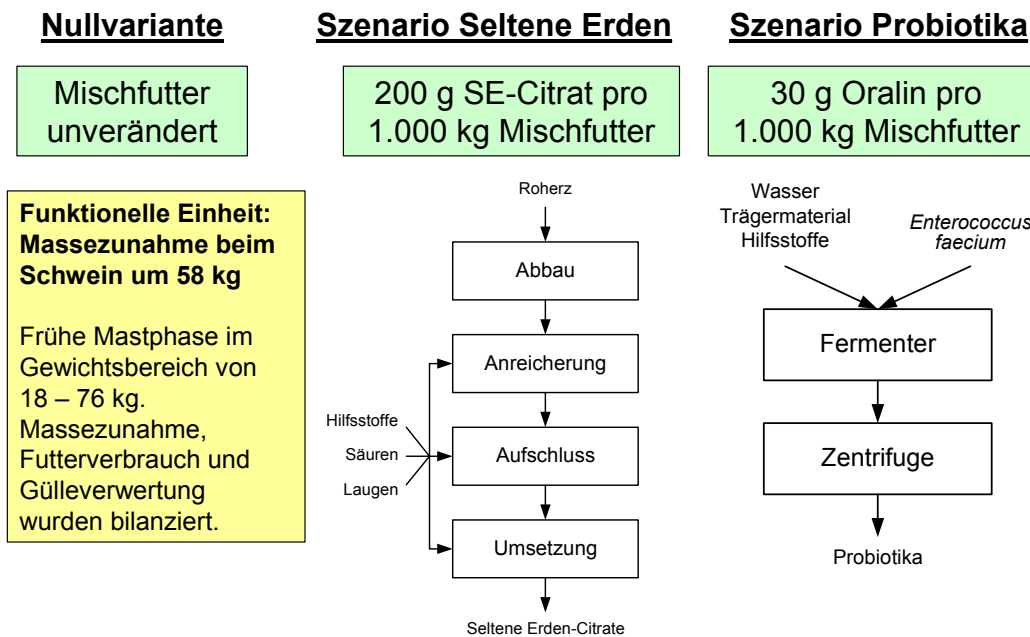


Abbildung 7: Schematischer Vergleich des chemisch-technisch und biotechnisch gewonnenen Leistungsförderers für die Tiermast

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für den Vergleich der Tierproduktion unter Einsatz eines Futtermittels ohne Zugabe von Leistungsförderer (Nullvariante), eines Futtermittels mit Zugabe eines biotechnisch (fermentativ) hergestellten Probiotikums (Szenario Probiotika) sowie eines Futtermittels mit Zugabe eines chemisch-technisch hergestellten Seltene Erden-Produktes (Szenario Seltene Erden) sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Zum Vergleich wurden zudem die Einwohnerwerte für die hier betrachtete funktionelle Einheit berechnet. Hierbei ist zu beachten, dass alle Daten der Einwohnerwerte (EWW) mit Faktor 100.000 multipliziert wurden, um die Lesbarkeit der Zahlen zu erleichtern.

Die Ergebnisse der drei Szenarien liegen für alle betrachteten Wirkungskategorien und Einzelparameter sehr eng beieinander. Das Szenario Probiotika wies gegenüber dem Szenario ohne Zusatz (Nullvariante) Umweltentlastungspotentiale für alle betrachteten Wirkungskategorien und Einzelparameter auf. Das Szenario Seltene Erden wies gegenüber dem Szenario ohne Zusatz (Nullvariante) Umweltentlastungspotentiale für alle betrachteten Wirkungskategorien und Einzelparameter, ausgenommen Benzo(a)pyren (L), Schwefeldioxid (L) und Kohlenwasserstoffe (W) auf. Für diese Parameter führte das Szenario Seltene Erden zu einer höheren Belastung der Umwelt als das Szenario ohne Zusatz.

Das Szenario Probiotika wies gegenüber dem Szenario Seltene Erden relevante Umweltentlastungspotentiale auf für den kumulierten Energieaufwand sowie die Einzelparameter Schwefeldioxid (L) und Staub (L) auf. Für die Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Versauerung, terrestrische und aquatische Eutrophierung und Ozonbildung sowie die Einzelparameter

ter Ammoniak (L) führte das Szenario Seltene Erden zu einer relevanten Umweltentlastung im Vergleich zum Szenario Probiotika.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse des Verfahrensvergleichs des Weichens/Äscherns bei der Lederherstellung bezogen auf die funktionelle Einheit

		Ohne Zusatz	Probiotika	Seltene Erden	Ohne Zusatz	Probiotika	Seltene Erden	Differenz (Probiotika – ohne Zusatz)	Differenz (Seltene Erden – ohne Zusatz)
	Einheit				10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW	10 ⁻⁵ EWW
Wirkungskategorien, aggregiert									
KEA	GJ	0,16	0,16	0,16	94,2	89,3	91,8	-4,95	-2,37
Treibhauspotential	kg CO ₂ -Äq.	83,7	79,9	79,0	709	677	669	-31,9	-39,6
Versauerungspot.	kg SO ₂ -Äq.	0,80	0,77	0,75	1976	1897	1848	-78,2	-128
Eutroph.-pot. (terrestr.)	kg PO ₄ -Äq.	0,15	0,14	0,14	2801	2691	2615	-110	-187
Eutroph.-pot. (aquat.)	kg PO ₄ -Äq.	0,0021	0,0021	0,0020	38,2	36,9	35,6	-1,36	-2,69
Ozonbild.- pot. (POCP)	kg Eth-Äq.	0,016	0,015	0,015	182	175	172	-7,11	-9,76
Humantoxische Einzelstoffe									
Benzo(a)pyren (L)	mg	-0,0045	-0,0044	-0,0041	-2,71	-2,65	-2,44	0,06	0,27
Blei (L)	mg	0,28	0,27	0,28	3,67	3,49	3,58	-0,17	-0,09
Cadmium (L)	mg	0,120	0,115	0,114	90,0	86,0	85,2	-3,92	-4,72
Schwefeldioxid (L)	g	11	10	12	113	105	123	-7,74	9,52
Staub (L)	g	9,4	8,9	9,1	299	284	291	-14,5	-8,12
Ökotoxische Einzelstoffe									
Ammoniak (L)	kg	0,39	0,37	0,36	5086	4891	4738	-196	-348
Fluorwasserstoff (L)	g	0,054	0,052	0,052	3,58	3,42	3,44	-0,16	-0,14
Schwefeldioxid (L)	kg	0,011	0,010	0,012	113	105	123	-7,74	9,52
Schwefelw.- stoff (L)	g	0,108	0,103	0,103	--	--	--	--	--
Stickoxide (L)	kg	0,096	0,092	0,092	494	471	471	-23,4	-23,0
Ammonium (W)	g	0,27	0,26	0,25	9,56	9,27	8,99	-0,30	-0,58
AOX (W)	mg	0,22	0,22	0,21	0,42	0,41	0,39	-0,01	-0,03
Chlorid (W)	kg	-0,13	-0,12	-0,12	--	--	--	--	--
Kohlenw.-stoffe (W)	mg	0,76	0,73	0,77	1,45	1,40	1,49	-0,05	0,03

L: Stoffeintrag in die Luft; W: Stoffeintrag in Wasser

Bei der Beurteilung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Absolutwerte von der Wahl der funktionellen Einheit abhängen: Hier wurden nur die Umwelteinflüsse ausgewertet, die aus der Zunahme der Tiermasse um 58 kg resultieren. Insgesamt erreicht der Bestand allein in Deutschland 26,5 Mio. Schweine, sodass der Einsatz von Leistungsförderern insgesamt ein hohes Umweltentlastungspotential haben kann.

Fazit

Die durchgeführte Studie, von der in diesem Beitrag Beispiele dargestellt wurden, sollte mithilfe vergleichender ökobilanzieller Auswertungen aufzeigen, ob – und wenn ja – in welchem Ausmaß Umweltentlastungen erzielt werden können, wenn ein chemisch-technisches Verfahren oder Produkt durch eine biotechnische Alternative substituiert wird.

Hierbei ist zu beachten, dass die Spannweite der Anwendungen chemisch-technischer und biotechnischer Verfahren und Produkte außerordentlich groß ist, sodass die durchgeführten Auswertungen nur exemplarischen Charakter haben können. Es wurde aber versucht, Bei-

spiele für den Vergleich auszuwählen, die unterschiedlichste Anwendungsfelder abdecken (Herstellung von Vitamin, Leder, Futterzusatzstoffen sowie in der Langfassung: Verpackungsmaterial, gereinigte Wäsche).

Da zudem Verfahrens- und Produktvergleiche durchgeführt werden sollten, mussten Anwendungen recherchiert werden, für die es chemisch-technische und biotechnische Lösungsansätze gab. Somit blieben bei den Auswertungen jene „Domänen“ unberücksichtigt, in denen ausschließlich eine der Herstellungsvarianten vorhanden ist. Beispielsweise ist die Anwendung biotechnischer Herstellungsverfahren im Nahrungsmittelsektor unumstritten; chemisch-technische Herstellungsverfahren stehen hier - aus unterschiedlichen Gründen - nicht zur Verfügung. Biotechnische Varianten fehlen dagegen in den Chemiesparten der Petrochemie und der Herstellung anorganischer Grundchemikalien.

Bei den durchgeführten vergleichenden Auswertungen ist weiter zu beachten, dass der jeweilige Istzustand von real existierenden Verfahren und Produkten betrachtet worden ist. Die derzeit betriebenen Verfahren wurden bisher jedoch nicht hinsichtlich der Minimierung der Umweltbelastungen optimiert, sodass der aktuelle Entwicklungsstand bislang nicht ausgeschöpfte Umweltentlastungspotentiale nicht berücksichtigt. Insofern sind weitergehende Aussagen hinsichtlich etwaiger grundsätzlicher Vorteile einer Herstellungsvariante auf der bestehenden Datenbasis nicht möglich. Technische Fortschritte können in relativ kurzer Zeit Nachteile einer Verfahrensvariante eliminieren.

Durch die stürmische Entwicklung der Molekularbiologie und der Gentechnik konnte die Effizienz biotechnischer Produktionsprozesse in den letzten Jahren deutlich verbessert werden. Wichtige Optimierungsmaßnahmen sind (Aristidou u. Pentilla, 2000; Chartrain et al., 2000; Chotani et al., 2000; Powell et al., 2001; Cortassa et al., 2002; Chiang, 2004):

- Optimierung der Stoffwechselwege (z.B. durch „metabolic engineering“ oder „pathway engineering“)
- Optimierung der katalytischen Aktivitäten (z.B. durch „directed evolution, gene shuffling, molecular breeding, protein engineering“)
- Optimierung des Bioreaktorbetriebs (z.B. durch „high density cultivation“)
- Optimierung der Produktgewinnung

Weitere Optimierungsarbeiten haben zum Ziel, die Produktbildung unmittelbar in Pflanzen durchzuführen („molecular farming“), sodass der ressourcenintensive Fermentationsschritt ausgelassen werden kann (Fischer et al., 1999a-e; Fischer u. Schillberg, 2004). Außerdem gibt es Bemühungen, „künstliche Produktionsstämme“ zu schaffen, deren metabolisches Inventar auf die unmittelbare Produktionsaufgabe beschränkt ist (Chotani et al., 2000).

Die verfügbaren Optimierungswerkzeuge („toolbox“) haben dazu beigetragen, dass die zukünftige Entwicklung der biotechnischen Produktion heute deutlich positiver eingeschätzt

wird (Danner u. Braun, 1999; Wilke, 1999; Chotani et al., 2000; Bachmann et al. 2002; Festel et al., 2004; Young, 2003, 2004) als noch vor einem Jahrzehnt (Hinmann, 1991).

Biotechnische Produktionsverfahren werden derzeit zudem durch umweltpolitische Zielvorgaben gefördert. So laufen in Deutschland, Europa und den USA zahlreiche Forschungsprojekte, die eine kostengünstige Massenproduktion von Bioethanol zum Ziel haben, da dieser aus Klimaschutzgründen Teile des fossilen Treibstoffs ersetzen soll (US-DOE, 2001, 2003; Gong et al., 2003; Schmitz, 2003; Vorlop u. Wilke, 2003; EU, 2004). Die SÜDZUCKER AG (2004) hat den Bau einer großtechnischen Bioethanolproduktionsanlage in Deutschland aufgenommen. Die kanadische Firma Iogen betreibt seit Frühjahr 2004 eine Pilotanlage, in der aus Cellulose-haltigen Biomassen Bioethanol hergestellt wird. Erste Fahrzeuge von VW und DaimlerChrysler wurden bereits in Deutschland mit diesem Ethanol betrieben (Iogen, 2004).

Die in dieser Studie angewandten ökobilanziellen Betrachtungen gestatten eine rasche Beurteilung, ob die Ausgangsstoffe (Vorketten), der Herstellungsprozess bzw. die Entsorgung das Gesamtergebnis der Umwelteinwirkungen maßgeblich beeinflussen. Wenn die Ergebnisse für betriebsinterne Auswertungen genutzt werden, wäre eine noch detailliertere Darstellung hilfreich, wie sie z.B. Renner u. Klöpffer (2003) für das Beispiel der Indigoherstellung gewählt haben. Aus Vertraulichkeitsgründen mussten für diese öffentlich zugänglichen Auswertungen jedoch summarische Darstellungen gewählt werden, aus denen keine vertraulichen Betriebsdaten entnommen werden können.

Die Ergebnisse der Auswertungen haben bei den betrachteten Beispielen für die Mehrzahl der Parameter beim untersuchten biotechnischen Verfahren oder Produkt reduzierte Umweltbelastungen ergeben. Auch die OECD (2001) konnte in 21 Fallstudien aufzeigen, dass durch die Anwendung moderner biotechnischer Verfahren eine Reduktion der Umweltbelastungen und der Betriebskosten erzielt werden kann (s. Tabelle 2). Die derzeit realisierten biotechnischen Verfahren und Produkte sind jedoch unter Umweltgesichtspunkten nicht immer vorteilhaft: Analysen der BASF AG haben ergeben, dass die aktuellen chemisch-technischen Varianten der Herstellung von Astaxanthin und von Indigo die bessere Ökoeffizienz aufweisen (Baker u. Saling, 2003; BASF, 2004a, b). Auswertungen von Gerngross (1999) ergaben für die biotechnische Biopolymerproduktion höhere Umweltauswirkungen als die Polymerproduktion auf Erdölbasis. Ökobilanzielle Auswertungen können dazu beitragen, Schwachstellen von bestehenden Produktionsprozessen zu erkennen und sind eine Ausgangsbasis für zielgerichtete Optimierungsstrategien.

Literatur

- Aristidou, A.; Penttilä, M. (2000): Metabolic engineering applications to renewable resource utilization. *Current Opinion in Biotechnology*, 2000, 11, p. 187-198
- BACAS - Royal Belgian Academy Council of Applied Sciences (2004): Industrial Biotechnology and Sustainable Chemistry
- Bachmann, R.; Bastianelli, E.; Riese, J.; Schlenzka, W. (2000): Using plants as plants. *The McKinsey Quarterly*, 2, p. 92-99
- Baker, R.; Saling, P. (2003): Comparing natural with chemical additive production. *Feed Mix*, 11, p. 12-14
- BASF AG (2004a): Label Eco-Efficiency Analysis Astaxanthin
- BASF AG (2004b): Die Ökoeffizienz-Analyse – Ein Werkzeug für die Zukunft. Powerpoint-Präsentation; Quelle: www.oekoeffizienzanalyse.de
- BIO – Biotechnology Industry Organization (2004): Internetpräsentation unter www.bio.org
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2004a): Fakten zur nachhaltigen Abfallwirtschaft. Stand: 01. März 2004. Internetpräsentation
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2004b): Entwicklung der Erneuerbaren Energien im Jahr 2003 in Deutschland. Erste vorläufige Abschätzung (Stand Februar 2004)
- Bundesregierung Deutschland (2002): Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Download von <http://www.nachhaltigkeitsrat.de>
- Chartrain, M.; Salmon, P. M.; Robinson, D. K.; Buckland, B. C. (2000): Metabolic engineering and directed evolution for the production of pharmaceuticals. *Current Opinion in Biotechnology*, 11, p. 209-214
- Chiang, S.-J. (2004): Strain improvement for fermentation and biocatalysis processes by genetic engineering technology. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 31, p. 99-108
- Chotani, G.; Dodge, T.; Hsu, A.; Kumar, M.; LaDuca, R.; Trimbur, D.; Weyler, W.; Sanford, K. (2000): The commercial production of chemicals using pathway engineering. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1543, p. 434-455
- Cortassa, S.; Aon, M. A.; Iglesias, A. A.; Lloyd, D. (2002): An Introduction to Metabolic & Cellular Engineering. World Scientific Publishing Co., Inc.
- D'Aquino, R. (2003): Green Factories for Pharmaceuticals. *CEP*, 1, p. 34S-36S
- Danner, H. u. Braun, R. (1999): Biotechnology for the production of commodity chemicals from biomass. *Chem. Soc. Rev.*, 28, p. 395-405
- Desai, P. (2002): Bio-Products and Agriculture. Präsentation, Edmonton, 6. August. Download <http://www.avactd.com/pastevents/PeteDesaisMemberMeetingEdmonton020806.pdf>
- DVT (2003): Mischfutter als Teil der Futtermittelwirtschaft. Deutscher Verband Tiernahrung e. V., Bonn; 15.11.2003, Informationsangebot im Internet unter: www.dvtiernahrung.de
- EEA - European Environment Agency (2003): Europe's environment: the third assessment. Environmental assessment report No. 10. Download von <http://www.eea.eu.int>
- EU – European Commission (2004) : Biomass for Fuel, Fibre, Fertiliser and Feed. CD-ROM
- Fachverband Biogas e. V. (2004): Anlagenstatistik. Internetpräsentation unter <http://www.biogas.org>
- Feikes, L. (1990): Ökologische Probleme der Lederindustrie. In: Herfeld (Hrsg): Bibliothek des Leders, Band 8
- Festel, G.; Knöll, J.; Götz, H.; Zinke, H. (2004): Der Einfluss der Biotechnologie auf Produktionsverfahren in der Chemieindustrie. *Chemie Ingenieur Technik*, 76, 3, S. 307-312
- Fischer, R.; Drossard, J.; Commandeur, U.; Schillberg, S.; Emans, N. (1999a): Towards molecular farming in the future: moving from diagnostic protein and antibody production in microbes to plants. *Biotechnol. Appl. Biochem.*, 30, p. 101–108

- Fischer, R.; Drossard, J.; Commandeur, U.; Schillberg, S.; Emans, N. (1999b): Towards molecular farming in the future: moving from diagnostic protein and antibody production in microbes to plants. *Biotechnol. Appl. Biochem.*, 30, p. 101-108
- Fischer, R.; Drossard, J.; Emans, N.; Commandeur, U.; Hellwig, S. (1999c): Towards molecular farming in the future: *Pichia pastoris*-based production of single-chain antibody fragments. *Biotechnol. Appl. Biochem.*, 30, p. 117-120
- Fischer, R.; Emans, N.; Schuster, F.; Hellwig, S.; Drossard, J. (1999d): Towards molecular farming in the future: using plant-cell-suspension cultures as bioreactors. *Biotechnol. Appl. Biochem.*, 30, p. 109-112
- Fischer, R.; Schillberg, S. (eds.) (2004): *Molecular Farming - Plant-made Pharmaceuticals and Technical Proteins*. Wiley-VCH, Weinheim
- Fischer, R.; Vaquero-Martin, C.; Sack, M.; Drossard, J.; Emans, N.; Commandeur, U. (1999e): Towards molecular farming in the future: transient protein expression in plants. *Biotechnol. Appl. Biochem.*, 30, p. 113-116
- Gerngross, T. U. (1999): Can biotechnology move us toward a sustainable society? *Nature Biotechnology*, 17, 6
- Gong, C. S.; Cao, N. J.; Du, J.; Tsao, G. T. (2003): Ethanol Production from Renewable Resources. *Advances in biochemical engineering, biotechnology*, 65, p. 207 – 241
- Hinman, R.L. (1991): The Chemical Industry. In: U.S. Congress – Office of Technology Assessment: *Biotechnology in a Global Economy*. Chapter 7, p. 118-125; Report Number OTA-BA-494, Washington
- Hoppenheidt, K.; Mücke, W., Peche, R.; Tronecker, D.; Roth, U.; Würdinger, E.; Hottenroth, S.; Rommel, W. (2004): Entlastungseffekte für die Umwelt durch Substitution konventioneller chemisch-technischer Prozesse und Produkte durch biotechnische Verfahren. Schlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 202 66 326, Juli, 2004
- Iogen (2004): First cellulose ethanol demonstration in European vehicles. Pressemitteilung von 01.06.2004, veröffentlicht unter <http://www.iogen.ca>
- IPTS - Institute for Prospective Technological Studies (2002): *The Assessment of Future Environmental and Economic Impacts of Process-Integrated Biocatalysts*. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS), Seville, July 2002 (Report EUR 20407 EN)
- Leuchtenberger, A. (1998): *Grundwissen zur mikrobiellen Biotechnologie*. B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig
- Losand, B. (2000): Schweineernährung ohne Leistungsförderer? Mitteilungen der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Heft 21, Februar 2000
- Menke, K.-H.; Huss, W. (1980): *Tierernährung und Futtermittelkunde*. UTB Uni-Taschenbücher 63, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Mieschendahl, M. (2004): Die weiße Biotechnik aus Sicht des Umweltbundesamtes. Vortrag, 2. Reinsburger Umweltbiotechnologie-Tag, 23.06.2004
- OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (1998): *Biotechnology for Clean Industrial Products and Processes - Towards Industrial Sustainability*
- OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development (2001): *The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability*
- Powell, K. A.; Ramer, S. W.; del Cardayré, S. B.; Stemmer, W. P. C.; Tobin, M. B.; Longchamp, P. F.; Huisman, G. W. (2001): Gerichtete Evolution und Biokatalyse. *Angewandte Chemie*, 113, S. 4068-4080
- Renner, I. u. Klöpffer, W. (2003): Untersuchung der Anpassung von Ökobilanzen an spezifische Erfordernisse biotechnischer Prozesse und Produkte. Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 201 66 306
- Schmitz, N. (Hrsg.) (2003): *Bioethanol in Deutschland*. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Bd. 21, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster
- Statistisches Bundesamt (2004): *Landwirtschaft in Zahlen 2003*. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Januar 2004
- Südzucker AG (2004): Grundsteinlegung Südzucker-Bioethanolanlage am 6. Februar 2004. Pressemitteilung

- UNEP - United Nations Environment Programme (2002): Global Environment Outlook 3 - Past, present and future perspectives. Earthscan Publications Ltd., London
- US-DOE - U.S. Department of Energy (2001): The Technology Roadmap for Plant/Crop-based Renewable Resources 2020 – Research Priorities for Fulfilling a Vision to Enhance U.S. Economic Security through Renewable Plant/Crop-based Resource use. <http://www.oit.doe.gov/agriculture/>
- US-DOE - U.S. Department of Energy (2003): Industrial Bioproducts: Today and Tomorrow. Report prepared by Energetics Incorporated, Columbia, Maryland for the DOE, Washington
- Vorlop, K.-D. u. Wilke, T. (2003): Industrielle Biokonversion nachwachsender Rohstoffe als Alternative zu klassischen chemischen Verfahren. In: Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.): Nachwachsende Rohstoffe für die Chemie – 8. Symposium 2003. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Heft 22, S. 55-79
- WCED – World Commission on Environment and Development (1987): Our Common Future. Oxford University Press
- Wilke, D. (1999): Chemicals from biotechnology: molecular plant genetics will challenge the chemical and the fermentation industry. Applied Microbiology and Biotechnology, 52, 2, p. 135-145
- Wubbolts, M. (2002): Integration of Chemical and Biotechnological Disciplines for Improvement of Industrial Processes. Conference “The Role of Biotechnology in Industrial Sustainable Development”, 16-17 May 2002, Antwerpen, Belgien
- Young, A. L. (2003): Biotechnology for Food, Energy, and Industrial Products – New Opportunities for Bio-based Products. Environ. Sci. Pollut. Res., 10, 5, p. 273-276
- Young, A. L. (2004): The Future Biotechnology in Support of Bio-based Industries – The US Perspective. Environ. Sci. Pollut. Res., 11, 2, p. 71-72