

ANGEWANDTE CHEMIE

89. Jahrgang 1977
Heft 4
Seite 211–282

Die Nutzung des mikrobiellen Lebensraumes – moderne Entwicklungen biologischer Technologien^[**]

Von Paul Präve^[*]

Die Mikrobiologie wurde früher fast nur auf dem Lebensmittelgebiet und bei der Herstellung von Antibiotika genutzt. Unter den neuen Biotechnologien ist vor allem die Biomasseproduktion als Schlüsselentwicklung anzusehen. Biomasse besteht aus fett- oder proteinreichen Mikroorganismen, die als Viehfutter dienen können. Diese Mikroorganismen wachsen nicht nur auf Celluloseabfällen und anderen biologischen Ausgangssubstraten, sondern z. B. auch auf Erdöl und Methanol. Der Energieaufwand ist vergleichsweise gering. Die zunehmende Erkenntnis der Problematik von Ein-Weg-Technologien für unsere Zivilisation lässt die heutige Biotechnologie als vielversprechende Entwicklung erscheinen. Die Biotechnologie nutzt die cyclischen Stoffwechselwege der Mikroorganismen und kann in vielen Fällen Abfallstoffe in den natürlichen Kreislauf zurückführen.

1. Einleitung

Die Mikrobiologie ist eine relativ junge Wissenschaft; ihre Objekte sind Kleinlebewesen, deren Größe im Mikrometer-Bereich liegt. Obwohl der Mensch die Mikroorganismen seit Jahrtausenden nutzt, wurde ihm erst vor etwa 100 Jahren bewußt, daß sie als Krankheitserreger oder „Schadpflanzen“ in sein Leben eingreifen können. Namen wie *Koch*, *Pasteur*, *Ehrlich* und *Behring* stehen für den außerordentlichen Zuwachs an Wissen über die Wirkungen der schädlichen, oft tödlichen Kleinlebewesen.

Fast gleichzeitig wurde aber auch erkannt, daß ohne Mikroorganismen der Kreislauf der Natur nicht erhalten bliebe. Auch wurde langsam klar, daß Mikroorganismen an einer Fülle von Prozessen beteiligt sind. Der Mensch macht sie sich direkt zunutze, z. B. für die Lebensmittelherstellung.

In den letzten Jahren setzte sich der Begriff Biotechnologie für die angewandte Mikrobiologie immer mehr durch. Er drückt aus, daß biologische Prozesse mit technischen Verfahren durchgeführt werden – eine Kombination von Biologie und Technologie^[1–3]. Grundlage ist die Mikrobiologie, da in allen Verfahren Mikroorganismen verwendet werden. Die

Biotechnologie nimmt eine Schlüsselposition im vorliegenden Themenkreis ein. Es ist eine ihrer Hauptaufgaben, die Reaktionen der Mikroorganismen mit den Bedingungen in den Reaktoren in Einklang zu bringen, so daß das Verfahren durchgeführt und das gewünschte Produkt hergestellt werden kann.

2. Biotechnologie

Mikroorganismen umfassen das Gebiet der Kleinlebewesen von den Bakterien über Hefen und Pilze bis zu den Algen. Um diese Arten handhaben zu können, bedarf es vieler spezieller Labormethoden und verfahrenstechnischer Methoden sowie großindustrieller Anlagen. Zahlreiche Reaktor- oder Kesseltypen werden eingesetzt, Rührtechnik, Belüftung, Abtrennung, Trocknung, Extraktion und andere Methoden werden angewendet. In zunehmendem Maße werden auch für besondere Aufgaben spezielle Technologien entwickelt.

Die mikrobiologischen Verfahren haben eine lange Geschichte. Erst die Entwicklung in anderen wissenschaftlichen Disziplinen, z. B. das Mikroskopieren oder die Aufklärung biochemischer Stoffwechselwege, ermöglichte die Erklärung von Prozessen, die bereits seit Jahrhunderten routiniert durchgeführt wurden. Auch heute noch sind die wissenschaftlichen Grundlagen der funktionierenden empirischen Verfahren nicht in allen Fällen bekannt.

Über die Frage, welches die ersten biotechnologischen Prozesse waren, kann man philosophieren. Sicherlich spielte der

[*] Dr. P. Präve
Hoechst AG, Pharma Biochemie und Mikrobiologie
Postfach 80 03 20, D-6230 Frankfurt (M)-Höchst

[**] Nach einem Vortrag auf der 109. Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte, am 21. September 1976 in Stuttgart.

Zufall die entscheidende Rolle. Ebenso sicher ist anzunehmen, daß mikrobiologische Umwandlungsprozesse an Lebensmitteln bereits sehr früh genutzt wurden. Der Mensch wußte auch, daß er seine Nahrung z.B. durch Trocknen haltbar machen konnte. Andererseits ist es einer Überlegung wert, ob nicht das „Andauen“ bereits vor dem Feuergebrauch eine Rolle spielte. Ein Selektionsvorteil wäre dem entstanden, der hochwertiges Eiweiß bereits in besser verdaulicher Form zu sich nehmen konnte.

Die Herstellung von Met, Brot, Wein, Sauerkraut, Käse und anderen Milchprodukten sind Gruppen von mikrobiologischen Prozessen, die seit alters her benutzt werden.

Im Gegensatz zu den meisten modernen Technologien, die von vorhandenen Rohstoffen ausgehen und letztlich immer Abfall produzieren, kann die Biotechnologie oft den Abfall in den natürlichen Kreislauf zurückführen. So ist eine biologische Abwasserreinigung oft die entscheidende Methode, um ein Wassersystem wieder auf sein natürliches Niveau zu bringen. Darüber hinaus werden in vielen Fermentationen (so wird das Hauptverfahren der Biotechnologie genannt) vorrangig Restprodukte aus Landwirtschaft oder Lebensmittelindustrie verwendet.

Zu den in den Mikroorganismen per se vorhandenen cyclischen Stoffwechselwegen kommen die Vorteile der industriellen Technologien. So haben derartige biotechnologische Prozesse geringen Landbedarf, sie sind oft vom Klima unabhängig, und sie können am Entstehungsort des Substrates oder am Verbrauchsort des Produktes durchgeführt werden. Sie sind somit unserer Situation angemessen und zukunftsträchtig.

3. Mikrobiologische Verfahren – Übersicht über die wichtigsten Verfahren^[4, 5]

3.1. Lebensmittelherstellung

Die klassische Nutzung der Mikroorganismen ist ihre Anwendung zur Herstellung von Lebensmitteln. Durch Prozesse dieser Art werden vorhandene Ausgangssubstrate in eine eßba-

Tabelle 1. Ausgewählte mikrobiologische Prozesse – Lebensmittelherstellung.

Produkte	Mikroorganismen
Milchprodukte	
Joghurt	<i>Streptococcus thermophilus</i>
Kefir	<i>Streptococcus lactis</i>
Rocquefort	<i>Penicillium roquefortii</i>
Gouda	<i>Bacterium sp.</i>
Tilsiter	<i>Bacterium sp.</i>
Alkoholische Produkte	
Bier	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
	<i>Saccharomyces carlsbergensis</i>
Rum	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
	Hefen
Whisky	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>
Wein	<i>Saccharomyces ellipoideus</i>
Soja (auch Weizen)	
Miso, Tofu	<i>Aspergillus oryzae</i> (Kojipilz) sowie Hefen und Bakterien
Fett- oder Eiweißprodukte (Biomasse)	
Fett	Algen
Eiweiß	Hefen, Bakterien
Landwirtschaftliche Prozesse (Silage, Rotte)	
Futtersilage	Lactobakterien
Flachs	Rottebakterien

re, wohlgeschmeckende, gut verdauliche und/oder haltbare Form überführt.

In Tabelle 1 ist eine Auswahl derartiger Verfahren zusammengestellt. Um einen Eindruck von der Potenz mikrobieller Verfahren bei der Herstellung von Milchprodukten zu geben, soll die Käseriefung als Beispiel herausgegriffen werden. So umfaßt die Leistung der beteiligten Mikroorganismen die Oxidation des Milchzuckers zu Milchsäure, anderen Säuren, Alkoholen und Ketonen. Weiterhin werden die in der Milch vorhandenen Proteine durch Hydrolyse in Peptide und Aminosäuren überführt. Fette werden zu Fettsäuren hydrolysiert. Diese vielfältigen Prozesse sind vorläufig nur über das in Mikroorganismen vorhandene Enzymsystem zu bewältigen.

Ähnliche Reaktionen laufen bei der Alkoholherstellung ab. Diese Verfahren sind ohne die Hilfe der Mikroorganismen undenkbar. Sie sind ein gutes Beispiel für eine ausgereifte Produktion, die oft vorrangig von den Erfahrungen des Braumeisters oder Kellermeisters abhängt.

Spezielle asiatische Lebensmittel sind kaum in der übrigen Welt bekannt, obwohl sie in ihren Heimatländern eine große Rolle spielen. Bei ihrer Herstellung werden die Substrate von Mikroorganismen so verbessert, daß hochwertige Produkte entstehen. Die Veredelung ist ein starkes Motiv für viele mikrobiologische Verfahren.

Die direkte Gewinnung von Fett oder Eiweiß (Biomasse) mit Hilfe von Mikroorganismen ist eine Entwicklung der letzten Jahrzehnte (siehe Abschnitt 4.1).

Eine große Rolle spielt in der Landwirtschaft die Silage. In einem Säuerungsprozeß durch Lactobakterien wird frisches Grünfutter haltbar gemacht und kann das ganze Jahr versorgt werden.

Die eigentlichen Verfahrensabläufe gehen immer von zwei Komponenten aus – Mikroorganismen und Substrat – und ergeben drei Komponenten – Mikroorganismen, Restsubstrat und Produkt. Man arbeitet meist in Bottichen, Kesseln oder Fermentern. Die in diesem Abschnitt behandelten Verfahren benötigen in der Regel recht einfache Reaktoren. Dazu gehören einfache Holzfässer, Gärkölle oder Rührfermenter aus Edelstahl. Zur Abtrennung des Produktes eignen sich z.B. Zentrifugation, Destillation oder Ausfällung.

3.2. Herstellung von Primärmetaboliten

Zu den Produkten, die aus dem Stoffwechsel der Mikroorganismen gewonnen werden, gehören Vitamine und Ethanol, Aminosäuren und Lösungsmittel. Jahrzehntelang waren mikrobiologische Verfahren eine wichtige Möglichkeit, eine Reihe von Lösungsmitteln herzustellen, z.B. Aceton, Butanol oder auch Essigsäure und Glycerin. Da die Ausgangssubstrate immer Stoffe waren, die „nachwuchsen“, wie Melasse, Holz und Getreide, wurde hierbei im Grunde dem landwirtschaftlichen Prozeß nur ein industrieller Prozeß angehängt und dabei eine Endnutzung von Rest-, Neben- oder Abfallprodukten erreicht. Unter besonderen Bedingungen, z.B. bei hohen Erdölpreisen, können derartige Verfahren eine Renaissance erleben.

So ist heute in vielen Ländern die Ethanolherstellung zu ökonomischen Preisen möglich, weil diese Länder das Ausgangssubstrat billig produzieren. Neben einigen Spezialitäten ist dies einer der wenigen wichtigen Prozesse zur Lösungsmittelherstellung, der heute mikrobiologisch betrieben wird.

Tabelle 2. Ausgewählte mikrobiologische Prozesse – Primärmetaboliten.

Produkte	Mikroorganismen	Anwendung
2,3-Butandiol	<i>Bacillus polymyxa</i>	Lösungsmittel
Ethanol	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Getränke, Lösungsmittel
Citronensäure	<i>Aspergillus spec.</i>	Lebensmittel, Getränke
Lysin	<i>Micrococcus glutamicus</i>	Lebensmittelzusatz, Futterzusatz
Vitamin B ₁₂	<i>Propionibacterium freudenreichii</i>	Lebensmittelzusatz, Futterzusatz

In Tabelle 2 sind weitere Produkte aufgeführt, unter denen die Citronensäure eine Ausnahmestellung einnimmt. Sie wird für viele Zwecke verwendet, z. B. als Zusatz zu Limonaden, Säften, Bonbons, Gelees, Speiseeis, Backhilfsmitteln, als Komplexbildner in der Fettindustrie, als pH-Regulator, als Polier- und Beizmittel sowie als Kalkentferner.

Die Citronensäureproduktion aus Melasse oder Paraffin^[6] kann nicht nur mit der landwirtschaftlichen Produktion konkurrieren, sondern ist darüber hinaus mit ihrer Land- und Klimaunabhängigkeit auch ein gutes Beispiel für die Vorteile derartiger Biotechnologien.

Eine Entwicklung der letzten zwanzig Jahre ist die Möglichkeit, natürliche Aminosäuren herzustellen. Insbesondere dank japanischer Arbeiten lassen sich heute praktisch alle gewünschten Aminosäuren mit Mikroorganismen synthetisieren. Dies gelang vor allem mit Hilfe von Mutanten. Oft werden in Zweistufenverfahren mit zwei Mikroorganismen die gewünschten L-Aminosäuren produziert.

Aus der Fülle weiterer Möglichkeiten soll nur noch die Vitaminherstellung herausgegriffen werden. Vitamine sind bereits recht komplizierte Substanzen, die aber mit biotechnologischen Verfahren leicht produziert werden können. Ein wichtiges zukünftiges Anwendungsbereich ist sicher die Biosynthese komplizierter, großer Moleküle, die chemisch nur sehr schwer herzustellen wären.

Die meisten Verfahren dieses Abschnittes bedürfen einer entwickelten Biotechnologie, wobei der Rührfermenter als Reaktor überwiegt. Die Aufarbeitung muß auch bei den Prozessen zur Lösungsmittelherstellung recht aufwendig sein, da das gewünschte Produkt aus der dicken und chemisch komplexen Nährlösung für die Mikroorganismen herausgeholt werden muß.

Bei modernen Verfahren kommt eine genaue Regelung des Prozesses hinzu, um z. B. den pH-Wert während des Prozesses konstant zu halten.

3.3. Herstellung von Sekundärmetaboliten

Sekundärmetaboliten sind Substanzen, die von Mikroorganismen unter besonderen Bedingungen gebildet werden. Diese Metaboliten sind meist nicht essentiell für den normalen Betriebs- oder Baustoffwechsel der Zellen. Es gibt Hinweise, daß die Produktion derartiger Substanzen eine Art Abfallbeseitigung der Zellen ist.

Tabelle 3. Ausgewählte mikrobiologische Prozesse – Sekundärmetaboliten.

Produkte	Mikroorganismen	Anwendung
Amylase	<i>Bacillus subtilis</i>	Textilschlichtung
Dextran	<i>Leuconostoc mesenteroides</i>	Plasmaexpander
Protein-Toxin	<i>Bacillus thuringiensis</i>	Insektizid
Penicillin	<i>Penicillium chrysogenum</i>	Arzneimittel

In Tabelle 3 sind einige ausgesuchte Produkte, u. a. Enzyme, zusammengefaßt. Meist werden sie großtechnisch als Waschmittelzusätze, als Schlichtungsmittel, als Verdauungshilfsmittel, zur Obstsaftklärung u. a. eingesetzt. Diese Exoenzyme sind Amylasen, Proteasen, Hemicellulasen, Pektinasen, Invertasen u. a. Sie alle benötigen keine Coenzyme. Zu ihnen gehören nicht die Enzyme des normalen Stoffwechsels, die in der Feinchemikalienbranche eine Rolle spielen, obwohl sie ebenfalls durch biotechnologische Verfahren gewonnen werden.

Weiterhin werden Biopolymere biotechnologisch hergestellt. Sie haben spezielle Anwendungsmöglichkeiten im chemischen und medizinischen Bereich (Dextran).

Die bekannteste und wichtigste Gruppe sind aber die Antibiotika. Es ist heute unvorstellbar, Infektionskrankheiten ohne Antibiotika bekämpfen zu müssen. Die Forschung auf diesem Gebiet bringt auch heute noch interessante Produkte hervor. Sie alle werden von Streptomyzeten, Pilzen oder Bakterien in begasten Rührfermentern in charakteristischen Prozessen hergestellt. Die Kesselgrößen können über 100 m³ betragen. In letzter Zeit werden auch Antibiotikagrundkörper wie die 6-Aminopenicillansäure hergestellt, aus der dann mit chemischen Methoden spezielle, auch gegen resistente Keime wirksame Antibiotika synthetisiert werden.

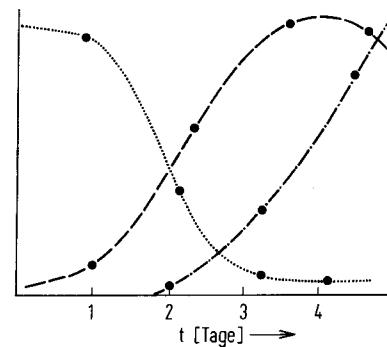


Abb. 1. Produktion eines Antibiotikums, schematisch. — Wachstum der Zellen (Trockensubstanz der Zellmasse), Konzentration der Kohlenstoffquelle im Nährmedium, - - - Konzentration des Antibiotikums.

Die Produktion von Antibiotika bietet die Möglichkeit, stellvertretend für die meisten biotechnologischen Verfahren den prinzipiellen Ablauf einer typischen chargenweisen Fermentation zu zeigen (Abb. 1). Der S-förmige Wachstumskurve

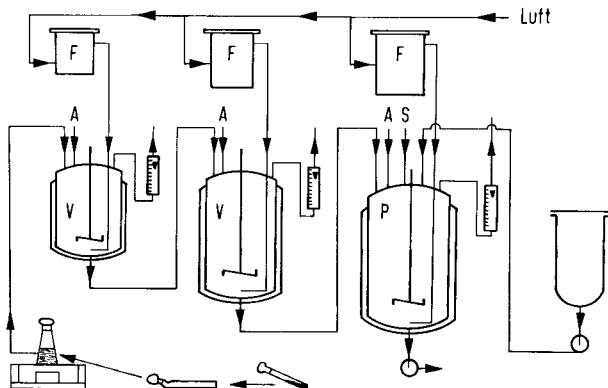


Abb. 2. „scale up“ bei der Fermentation (Schrägröhrchen – Schüttelkultur – Fermenter). A = Antischaum, F = Filter, P = Produktionsfermenter, S = Substrat, V = Vorfermenter, Vorratsgefäß (ganz rechts). Arbeitsablauf siehe Text.

der Zellen mit Verzögerungs- (lag-), logarithmischer (log-) und stationärer Phase entspricht eine inverse Kurve für die Konzentrationsabnahme der Kohlenstoffquelle im Nährmedium.

Zum Ende der log-Phase setzt die Synthese des gewünschten Antibiotikums ein.

In Abbildung 2 ist der Prozeß graphisch dargestellt. Von einem Schrägröhrchen mit der Kultur des Mikroorganismus geht man zu einer Schüttelkultur in einem Erlenmeyerkolben über – dies ist der erste Schritt zur submersen Fermentation. Die Kultur wird dann in einen kleinen Vorfermenter (z. B. 20 l) überimpft. Meist werden hierbei und beim Übergang in den zweiten Vorfermenter (200 l) die Wachstumszeiten so gehalten, daß in der logarithmischen Wachstumsphase überimpft wird. In diesem Beispiel müßte also der Produktionsfermenter 2000 l fassen. Dieses „scale up“ von ungefähr 1:10 ist typisch für die vorliegenden Verfahren.

Die Herstellung von *Bacillus-thuringiensis*-Sporen gilt einem umweltfreundlichen Produkt. Diese Sporen werden auf Kohlplantagen versprüht und von den Schädlingen, vor allem Raupen, gefressen. In den Raupen wird ein toxisches Produkt aus den Sporen frei. Die Wirkung dieser Substanz kommt also durch eine Korrektur der Masse spezieller *Bacillus*-Keime im Boden zustande. Sie stellt das durch Monokulturen beeinträchtigte Gleichgewicht wieder her.

3.4. Umwandlungsreaktionen

Ungeachtet der Tatsache, daß alle beschriebenen Verfahren Umwandlungen der Substrate sind, muß den „Biotransformationen“ besondere Bedeutung zugemessen werden. Manche Mikroorganismen können in einstufigen Reaktionen an speziellen Substanzen als Biokatalysator z. B. eine Oxidation, Methylierung oder Decarboxylierung durchführen. Besonders in der Steroidchemie werden diese mikrobiellen Zwischensynthesen genutzt, um schwierige und aufwendige chemische Verfahren zu vermeiden.

3.5. Wirtschaftliche Bedeutung mikrobiologischer Verfahren

Um die Bedeutung der Biotechnologie richtig einzuschätzen, ist es nötig, die wirtschaftliche Potenz einiger Gruppen herauszugreifen.

So wurden 1974 allein in der Bundesrepublik Deutschland 556 000 t Frischkäse sowie Hart-, Schnitt- und Weichkäse im Wert von 1.98 Mrd. DM hergestellt. Dazu wurden noch 178 000 t importiert (Wert 0.936 Mrd. DM). Die Brauerei und Mälzerei umfaßte in Deutschland 1972 in 756 Unternehmen 95 000 Beschäftigte und hatte einen Umsatz von 9.9 Mrd. DM^[7]. Vom Primärmetaboliten Citronensäure wurden 1974 weltweit über 200 000 t (ohne Berücksichtigung der Staatshandelsländer) fermentativ erzeugt^[8]. Antibiotika werden in großen Mengen hergestellt. Die Produktion von Penicillin stieg in den USA von 75 t im Jahr 1949 auf ca. 4500 t im Jahr 1975. Die Weltproduktion wird heute auf 10 000 t/Jahr geschätzt, die Produktion aller Antibiotika auf 25 000 t/Jahr.

4. Neue Entwicklungen biotechnologischer Prozesse

Lebewesen sind der Selektion und Mutation, d. h. der Evolution, unterworfen. Diese Veränderungen der Mikroorganismen lassen sich teilweise bereits steuern. Es können z. B. Ausbeuten an Antibiotika erhöht oder die Mikroorganismen an ein anderes Substrat angepaßt werden.

Mikrobiologisch-biochemisch-genetische Entwicklungsarbeiten dieser Art haben oft genug auch technische Konsequenzen und können schließlich Veränderungen am Markt bewirken. Bekannte Beispiele sind die Antibiotika, die anfangs in kleinen Glasgefäßen hergestellt wurden und heute in hochentwickelten Fermentern produziert werden. Am Anfang waren Antibiotika eine teure Besonderheit, heute sind sie ein für jedermann zugängliches Pharmazeutikum.

Auch die technische Seite bietet viele interessante Möglichkeiten. Neben den alten Rührfermentern sind neue Fermenter getreten. Nach Rehm^[2, 9] kann man drei Gruppen unterscheiden – Rührfermenter (z. B. bei Mehrphasenfermentationen verwendbar, wie sie z. B. bei Paraffinsubstraten erforderlich sind), Airlift-Reaktoren (keine mechanische Rührung) und spezielle Reaktoren. Dazu gehören Reaktoren, in denen mit explosiven Gasmischungen gearbeitet werden kann, wie sie für Knallgas- oder Methan-verwertende Mikroorganismen benötigt werden. Weiterhin sind hier u. a. Fallfilm-, Wirbelschicht-, Multistage- und Oberflächenreaktoren einzuordnen^[10].

4.1. Biomasseproduktion

Eine der Schlüsselentwicklungen für die gesamte Biotechnologie ist die Biomasseproduktion. Damit ist die Herstellung von Zellmasse aus Mikroorganismen gemeint.

4.1.1. Substrat

In der Regel benötigen Mikroorganismen, wie auch andere lebende Zellen, zum Wachstum eine Kohlenstoff- und eine Stickstoffquelle, daneben müssen Phosphat und andere Salze vorhanden sein.

Als Kohlenstoffquelle und oft auch als Stickstoffquelle dienen organische Verbindungen. Dies bedeutet, daß viele mikrobiologische Prozesse direkt auf Primär- oder Sekundärprodukten der Landwirtschaft basieren: Milch bei der Joghurtproduktion, Gerste bei der Brauerei, Melasse bei der Citronensäureherstellung, Soja bei der Produktion von Antibiotika. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung von Abfall der menschlichen Kulturen. Biologische Abwasserreinigungsanlagen sind heute bereits unentbehrlich.

Jenseits dieser Substrate für das Wachstum von Mikroorganismen gibt es viele Substanzen, die als Kohlenstoffquelle dienen können, obwohl sie abiotisch erscheinen und einige von ihnen für Zellen giftig sind. Erdöl, Erdgas, Paraffin, Methanol, CO₂, CO, aber auch Cellulose gehören dazu. Im Hinblick auf die Evolution ist es schwierig zu verstehen, daß Bakterien und Hefen existieren, die z. B. Methanol als Kohlenstoffquelle verwenden. Sie lassen sich aus Erde und Wasser oder von Blüten und Früchten isolieren. Eine Erklärung könnte das Vorhandensein von Pektinesterase sein^[11]. Bei Cellulose-abbauenden Pilzen ist ein Verständnis leichter. Allerdings sind nur spezielle Gruppen dazu imstande. Der normale Nachwuchs von Cellulose auf der Welt umfaßt pro Jahr einige 100 Millionen Tonnen; die Tätigkeit der genannten Mikroorganismen bewahrt uns vor dem „Erstickungstod“ durch Cellulose.

Methanol und Cellulose sind zwei sehr verschiedene Kohlenstoffsubstrate. Methanol kann aus Kohle, Gas und Erdöl gewonnen werden und wird sehr wahrscheinlich einer der wichtigsten und billigsten Grundstoffe der Chemie in der Zukunft sein. Cellulose ist dagegen ein alter Grundstoff mensch-

licher Kulturen (Wärme, Schiffbau, Hausbau), der überdies Jahr für Jahr nachwächst. Beide Substrate bieten sich an für biotechnologische Verfahren. Nährmedien für Methanol- und für Cellulose-verwertende Bakterien^[12] sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4. Nährmedien für Methanol- und für Cellulose-verwertende [12] Bakterien.

Methanol	kontinuierlich zudosiert
NH ₄ OH (25proz.)	am Start 2.8 ml/l
H ₃ PO ₄ (85proz.)	am Start 2.0 ml/l
MgSO ₄ · 7 H ₂ O	0.9 g/l
Na ₂ SO ₄	0.24 g/l
Fe ₂ (SO ₄) ₃ · 3 H ₂ O	85 mg/l
CaCO ₃ und Leitungswasser	0.14 g/l
Cellulose	5 %
KH ₂ PO ₄	1 %
NaCl	0.1 %
(NH ₄) ₂ SO ₄	1 %
MgSO ₄ · 7 H ₂ O	0.3 %
CaCl ₂	0.1 %
Spurenelemente und Wasser	

Die Umwandlung von Methanol in Biomasse wird in einer vollsynthetischen Nährlösung durchgeführt, d.h. die Mikroorganismen treten hier an die Stelle, die im natürlichen Kreislauf die Pflanzen besetzen. Das auf Cellulose basierende Verfahren beschleunigt den sehr langsamem natürlichen Prozeß der Cellulosezersetzung. In beiden Fällen wird also aus einfach zu erhaltenden Grundstoffen in einem Fermentationsverfahren Biomasse hergestellt. Sie besteht aus Zellen, die oft die für Futter oder Nahrungsmittel gesetzten Normen übertreffen, z.B. an Proteingehalt.

4.1.2. Biotechnologie

Ein Merkmal der bekannten biotechnologischen Prozesse ist die chargeweise Durchführung der Verfahren; eine Charge benötigt Stunden, Tage, vereinzelt auch Wochen. Nach der Ernte erfolgt ein neuer Ansatz. Die Biomasseproduktion läuft dagegen kontinuierlich ab. Das bedeutet, daß Wochen, Monate oder länger aus dem Reaktionsgefäß Biomasse abgezogen werden kann; zur selben Zeit wird Nährmedium zudosiert. Dieser Verfahrensablauf, der in der chemischen Technologie verbreitet ist, kann z.B. durch genetische Veränderungen der Zellen gestört werden; er hat aber auch viele Vorteile (z.B. Wirtschaftlichkeit).

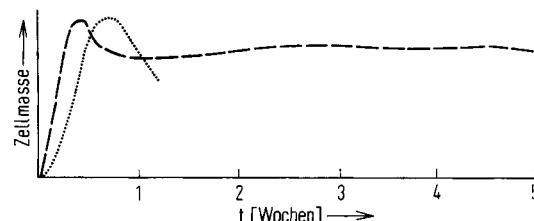


Abb. 3. Wachstumskurven bei Chargen- (----) und kontinuierlicher Kultur (—).

In Abbildung 3 wird ein Chargenprozeß zur Gewinnung von Biomasse aus Methanol mit einem kontinuierlichen Prozeß verglichen. Es handelt sich um einen von Hoechst-Uhde entwickelten, auf Methanol basierenden Prozeß, der das Bakterium *Methylomonas spec.* benutzt^[13]. Das Bakterium ist obligat methylotroph. Man verwendet eine vollsynthetische Nährlösung und fermentiert in neu entwickelten Reaktoren.

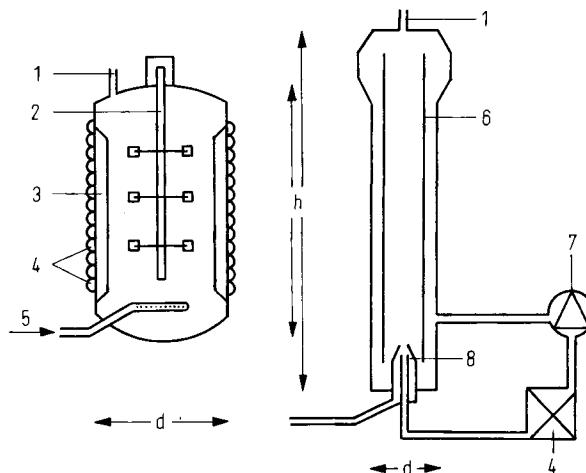


Abb. 4. Vergleich zwischen klassischem Rührkessel (links) und modernem Strahldüsenlaufreaktor (rechts). 1 = Abluft, 2 = mehrstufiger Blattrührer, 3 = Schikane, 4 = Kühlung, 5 = Luft, 6 = Einstektkrohr, 7 = Umwälzpumpe, 8 = Strahldüse.

In Abbildung 4 sind ein Vertreter der alten Generation von Fermentern und eine Neuentwicklung dargestellt. Der Weg von der Flachsrotte in einer Erdkuhle über den Gärbottich oder das Sauerkrautfaß und den belüfteten Rührkessel führte zu einer Reihe von neuen Systemen^[10, 14–16], die oft von der weit entwickelten chemischen Verfahrenstechnik beeinflußt waren. Die Gründe für die Entwicklung neuer Verfahren lassen sich aus Tabelle 5 ablesen.

Tabelle 5. Vergleich von Reaktoren (Beispiel: Biomasseproduktion).

Konventioneller Rührkessel	Moderner Schlaufenreaktor
Hohe Energiekosten – 10 kW/m ³	Niedrige Energiekosten – 2 kW/m ³
Interne Kühlung (Mantel) –	Externe Kühlung (Plattentauscher) –
begrenzte Vergrößerungsmöglichkeit	beliebige Vergrößerungsmöglichkeit
Undefinierte Durchmischung – ungleichmäßige Verweilzeit	Definierte Durchmischung – gleichmäßige Verweilzeit
Hoher Luftbedarf – 10–20 % Sauerstoffausbeute	Geringer Luftbedarf – 40–50 % Sauerstoffausbeute
Chargenbetrieb	Kontinuierlicher Betrieb

Der Vergleich der Zahlen, insbesondere der Werte des Energieverbrauches zeigt, welche Fortschritte eine Optimierung des Reaktionsgefäßes bringen kann.

In diesem Zusammenhang muß auf die Erfassung der Daten eines Reaktions- oder Wachstumsverlaufs im Fermenter hingewiesen werden. Der Computer verdeutlicht entscheidend die Fülle der biologischen Daten, er erleichtert die Auswahl der biologisch sinnvollen Entwicklungen, wenn zwei Voraussetzungen geschaffen werden. Zum einen müssen die Daten des Prozesses im Fermenter gemessen werden. Dies ist bei den Verfahren mit synthetischem Nährmedium relativ leicht möglich; komplexe organische Medien sind sehr viel schwerer zu erfassen. Zum anderen sollte die Stoffwechselphysiologie des Mikroorganismus bekannt sein. Auf dieser Grundlage kann heute begonnen werden, biologische Vorgänge optimal ablaufen zu lassen^[3].

4.1.3. Ökonomie

Ökonomische Überlegungen sind bei industriellen Verfahren eine wichtige Komponente. In der Regel genügt es nicht,

ein neues, originelles Produkt auf neuen Wegen herzustellen. Der Gesamtprozeß konkurriert mit anderen Verfahren, und oft genug hilft keine Originalität – der alte Prozeß leistet zu einem geringeren Preis fast das gleiche.

Von wirtschaftlichen Überlegungen hängt auch das Schicksal der biologischen und technologischen Neuentwicklungen ab. Die hier angeführten Prozesse zur Biomasseproduktion umfassen aber so viele Verbesserungen, daß wahrscheinlich zumindest Teile der neuen Biotechnologie Eingang in die Praxis finden werden.

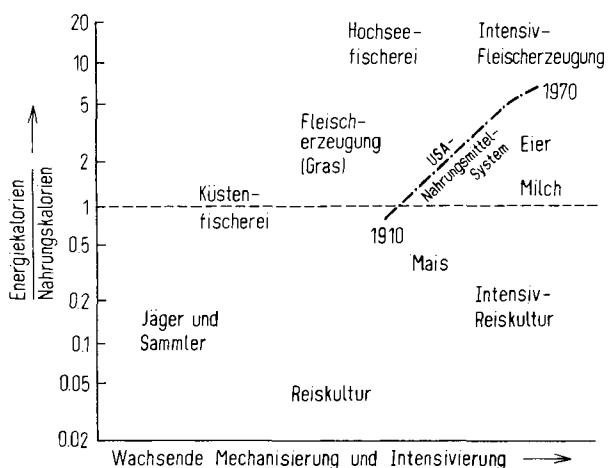


Abb. 5. Energieaufwand für die Nahrungsmittelherstellung (nach [20, 21]). Angegeben ist das Verhältnis von Energie- zu Nahrungskalorien.

Zuerst ist auf die kontinuierliche Prozeßführung hinzuweisen. Mit dieser Methode ist es möglich, Fermentationsanlagen kleiner zu dimensionieren oder bei größeren Kesseln mehr Produkt zu erzeugen als bei chargenweisem Betrieb. Bei einem Betrieb mit starker Automatisierung ist auch der Personalaufwand kleiner. Die ökonomische Größenordnung von Anlagen zur Biomasseproduktion liegt bei ca. 60000 bis 100000 t/Jahr. Diese Menge an Biomasse, oft auch wegen ihrer Hauptkomponente Protein SCP („single cell protein“) genannt, kann von ca. 100 Menschen produziert werden.

Hinzu kommt, daß eine SCP-Fabrik nur wenig Landbedarf hat (ca. 1000 m²), unabhängig vom Klima ist und ein Produkt herstellt, das immer gleich zusammengesetzt ist. Dieses Produkt kann an fast jedem Punkt der Welt in der gleichen Qualität hergestellt werden. Wenn man noch die für manche Länder sehr wichtige Importabhängigkeit von Produkten wie Soja oder Getreide hinzunimmt, ist zu verstehen, warum bereits einige hunderttausend Tonnen derartigen SCPs produziert werden. Derartige Produkte dürften auch die Proteinprie se beeinflussen^[17]. Ein besonders wichtiger Aspekt der Biotechnologie ist aber der Energieaufwand.

Auch vor der starken Erhöhung der Energiepreise war bekannt, daß die Energiekosten für jedes Verfahren entscheidend sind. Dieses Wissen wurde aber wegen der Billigkeit der Primärenergie nicht genügend beachtet. Erst die Schockwirkung der Publikationen über einen möglichen Kollaps der Weltressourcen^[18, 19] und dann der Preisanstieg zwangen zu einer kritischen Betrachtung der Gesamtsituation.

Sieht man die Nahrungsmittelversorgung der Menschen unter dem Aspekt des Energieverbrauchs, zeigt sich eine beunruhigende Tendenz. Der Mensch benötigt pro Jahr ca. 1 Mio. kcal, so daß die Welternte energetisch betrachtet für 5,6 Mrd. Menschen reichen müßte. Es gehen aber 50–90 % der Energie verloren, wenn die Kohlenhydrate als Futter für Tiere Verwendung finden. Weiterhin verderben bis zu 34 % der Welternte. Das Meer birgt noch Möglichkeiten; zur Zeit werden aber nur 1 % der Nahrung aus dem Meer gewonnen.

In Abbildung 5 ist aufgetragen, wieviele Kalorien an Energie man aufwenden muß, um eine Kalorie an Nahrung zu erhalten. Man geht dabei vom Verhältnis 1,0 für den Fischfang nahe der Küste aus, d. h. für 1 Nahrungskalorie wird 1 Energiekalorie gebraucht. Energetisch günstig lebten unsere Vorfahren, die Jäger und Sammler. Auch die einfachen Reiskulturen sind in diesem Bereich zu suchen. Die modernen Methoden der Nahrungsbeschaffung oder -herstellung sind sehr viel aufwendiger. Die normale Fleisch- oder Eierproduktion muß bereits 2–5 Kalorien Energie, intensive Fleischerzeugung 10 Kalorien und Fischfang im offenen Meer 20 oder noch weit mehr Kalorien

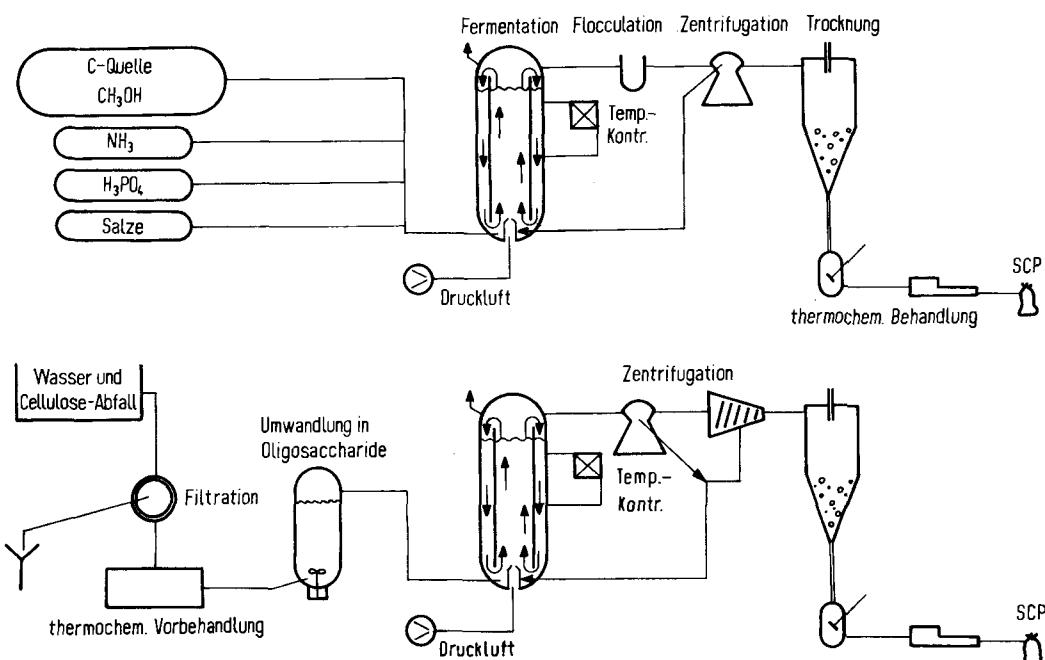


Abb. 6. Zwei SCP (single cell protein)-Prozesse auf Methanol- und auf Cellulosebasis [3].

en für 1 Kalorie Nahrung aufzubringen. Diese Angaben zeigen, daß eine hohe Nahrungsmittelproduktion einen hohen Energieaufwand erfordert, der meist nicht erkannt wird. Bei diesen Berechnungen sind Urbarmachung, Bewässerung und Drainage des Landes nicht immer berücksichtigt.

Bei den biologischen Verfahren zur SCP-Herstellung liegt der Aufwand im Mittel bei 5 Energiekalorien für 1 Nahrungs-kalorie. Da sich die Biomasse vor allem durch ihren hohen Proteingehalt auszeichnet, der in der Größenordnung von höchstwertigen Proteinquellen liegt, ist es nicht verwunderlich, daß weltweit SCP-Verfahren entwickelt werden. Vermutlich werden derartige Produkte in absehbarer Zeit auch direkt zu Lebensmitteln verarbeitet werden, denn beim Umweg über die Tierfütterung gehen im Mittel 85 % der Energie verloren^[22]. Eine andere Berechnung^[23] geht davon aus, daß auf 1 Hektar 4000 kg Getreide geerntet werden, die bei einer Verfütterung 85 kg Protein (Rindfleisch) liefern. Bei der fermentativen Nutzung des Getreides ergeben sich 680 kg Protein.

4.1.4. Biomasseverfahren

Aus der Fülle der Biomasse-Verfahren sollen zwei Beispiele unter dem Aspekt ihrer Anwendungsmöglichkeit betrachtet werden. In Abbildung 6 sind ein auf Methanol und ein auf Cellulose basierender Prozeß dargestellt.

Sehr interessant ist die Verwendung einer „symbiotischen“ Kulturmischung in einem Prozeß, der von Cellulose ausgeht^[25]. Hierbei wird eine Art Population verimpft, wie sie auch in der Natur vorkommt. Die Anwendung dieses Substrates wird sicher lokal begrenzt sein. Auf Methanol basierende Verfahren lassen sich dagegen global anwenden. Auch ist die Qualität des Produktes ein wichtiges Argument (Tabelle 6).

Tabelle 6. Zusammensetzung einiger Proteinquellen.

	FAO Standard [24]	Soja- mehl [24]	SCP- Hefe [24]	SCP- Bakterium [13]
Rohprotein- gehalt [%]		45	60–62	80–85
Essentielle Aminosäuren [g/16 g N]				
Ile	4.2	4.8	5.3	4.3
Leu	4.8	6.1	7.8	7.4
Lys	4.2	6.1	7.8	6.5
Met + Cys	4.2	2.9	2.5	2.5
Phe + Tyr	5.6	8.4	8.8	7.1
Thr	2.8	4.0	5.4	4.6
Val	4.2	5.0	5.8	5.6
Trp	1.4	1.3	1.3	1.5

4.2. Andere Verfahrensgruppen

4.2.1. Enzyme

Der Schritt von der Herstellung von Zellen zum Inhalt dieser Zellen ist schnell vollzogen. Eine der interessantesten Gruppen der Zellinhaltsstoffe dürften die Enzyme sein. Diese biologischen Katalysatoren spielen eine Schlüsselrolle bei Biosynthesen z. B. von Kohlenhydraten, Proteinen, Fette und Steroiden.

Hauptenzymverbraucher sind Stärkeindustrie, Lederindustrie, Medizin, Lebensmittelindustrie und Waschmittelindustrie. Daneben spielen Enzyme in der Feinchemikalienbranche eine Rolle.

Von Mikroorganismen produzierte Enzyme werden in den nächsten Jahrzehnten große Bedeutung erlangen. So wurde z. B. schon jetzt die mikrobiologische Herstellung von Labenzymen entwickelt, da es für bestimmte Länder schwer ist, die nötigen Mengen Lab für die Käseherstellung zu beschaffen. Die interessanteste Entwicklung sind jedoch die immobilisierten Enzyme^[26, 27]. Enzyme können in wasserunlöslichem Material immobilisiert werden, ohne ihre katalytische Aktivität zu verlieren. Der Nutzen ist offensichtlich; es gibt bereits zahlreiche Verfahren für diese Zwecke. So können z. B. immobilisierte Penicillin-spaltende Amidasen in einer Säule oder in einem Reaktor 6-Aminopenicillansäure liefern, die der Ausgangsstoff für viele wichtige halbsynthetische Penicilline ist.

Auch die Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie wird ein Anwender derartiger Enzympräparate sein. Im technischen Bereich bieten sich Enzymbehandlungen zur Unschädlichmachung spezieller Abwässer an.

4.2.2. Sekundärmetaboliten

In diesen Zusammenhang gehören z. B. neue Antibiotika, Substanzen mit pharmakologischer Wirkung oder andere Naturstoffe. Die mikrobiologische Herstellung von Lebensmittel-farbstoffen, Insektiziden, Inhibitoren usw. ist eine interessante Entwicklung.

Hierher gehören auch Biopolymere wie z. B. Dextrane. Diese Gruppe ist sehr zukunftsträchtig. Als Bohrhilfsmittel (Xantham) vermitteln sie dem Bohrwasser die nötige Viskosität, um das Gestein hochzutransportieren. Die Eigenschaften dieser fermentativ hergestellten natürlichen Polymere sind für spezielle Anwendungen sehr günstig^[17].

4.2.3. Leaching

Die Fähigkeiten der Mikroorganismen lassen sich auch zur Metallgewinnung nutzen. Beim Leachingverfahren werden z. B. kristalline Kupfersulfide oder Uranverbindungen durch Bakterien gelöst. Man weiß zwar, daß Mikroorganismen bei der Verwitterung, Erdbildung, Mineralablagerung usw. mitwirken, doch ist es erstaunlich, daß giftige Schwermetallverbindungen von speziellen Mikroorganismen wie Thiobacillus- und Ferrobacillusarten gelöst werden. Dadurch wird es möglich, vor allem Haldenbestände aufzuarbeiten. In einzelnen Fällen werden die Verfahren bereits großtechnisch (Schweden, Kanada) angewendet, um minderwertige Erze anzureichern.

4.2.4. Rückstandbeseitigung

Die Industriegesellschaft muß sich immer stärker mit den Problemen der Rückstände auseinandersetzen. Beim Abwasser ist meistens eine biologische Reinigung nötig. Die Biotechnologie wird auch zur Müllbeseitigung herangezogen. Bei neueren Verfahren wird der Müll mit Abwasser vermischt und kompostiert. Da Verfahren dieser Art auf den Abfall einer bestimmten Stadt, eines Industrie- oder eines landwirtschaftlichen Betriebs zugeschnitten sein müssen, ist hier ein großes zukünftiges Arbeitsfeld zu sehen. Nur die der Mutation und Adaptation zugänglichen Mikroorganismen und eine entsprechende Technologie können letztlich für die Rückführung der Abfallstoffe sorgen.

Es gibt Verfahren, um aus Abfall wieder Grundsubstrate herzustellen. So wird in vielen Großstädten aus Müll in Gär- oder Faultürmen Methan mit Hilfe von Mikroorganismen produziert. Dieses Methan wird in das städtische Gasnetz

eingeschleust oder zur Beheizung kleinerer Kraftwerke oder zum Betrieb der Faultürme selbst verwendet. Der Prozeß läuft anaerob ab, wobei zuerst organische Substanz in Wasserstoff und Fettsäuren umgewandelt wird, die anschließend von den Methanobakterien in Methan und CO_2 zerlegt werden.

4.2.5. Weitere Leistungen von Mikroorganismen

Die N_2 -Fixierung durch Mikroorganismen läßt sich noch nicht gezielt für die Düngung in der Landwirtschaft nutzen. Es gibt Bakterien, die den Luftstickstoff mit Hilfe einer Nitrogenase fixieren können (z. B. Clostridien, Azotobacter). In diesen Organismen wird N_2 über NH_3 in Aminosäuren und Proteine umgewandelt. Die alte Dreifelderwirtschaft mit dem Ruhejahr beruhte u. a. auf der Stickstoffanreicherung durch N_2 -fixierende Mikroorganismen. Ferner sind die Symbionten zu nennen. Insbesondere die Leguminosen enthalten in den Knöllchen ihrer Wurzeln Bakterien (Rhizobiumarten), die in dieser Symbiose molekularen Stickstoff binden. So werden je Hektar und Jahr ca. 100 bis 200 kg N_2 gebunden. Die heutige Düngerherstellung nach dem Haber-Bosch-Verfahren ist essentiell für unsere Kultur, aber sie erfordert einen hohen Aufwand an Energie. Da es noch mehr Mikroorganismen gibt, die Luftstickstoff binden, besteht die Aussicht, daß dieser ökonomische, energiesparende Prozeß eines Tages stärker genutzt werden kann.

Eine weitere Gruppe von Mikroorganismen muß erwähnt werden – solche, die anorganische Verbindungen umsetzen. (Der Leaching-Prozeß ist bereits in Abschnitt 4.2.3 besprochen worden.) *Desulfovibrio* bilden z. B. Essigsäure und Schwefelwasserstoff unter Verwendung von Sulfat und Wasserstoff. Denitrifizierer reduzieren NO_3 und NO_2 z. B. unter Freisetzung von N_2 und Wasser. Für viele Mikroorganismen ist Licht die Energiequelle, um z. B. H_2S als H-Donor zu verwenden. Diese phototrophen und viele C-autotrophe Mikroorganismen benötigen Kohlenstoff; dieser Kohlenstoff wird aber nicht aus Kohlenhydraten, Fetten und Eiweiß entnommen, sondern aus dem CO_2 der Luft. Diese Kohlenstoffautotrophie rückt die Mikroorganismen in die Nähe der Pflanzen. Die Nutzung dieser Möglichkeiten durch die Biotechnologie beginnt gerade erst. So könnten z. B. übelriechende Gase, die auch CO_2 enthalten, einer Fermentation unterworfen werden, bei der die Mikroorganismen die Schadstoffe umwandeln, das CO_2 als Kohlenstoffquelle nutzen und dabei noch Biomasse liefern.

Zu diesen Beispielen der Nutzung mikrobieller Leistungen gehören auch Möglichkeiten ganz anderer Art. Ein großer Teil der Grundsubstrate für chemische Reaktionen kann mikrobiologisch hergestellt werden. Aceton, Butanol, Isopropanol, Ethanol, Glycerin, Essigsäure und viele andere Substanzen lassen sich mit speziellen Mikroorganismen auf Medien produzieren, die in der Regel Substrate pflanzlicher Herkunft enthalten. Die Ausgangssubstrate wachsen also nach. Derartige Prozesse sind zur Zeit nicht immer ökonomisch; in Entwicklungsländern dient allerdings der eine oder andere Prozeß als einzige Quelle der angegebenen Grundsubstrate. So ist die Ethanolproduktion aus Sulfitablauge, Mais, Molke, Melasse und fast allen Früchten oder Getreiden gerade in Entwicklungsländern, aber auch in Industrieländern, weit verbreitet. Derartige Verfahren könnten in Zukunft wieder stärker angewendet werden, wenn andere Basissubstrate nicht verfügbar oder zu teuer sind.

5. Kreislauf und Anpassung – biotechnologische Möglichkeiten

5.1. Die Nutzung der natürlichen Kreisläufe

Bei Betrachtung des in Abbildung 7 aufgezeichneten Kohlenstoffkreislaufs^[28] wird klar, daß die heute durchgeföhrten Verfahren zur Aufarbeitung von Müll und zur Reinigung von Abwasser erst ein Anfang sein können. Mikroorganismen sind an essentiellen auf- und abbauenden Prozessen in der Biosphäre beteiligt.

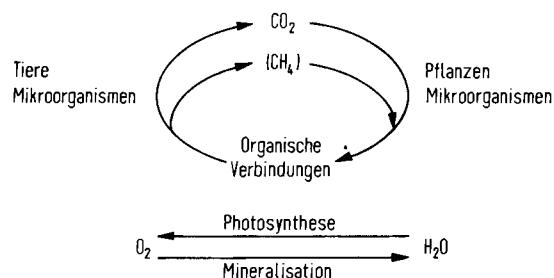


Abb. 7. Kreislauf des Kohlenstoffs [28].

Die Mikroorganismenzellen sind ein mit der Biotechnologie bereits heute zu handhabender Teil des natürlichen Kreislaufs, wobei für andere Teile, z. B. den Kreislauf des Stickstoffs, das gleiche gilt. Cramer^[29] stellte den biologischen Metabolismus mit cyclischer Funktion dem kulturellen Metabolismus mit linearer Funktion gegenüber. Es ist dabei klar, daß das exponentielle Wachstum eines Parameters in einem geschlossenen System schnell zu stagnierenden Werten führt, jede Wachstumskurve – bei Mikroorganismus oder Mensch – bestätigt das. Und die Feststellung, daß „Wachstum der einzige Beweis für Leben“ sei (Kardinal Newman 1864, zitiert nach^[30]), muß dazu kein Widerspruch sein. Biologische Prozesse halten Fließgleichgewichte aufrecht, und sie tun dies mit einem hohen Wirkungsgrad. Dieser hohe Wirkungsgrad ist durch die Evolution erreicht worden. Die Leistungen von Muskelzellen sind ein Beispiel. Man nimmt an, daß ihr Wirkungsgrad im Mittel 60 % beträgt. Verbrennungsmotoren können Spitzenwerte von 30 % oder mehr erzielen; der mittlere Wert liegt bei knapp 10 %. Intensivtierhaltung, Hochseefischerei, intensive Getreideherstellung haben Wirkungsgrade zwischen 5 und 20 %. Der biotechnologische Prozeß der Biomasseherstellung erreicht 20 % oder mehr (siehe Abb. 5). Es bietet sich an, derartige Verfahren in die Überlegung einzubeziehen, wie man Abfall beseitigen und Nahrung produzieren kann oder allgemein wie man biologische Kreisläufe statt linearer Verbrauchsprozesse installieren kann.

5.2. Angepaßte Verfahren

Biotechnologische Großverfahren, die viel Kapital, umfangreiches know how und hochqualifizierte Mitarbeiter benötigen, können durch Einfachverfahren ergänzt werden, die mit wenig Kapital, geringem know how und einfach ausgebildeten Mitarbeitern betrieben werden. Gerade biotechnologische Verfahren müssen oft an besondere Standorte angepaßt werden. Das Abwasser eines Dorfes in Mitteleuropa muß anders behandelt werden als ein Grubenabwasser in Afrika. Verfahren zur Biomassegewinnung lassen sich auch in speziellen Kleinbetrieben durchführen, die nur einen überschaubaren Bevölkerungskreis

mit Biomasse z. B. als Futterkomponente versorgen^[31]. Abbildung 8 zeigt einen entsprechenden Reaktor^[34]. Ein Markt mit vielen Intensivtierhaltungen muß dagegen mit einer Großanlage bedient werden.

Aber nicht nur kleine und große Anlagen sind möglich, sondern auch die Anpassung an spezielle Bedürfnisse. Der Grund liegt in der Adaptationsmöglichkeit der Zellen. Durch Mutation, Selektion oder einfache Anpassung an Substrate ist die gezielte Lösung einer Aufgabe möglich. So begann man z. B. die erstaunlichen Ergebnisse der molekularbiologischen Forschung der letzten 15 Jahre anzuwenden. Durch

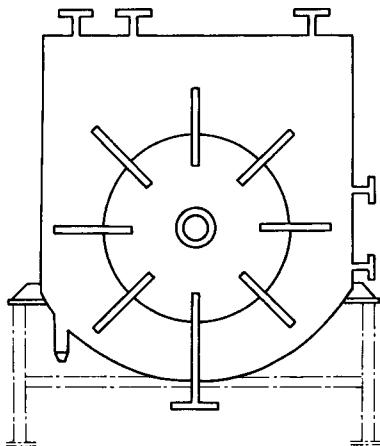


Abb. 8. Schaufelradreaktor zur Biomassegewinnung im kleineren Maßstab.

Plasmidübertragung wurden abbauende Stoffwechselwege eines Bakteriums auf ein anderes übertragen, dort sozusagen gesammelt, und diese „Supermicrobe“^[32, 33] kann dann Verbindungen wie Campher, Octan, Salicylate und Naphthalin abbauen. Biotechnologische Verfahren sind eine wichtige Möglichkeit, unsere Zivilisation wieder ins Gleichgewicht zu bringen.

6. Schluß

Der mikrobielle Lebensraum wird bisher nur zufällig und sporadisch genutzt. In der Vergangenheit wurden die Möglichkeiten oft zugunsten von Prozessen vernachlässigt, die wirtschaftlicher waren. Heute ist man sich der Schattenseiten unserer Zivilisation bewußt geworden; Mikrobiologie und Technologie bieten sich an, um die Verhältnisse zu verbessern. Die Mikrobiologie bringt das natürliche Prinzip der Kreislaufprozesse mit, die einfachen Zellen sind zu vielerlei Anpassungen fähig, und die Möglichkeiten der Kleinstlebewesen umfassen

alle die Reaktionen, die wir vom lebenden Organismus kennen. Die heutige Technologie ist hoch entwickelt und bietet eine Fülle von Verfahren an, denen unser Zivilisationsniveau zu verdanken ist. Claude^[35] spricht vom kommenden Zeitalter der Zelle; Spinks^[23] fordert neben politisch-ökonomischem Pessimismus Vertrauen in die Technologie.

Es liegt nahe, der Symbiose aus Biologie und Technologie, der Biotechnologie, in Zukunft eine entscheidende Position einzuräumen.

Eingegangen am 14. September 1976 [A 153]

- [1] H. Weide, Monatsh. Veterinärmed. 29, 704 (1974).
- [2] H.-J. Rehm: Industrielle Mikrobiologie. Springer, Berlin 1967.
- [3] P. Präve, D. A. Sukatsch, U. Faust, Interdisc. Sci. Rev. I, 85 (1976).
- [4] S. C. Prescott, C. G. Dunn: Industrial Microbiology. McGraw-Hill, New York 1959.
- [5] M. J. Pelczar jr., R. D. Reil: Microbiology. McGraw-Hill, New York 1972.
- [6] DOS 2212929 (1972), Benckiser GmbH.
- [7] Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 1975. Stat. Bundesamt/Wiesbaden. Verlag Kohlhammer, Stuttgart 1976.
- [8] G. Schulz, J. Rauch in: Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie. 4. Aufl. Verlag Chemie, Weinheim 1975, Bd. 9, S. 624ff.
- [9] H.-J. Rehm, Chem. Ind. (Düsseldorf) 27, 373 (1975).
- [10] W. Sittig, H. Heine, Vortrag auf der Achema 1976.
- [11] R. K. Finn, persönliche Mitteilung.
- [12] S. Schmid, M. T. Bomar, Alimenta 14, 185 (1975).
- [13] U. Faust, B. Dorsemagen, P. Präve, D. A. Sukatsch, K. H. Zepf in H. Dellweg: 5. Internationales Fermentations-Symposium, Berlin 1976. Verlag Versuchs- und Lehranstalt für Spiritusfabrikation und Fermentationstechnologie, Berlin 1976, S. 203.
- [14] A. Prokof, J. Votrula, Folia Microbiol. 21, 185 (1976).
- [15] V. Oels, K. Schügerl, J. Todt, Chem. Ing. Tech. 48, 73 (1976).
- [16] A. Einsele, A. Fiechter, Chem. Anlagen Verfahren April 1973, S. 57.
- [17] C. S. Barnes, Food Technol. Aust. Febr. 1976, S. 55.
- [18] D. L. Meadows et al.: The Dynamics of Growth in an Finite World. Wright-Allen Press, Cambridge 1973.
- [19] Futures 1 (Febr.) 1973, Guildford Surrey.
- [20] J. S. Steinhart, C. E. Steinhart, Science 184, 307 (1974).
- [21] A. L. Johnson jr., Astronaut. Aeronaut. Nov. 1974, S. 64.
- [22] D. Pimentel, L. E. Hurd, A. C. Bellotti, M. J. Forster, I. N. Oka, O. D. Sholes, R. J. Whitman, Science 182, 443 (1973).
- [23] A. Spinks, Proc. Roy. Soc. Med. 67, 969 (1974).
- [24] H. G. de Ponton: Proteins from Hydrocarbons. Academic Press, London 1972.
- [25] R. K. Finn, A. L. Tannahill, Biotechnol. Bioeng. 15, 413 (1973).
- [26] H. H. Weetall, Process. Biochem. Juli/Aug. 1975, S. 3.
- [27] W. R. Vieth, K. Venkatasubramanian, Chem. Technol., Jan. 1974, S. 47.
- [28] W. C. Evans, Biochem. Soc. Trans. 7, 433 (1976).
- [29] F. Cramer: Fortschritt durch Verzicht. Nymphenburger Verlagshandlung, München 1975.
- [30] H. G. Stever, Interdisc. Sci. Rev. I, 1 (1976).
- [31] R. Knecht, U. Faust, UNIDO, Draft Report of the Exper. Group Meeting, Vienna, Okt. 1973, ID/WG. 164/29.
- [32] A. M. Chakrabarty, D. A. Friello, US-Pat. 3923603 (1974), General Electric Company.
- [33] Processing, Febr. 1976, S. 7.
- [34] U. Faust, R. Knecht, W. Wengeler, DOS 2454443 (1976), F. Uhde GmbH.
- [35] A. Claude, Science 189, 433 (1975).