

TEXTE 16/01

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

Andreas Brellochs, Anja Schmolke, Dr. Heimfrid Wolff

Prognos AG, Basel

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.