

# Hans Dieter Janke

# Umweltbiotechnik

---

2. Auflage



Ulmer

**UTB**



UTB 8380

## **Eine Arbeitsgemeinschaft der Verlage**

Beltz Verlag Weinheim · Basel

Böhlau Verlag Köln · Weimar · Wien

Verlag Barbara Budrich Opladen · Farmington Hills

facultas.wuv Wien

Wilhelm Fink München

A. Francke Verlag Tübingen und Basel

Haupt Verlag Bern · Stuttgart · Wien

Julius Klinkhardt Verlagsbuchhandlung Bad Heilbrunn

Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft Stuttgart

Mohr Siebeck Tübingen

C. F. Müller Verlag Heidelberg

Orell Füssli Verlag Zürich

Verlag Recht und Wirtschaft Frankfurt am Main

Ernst Reinhardt Verlag München · Basel

Ferdinand Schöningh Paderborn · München · Wien · Zürich

Eugen Ulmer Verlag Stuttgart

UVK Verlagsgesellschaft Konstanz

Vandenhoeck & Ruprecht Göttingen

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

Hans Dieter Janke

# Umweltbiotechnik

Grundlagen und Verfahren

Unter Mitarbeit von  
Alexander P. Herrmann und Thilo Britz

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

226 Schwarzweißabbildungen

99 Tabellen

92 Formeln

Verlag Eugen Ulmer Stuttgart

Dr. Hans Dieter Janke  
Gartenstraße 97  
D-66386 St. Ingbert

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [http:// dnb.d-nb.de](http://dnb.d-nb.de) abrufbar.

ISBN 3-8252-8380-3 (UTB)  
ISBN 3-8001-2890-7 (Ulmer)

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2008 Eugen Ulmer GmbH & Co.  
Wollgrasweg 41, 70599 Stuttgart (Hohenheim)  
E-mail: [info@ulmer.de](mailto:info@ulmer.de)  
Internet: [www.ulmer.de](http://www.ulmer.de)  
Lektorat: Dr. Nadja Kneissler  
Druck: Gutmann, Talheim  
Printed in Germany

ISBN 3-8252-8380-3 (UTB-Bestellnummer)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>10</b>
<b>Vorwort zur 1. Auflage</b>	<b>11</b>
<b>1 Biologische Stoffwandlung als eine der Grundoperationen im technischen Umweltschutz (Einführung)</b>	<b>13</b>
1.1 Grundoperationen der Verfahrenstechnik und Besonderheiten der biologischen Stoffwandlung .....	14
1.2 Bioreaktoren als technische Ökosysteme .....	16
1.3 Umweltrechtliche Anforderungen als Zielgrößen für die Entwicklung und den Einsatz umwelttechnischer Verfahren .....	21
<b>2 Mikroorganismen und die Grundzüge ihres Stoffwechsels</b>	<b>26</b>
2.1 Merkmale und Lebensweise von Mikroorganismen .....	26
2.2 Grundzüge des Stoffwechsels von Mikroorganismen .....	33
2.2.1 Allgemeine thermodynamische Aspekte des mikrobiellen Zellstoffwechsels .....	35
2.2.2 Enzyme als hochselektive Biokatalysatoren .....	39
2.2.3 Energetische Kopplung von exergonen und endergonen Stoffwechselreaktionen über das ATP-ADP-System .....	48
2.2.4 Redox-Reaktionen und membran-gebundener Elektronentransport .....	51
2.2.5 Protonenpotential der Cytoplasma-Membran und membran-gebundene ATP-Synthese (Elektronentransport-Phosphorylierung) .....	57
2.2.6 Substratstufen-Phosphorylierung .....	60
2.3 Chemotrophie .....	61
2.3.1 Chemoorganotrophie .....	61
2.3.2 Chemolithotrophie .....	72
2.4 Phototrophie .....	74
2.4.1 Oxygene Photosynthese .....	77
2.4.2 Anoxygene Photosynthese .....	78
2.5 Aufnahme von Nährstoffen in die Zelle .....	79
<b>3 Rolle der Mikroorganismen im Stoffhaushalt der Natur</b>	<b>86</b>
3.1 Ökosysteme und biozönotisches Grundelement .....	86
3.2 Wechselwirkung von Mikroorganismen mit ihrer belebten und unbelebten Umwelt .....	88
3.2.1 Die „ökologische Nische“ - Genotypische Anpassung der Mikroorganismen an ihre Umwelt .....	89
3.2.2 Phänotypische Anpassung der Mikroorganismen an wechselnde Umwelteinflüsse .....	91
3.2.3 Interaktionen der Mikroorganismen mit anderen Lebewesen .....	93
3.3 Beitrag der Mikroorganismen zum globalen C-Kreislauf .....	99
3.3.1 Oxidativer Endabbau von organischer Substanz (Mineralisierung) .....	102
3.3.2 Abbau von organischer Substanz unter Luftabschluss (Methanisierung) .....	103

## 6 Inhaltsverzeichnis

---

3.3.3	Unspezifische radikalische Oxidation komplexer organischer Verbindungen durch Holz- und Bodenstreu-zersetzende Pilze .....	107
3.3.4	Mikrobielle Fixierung von CO <sub>2</sub> .....	110
3.4	Beitrag der Mikroorganismen zum globalen N-Kreislauf .....	112
3.4.1	Proteolyse und Ammonifikation .....	114
3.4.2	Mikrobielle Oxidation von Ammonium .....	116
3.4.3	Mikrobielle Nitratreduktion .....	119
3.4.4	Bindung von Luftstickstoff (N <sub>2</sub> -Fixierung) .....	121
3.5	S-Kreislauf .....	124
3.6	Mikrobielle Prozesse im Boden .....	127
3.6.1	Boden als Lebensraum von Mikroorganismen .....	129
3.6.2	Mikrobielle Prozesse bei der Humifizierung von abgestorbenem organischem Material .....	131
3.6.3	Beitrag der Mikroorganismen zur Umwandlung von Schwefel- und Phosphorverbindungen im Boden .....	134
3.7	Rolle der Mikroorganismen in limnischen Gewässern .....	137
3.7.1	Schichtungsvorgänge in limnischen Gewässern .....	138
3.7.2	Stoffumwandlungsprozesse in stehenden Gewässern .....	140
3.7.3	Gewässergüte und „Natürliche Selbstreinigung“ in Fließgewässern .....	145
<b>4</b>	<b>Eingriffe des Menschen in das Gesamt-Ökosystem "Erde"</b>	<b>148</b>
4.1	Technik/Technisierung contra natürliche Umwelt .....	145
4.2	Destabilisierung des globalen CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> -Kreislaufs .....	150
4.3	Industriechemikalien und ihr Verhalten in der Umwelt .....	154
4.4	Gewässernutzung und -bewirtschaftung .....	161
<b>5</b>	<b>Kinetik mikrobieller Stoffwandlungsprozesse</b>	<b>170</b>
5.1	Nährstofftransport im Medium .....	173
5.2	Wachstum einzelliger Mikroorganismen .....	174
5.2.1	MONOD-Modell .....	176
5.2.2	Mikrobielles Wachstum mit zelltoxischen Substraten .....	179
5.3	Erhaltungsstoffwechsel von Mikroorganismen .....	181
5.4	Modell für einen kontinuierlich geführten mikrobiellen Prozess .....	184
5.5	Modell für einen kontinuierlich geführten mikrobiellen Prozess mit partieller Biomasse-Rückführung .....	187
<b>6</b>	<b>Grundtypen von Bioreaktoren und ausgewählte reaktortechnische Aspekte</b>	<b>191</b>
6.1	Bioreaktoren mit suspendierter Biomasse (Suspensionsbioreaktoren) .....	192
6.1.1	Stoffübergang in volldurchmischten Bioreaktoren .....	194
6.1.2	Sauerstoffübergangskoeffizient und O <sub>2</sub> -Bilanz in belüfteten Suspensionsbioreaktoren .....	196
6.2	Biofilm-Reaktoren .....	199
6.3	Leistungseintrag, Mischgüte und Durchströmungscharakteristik von Bioreaktoren .....	199
6.4	Probleme der Maßstabsübertragung ( <i>Scale up</i> ) bei der Bioverfahrensentwicklung .....	204

<b>7</b>	<b>Biologische Abwasserreinigung</b>	<b>207</b>
7.1	Erfassung von Abwasserinhaltsstoffen .....	210
7.2	Umweltrechtliche Anforderungen .....	225
7.3	Verfahren der Abwasserreinigung nach dem Stand der Technik und deren Einsatzgebiete .....	228
7.4	Genereller Aufbau von Kläranlagen und mechanische Vorbehandlung von Rohabwässern .....	241
7.5	Klassisches Belebungsverfahren .....	244
7.5.1	Belebtschlamm als „Reinigungsträger“ .....	247
7.5.2	Schlammalter und Schlammbelastung .....	249
7.5.3	Substratabbau und Bildung von Überschuss-Schlamm .....	251
7.5.4	Nitrifikation in Belebungsanlagen .....	253
7.5.5	Versorgung des Belebtschlammes mit Luftsauerstoff .....	254
7.5.6	Energieverbrauch und Kosten konventioneller Belebungsanlagen .....	261
7.5.7	Weitergehende Abwasserreinigung (N- und P-Elimination) .....	262
7.5.8	Umwelthygienische Risiken im Zusammenhang mit der biologischen Reinigung von kommunalem Abwasser .....	272
7.6	Hormonell wirksame Substanzen und andere organische Mikroverunreinigungen in kommunalen Abwässern .....	277
7.6.1	Wirkmuster für den Einfluss exogener Substanzen auf das endokrine System aquatischer Wirbeltiere .....	279
7.6.2	Herkunft und Wirkung von estrogen wirksamen Substanzen .....	280
7.6.3	Abbau/Elimination von estrogen wirksamen Substanzen und anderen organischen Mikroverunreinigungen in kommunalen Kläranlagen .....	286
7.7	Sonderformen und Modifikationen des Belebungsverfahrens .....	288
7.7.1	Bio-Hochreaktoren .....	289
7.7.2	A+B-Verfahren .....	290
7.7.3	SBR-Verfahren .....	290
7.7.4	Membranbelebungsverfahren .....	292
7.8	Aerobe Festbett-Verfahren .....	298
7.8.1	Tropfkörper-Anlagen .....	299
7.8.2	Scheibentauchkörper-Anlagen .....	302
7.8.3	Aerob-Anlagen mit getauchtem Festbett .....	303
7.8.4	Schwebebett-Verfahren: Moving Biofilm Bed Reactor (MBBR) .....	304
7.9	Anaerobe Verfahren der biologischen Abwasserreinigung .....	305
7.9.1	Besonderheiten der anaeroben Abwasserbehandlung .....	305
7.9.2	Gebräuchliche Reaktorsysteme .....	309
7.10	Naturnahe Verfahren der Abwasserbehandlung .....	312
7.10.1	Teichkläranlagen .....	313
7.10.2	Bewachsene Bodenfilter (Pflanzenkläranlagen) .....	314
7.11	Neue Lösungsansätze für ein nachhaltiges Wasser-/Abwassermanagement im kommunalen Bereich .....	316

## 8 Inhaltsverzeichnis

---

<b>8</b>	<b>Behandlung und Entsorgung von RohschlÄmmen aus KlÄranlagen</b>	<b>322</b>
8.1	RohschlÄmme als Senke fÄr hydrophobe organische Abwasserinhaltsstoffe und Schwermetall-Ionen .....	323
8.2	Umweltrechtliche Anforderungen an die Entsorgung von KlÄrschlÄmmen .....	325
8.3	Grundoperationen der herkömmlichen Behandlung von kommunalem Rohschlamm .....	329
8.4	Biologische Schlammstabilisierung .....	334
8.4.1	Anaerobe Stabilisierung (SchlammfÄulung) .....	335
8.4.2	Aerob-thermophile Stabilisierung .....	337
8.4.3	Schlamm-Kompostierung .....	338
8.4.4	Simultane aerobe Stabilisierung .....	339
8.4.5	EntwÄsserung und Vererdung von KlÄrschlamm in Schilfbeeten .....	339
8.5	Schlamm-Desintegration als Mittel zur Intensivierung der biologischen SchlammfÄulung .....	340
8.6	P-RÄckgewinnung aus KlÄrschlÄmmen und KlÄrschlamm-Aschen .....	343
<b>9</b>	<b>Biologische Aufbereitung von organischen Abfallstoffen aus dem hÄuslichen bzw. gewerblichen Bereich sowie von GÄlle aus der Nutztierhaltung</b>	<b>345</b>
9.1	SiedlungsabfÄlle .....	345
9.2	GÄlle aus der Nutztierhaltung .....	347
9.3	Rechtliche Anforderungen an den Umgang mit Abfallstoffen .....	348
9.3.1	Einheitliches europÄisches Abfallverzeichnis .....	350
9.3.2	Konzept der „nachsorgearmen Deponie“ .....	351
9.3.3	Verwertung von organischen Abfallstoffen als DÄnger bzw. Bodenverbesserungsmittel .....	353
9.3.4	Erzeugung von Strom aus Biomasse bzw. biogenen Abfallstoffen und das „Erneuerbare-Energien“-Gesetz (EEG) .....	355
9.4	Biologische Behandlung von getrennt erfassten BioabfÄllen .....	355
9.2.1	Kompostierung .....	357
9.2.2	VergÄrung von BioabfÄllen und energetische Nutzung des gebildeten Biogases .....	364
9.5	Biologische Trocknung von RestabfÄllen aus HausmÄll (Stabilat-Verfahren) .....	372
9.6	Verfahren zur Aufbereitung von GÄlle .....	373
9.7	Nachhaltige Abfallwirtschaft (Ausblick) .....	381
<b>10</b>	<b>Biologische Abluftreinigung</b>	<b>383</b>
10.1	Luftverunreinigende organische Stoffe und deren Erfassung .....	384
10.2	Umweltrechtliche Anforderungen .....	387
10.3	Verfahren zur Abluftreinigung nach dem Stand der Technik .....	393
10.4	Biologische Verfahren .....	396
10.4.1	BiowÄscher-Verfahren .....	396
10.4.2	Biofilter-Verfahren .....	404
10.4.3	Biorieselbett-Reaktoren .....	412
<b>11</b>	<b>Biologische Bodensanierung</b>	<b>414</b>
11.1	Altlasten-relevante Schadstoffe .....	415

11.2	Umweltrechtliche Anforderungen an die Altlastensanierung .....	422
11.3	Sanierungsrelevante Bodeneigenschaften und –parameter .....	425
11.4	Schadstoff-Wirkungspfade und Gefährdungsabschätzung .....	429
11.5	Verfahren zur Bodensanierung nach dem Stand der Technik und Kriterien der Verfahrensauswahl .....	435
11.6	Biologische Bodensanierung .....	439
11.6.1	Biologische <i>in situ</i> -Verfahren .....	440
11.6.2	Biologische <i>ex situ</i> -Verfahren .....	444
<b>12</b>	<b>Betriebstechnik und Kosten umweltbiotechnischer Verfahren sowie Regelungen für Tätigkeiten mit "Biologischen Arbeitsstoffen"</b>	<b>447</b>
12.1	Grundlagen der Steuerung und Regelung von umwelttechnischen Anlagen .....	447
12.1.1	Messtechnik und Betriebsmeseinrichtungen .....	448
12.1.2	Aufbau und Funktionsweise einer Regelung .....	453
12.1.3	Steuerung von Prozessen .....	454
12.1.4	Speicherprogrammierbare Steuerung .....	456
12.1.5	Prozessleitsystem .....	456
12.2	Ermittlung der Kosten von umweltbiotechnischen Verfahren .....	457
12.2.1	Kostenvergleichsrechnung .....	460
12.2.2	Amortisationsrechnung .....	461
12.2.3	Kapitalbarwert-Methode .....	461
12.3	Gesetzliche Regelungen für Tätigkeiten mit „Biologischen Arbeitsstoffen“ .....	462
<b>13</b>	<b>Lösungsansätze zur Vermeidung von Umweltproblemen mittels produktions- bzw. prozessintegrierter Biotechnik (Ausblick)</b>	<b>466</b>
13.1	„Dauerhaft umweltverträgliches Wirtschaften“ als Grundlage für eine zukunftsorientierte Entwicklung der menschlichen Gesellschaft (Nachhaltigkeit) .....	466
13.2	Bewertung der Umweltverträglichkeit von industriellen Prozessen und Verfahren (Ökoeffizienz-Analyse) .....	468
13.3	Grundkonzepte zur Vermeidung bzw. Verminderung von Produktionsrückständen .....	474
13.4	Verbesserte Ökobilanz von Produktionslinien durch Integration biotechnischer Prozesse und Verfahren .....	482
13.4.1	Biokatalyse in der Feinchemie und pharmazeutischen Industrie .....	482
13.4.2	Integrierte Biotechnik in der Textilindustrie .....	495
13.4.3	Einsatz von Enzymen in der Zellstoff- und Papierindustrie .....	496
13.4.4	Biotechnische Verfahren und Prozesse in der Metallbearbeitung und Leiterplattenindustrie .....	496
13.4.5	Beispiele für die Integration biotechnischer Verfahren zur Verbesserung der Ökobilanz in Betrieben der Lebensmittelindustrie .....	500
13.4.6	Recycling von Prozesswasser in Betrieben der Lebensmittel- und Getränkeindustrie .....	502
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>509</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>515</b>

# Vorwort

Erfreulicherweise hat die vor fünf Jahren erschienene 1. Auflage dieses Lehrbuchs eine sehr positive Aufnahme erfahren - verbunden mit Hinweisen von Fachkollegen auf Themen, die ihrer Meinung nach nicht gebührend berücksichtigt wurden oder gänzlich fehlten. Daher haben wir - der Eugen Ulmer Verlag und ich – auch nicht gezögert, als es um die Entscheidung für eine zweite Auflage ging. Wir haben diese “Gelegenheit“ genutzt, die kleinen Fehler (zumeist die Form betreffend) der 1. Auflage zu beseitigen. Zum anderen sind einige umweltrechtliche Bestimmungen aktualisiert worden (z.B. Wasser-Rahmenrichtlinie, Abwasserverordnung, EU-Richtlinie über die Qualität der Badegewässer) und es wurden an verschiedenen Stellen inhaltliche Erweiterungen vorgenommen.

So habe ich – den Hinweisen von Fachkollegen folgend - weitere gesetzliche Bestimmungen von Relevanz für die Umweltbiotechnik (z.B. Biostoffverordnung, Biomasse-Verordnung, Bioabfall-Verordnung) nachträglich aufgenommen, ebenso einige reaktortechnische Aspekte (Mischgüte und Methoden zur Charakterisierung des Strömungsgeschehens in Bioreaktoren; Probleme bei der Überführung umweltbiotechnischer Verfahren in den großtechnischen Maßstab; Sauerstoffversorgung von Belebungsanlagen und technische Belüftungssysteme; Durchfluss- und Füllstandsmessung), die mir aus eigener Erfahrung als wesentlich erscheinen. Erweitert wurde auch das Spektrum der erläuterten Methoden zur Schadstofffassung.

Neu aufgenommen wurden im Kapitel „Biologische Abwasserreinigung“ die Problematik der Schwermetalle und organischen Spurenverunreinigungen (z.B. estrogen wirksame Substanzen) sowie die Zusammensetzung und Behandlung von Deponiesickerwässern. Im Kontext „Hybridverfahren“ sind hier nunmehr auch verschiedene physikalisch-chemische Verfahren aufgeführt, die im Verbund mit biologischen Verfahrensstufen nachweislich zu äußerst effektiven Lösungen bei der Aufbereitung von speziell belasteten Produktionsabwässern (bis hin zu Brauchwasserqualität) führen können.

Andere, mitunter weitreichende inhaltliche Ergänzungen betreffen: (i) den Einfluss des Menschen auf das Gesamt-Ökosystem „Erde“, (ii) die Mechanismen des Ligninabbaus durch Holz- und Streu-zersetzende Pilze, (iii) die Bedeutung von Rohschlamm in Kläranlagen als Senke für hydrophobe organische Abwasserinhaltsstoffe und Schwermetall-Ionen, (iv) die Bedeutung von Desintegrationsverfahren für die Klärschlamm-Behandlung und die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm bzw. Klärschlamm-Aschen, (v) diverse Aspekte der biologischen Abfallbehandlung (darunter - Co-Fermentation, Trockenvergärung, Mikrogasturbinen zur energetischen Verwertung von Biogas), (vi) Verfahren zur Aufbereitung von Gülle aus der Nutztierhaltung.

Wesentlich mehr Platz ist nun im abschließenden Kapitel 13 den Themen „Nachhaltiges Wirtschaften“ und „Produktions- bzw. prozessintegrierte biotechnische Verfahren“ eingeräumt. An sie werden derzeit große Erwartungen im Hinblick auf die Vermeidung von Umweltproblemen geknüpft.

Meinen ehemaligen „Mitreitern“ Alexander Herrmann und Thilo Britz, die längst ihre Arbeiten zur Promotion in unserem Institut abgeschlossen und in der Industrie Fuß gefasst haben, danke ich an dieser Stelle nochmals für ihre Unterstützung bei der Realisierung der ersten Ausgabe dieses Lehrbuchs.

Nicht zuletzt gilt mein Dank dem Eugen Ulmer Verlag, dem es auch diesmal wieder gelungen ist, ein sehr ansprechendes Buch zu produzieren.

# Vorwort zur 1. Auflage

Das vorliegende Buch basiert auf Manuskripten für eine Reihe von Spezialvorlesungen, die von mir während der letzten 10 Jahre zu den Themenkomplexen „Umweltmikrobiologie“ und „Umweltbiotechnik“ vor Studenten unterschiedlicher naturwissenschaftlicher Fachbereiche an den Universitäten in Stuttgart, Saarbrücken bzw. Trier gehalten wurden.

Es wendet sich vornehmlich an Hochschulstudenten mit der Fach- bzw. Vertiefungsrichtung „Umweltschutztechnik“, „(Bio-)Verfahrenstechnik“, „Technische (Bio-)Chemie“ oder „Ökotechnologie“ (bzw. anderer angewandter Umweltwissenschaften), die sich dafür interessieren, wie mikrobielle Stoffwandlungsprozesse zur Lösung aktueller Umweltprobleme genutzt und in technische Verfahren und Anlagen überführt werden können, oder die ihre Vorkenntnisse auf diesem Gebiet abrunden möchten.

Mein Hauptanliegen war es, den Studierenden an die wesentlichen Fakten und Zusammenhänge heranzuführen, ohne deren Kenntnis ein Grundverständnis von umweltbiotechnischen Prozessen und Verfahren ebenso unmöglich ist wie die zielgerichtete praktische Arbeit auf dem Gebiet der Umweltbiotechnik. Dazu gehören nicht zuletzt verschiedene Rahmenbedingungen (umweltrechtliche Anforderungen, betriebswirtschaftliche Aspekte, konkurrierende umwelttechnische Verfahren), an denen sich die Umweltbiotechnik ausrichten muss. Um den umfangreichen Stoff „erlernbar“ zu machen, habe ich versucht, möglichst systematisch und anschaulich vorzugehen und mich auf das Wesentliche zu beschränken. Hierzu bedurfte es gewisser Verallgemeinerungen und des „Mutes zur Lücke“.

So bin ich beispielsweise auf die Biochemie einzelner mikrobieller Abbaupfade ebenso wenig eingegangen wie auf die Biosyntheseprozesse in den Mikroorganismen, die molekularbiologischen Vorgänge bei der Stoffwechselregulation auf genetischer Ebene sowie auf die Wechselwirkung von Mikroorganismen mit (Schwer-)Metallen. Auch sind viele der reaktortechnischen Aspekte (Strömungsverhalten, Leistungseintrag, Wärmeübergang) von mir nur angerissen worden. Leser, die tiefer in diese Wissensbereiche eindringen wollen, möchte ich an dieser Stelle auf entsprechende weiterführende Fachliteratur (siehe z.B. Literaturverzeichnis im Anhang) verweisen.

Trotzdem hoffe ich, dass das vorliegende Buch Anklang nicht nur bei den Studenten findet, sondern auch bei denen, die das Fach „Umweltbiotechnik“ in der Lehre oder Praxis vertreten.

Für die Mitwirkung am vorliegenden Buch danke ich meinen Mitarbeitern Herrn Dipl.-Biol. **Alexander P. Herrmann** (vor allem für das zeitraubende Zusammenfügen der einzelnen Textabschnitte in das geforderte Format und die Anfertigung einiger Abbildungen) und Herrn Dipl.-Ing. **Thilo Britz** (für die Mitwirkung bei der Erstellung der Abschnitte 5.1, 6.4.4, 6.4.6, 6.6.2 und 11.1). Durch ihre ständige Diskussionsbereitschaft und viele wertvolle Hinweise haben beide maßgeblichen Anteil daran, dass die Endfassung des Buches nach nunmehr einem Jahr „harter Wochenendarbeit“ endlich vorliegt.

Mein Dank gilt des Weiteren dem Verlag Eugen Ulmer (und hier ganz besonders Frau Dr. N. Kneissler) für die gute Zusammenarbeit.

Die Schlußfolgerungen ... sind beunruhigend. Sie deuten ... auf ein Potential globaler Probleme von alarmierendem Ausmaß. Der Druck auf Umwelt und Ressourcen sowie der Bevölkerungsdruck verstärken sich und werden die Qualität menschlichen Lebens auf diesem Planeten zunehmend beeinflussen.

...

Wenn die Trends verändert und die Probleme verringert werden sollen, werden weltweit mutige und entschlossene neue Initiativen erforderlich sein, um die Bedürfnisse der Menschen zu befriedigen, und gleichzeitig muß die Fähigkeit der Erde, Leben zu ermöglichen, geschützt und wiederhergestellt werden. Grundlegende natürliche Ressourcen - Agrarland, Fischgründe, Wälder, mineralische Rohstoffe, Energie, Luft und Wasser - müssen erhalten und der Umgang mit ihnen verbessert werden. Eine weltweite Veränderung der Politik ist erforderlich, bevor sich die Probleme weiter verschlimmern und die Möglichkeiten für wirkungsvolles Handeln immer stärker eingeschränkt werden.

...

Angesichts der Dringlichkeit, Reichweite und Komplexität der vor uns liegenden Herausforderungen bleiben die jetzt auf der ganzen Welt in Gang gekommenen Anstrengungen allerdings weit hinter dem zurück, was erforderlich ist. Es muß eine neue Ära der globalen Zusammenarbeit und der gegenseitigen Verpflichtung beginnen, wie sie in der Geschichte ohne Beispiel ist.

**Aus dem Begleitschreiben der Herausgeber zu  
„Global 2000 Report to the President“  
(Deutsche Ausgabe von 1980)**

Lassen sich ganze Nationen in nachhaltige Gesellschaften überführen? Solch ein Wandel wäre nur vergleichbar mit zwei anderen Wandlungsperioden in der Menschheitsgeschichte: der Landwirtschaftlichen Revolution gegen Ende der Jungsteinzeit und der Industriellen Revolution in den letzten zwei Jahrhunderten. Sie entstanden spontan, verliefen moderat und wurden den Menschen sicherlich nicht durchweg bewußt. Die nächste Wandlungsperiode jedoch muß ein ganz bewußter Vorgang sein, vom besten geleitet, das Wissenschaft heute bereithält ... Wenn es tatsächlich soweit kommt, wird dies ein bislang einzigartiges Unternehmen in der Menschheitsgeschichte sein.

**aus:** William D. Ruckelshaus  
„Toward a Sustainable World“  
(Scientific American, Sept. 1989, S. 167)

## Kapitel 1

# Biologische Stoffwandlung als eine der Grundoperationen im technischen Umweltschutz (Einführung)

Umweltschäden überall: Ozonlöcher über den Erdpolen, großflächige Abholzung tropischer Regenwälder und Vernichtung von Trockenrasen-Standorten, irreversibles Eindringen von Giften in die natürlichen Stoffkreisläufe und Nahrungsketten, Nitrierung des Grundwassers, Waldsterben, Klimaveränderungen und Umweltkatastrophen. Dies sind nur einige der offensichtlichen Folgen von fortschreitender Industrialisierung, Zersiedlung der Landschaft, extrem intensivierter Landwirtschaft und dem Anstieg der Weltbevölkerung, welche zunehmend den Charakter der heutigen menschlichen Zivilisation prägen (siehe hierzu auch → *Kapitel 4*).

Obwohl inzwischen vor allem in den entwickelten Industriestaaten von Gesetzgeberseite her große Anstrengungen unternommen werden, um dem **Raubbau an der Natur** Einhalt zu gebieten, stellt sich die momentane Situation unserer Umwelt nach wie vor dramatisch genug dar - denn täglich und weltweit ...

... wird die Erdatmosphäre zusätzlich durch ca. 60 Mio. t CO<sub>2</sub> belastet !

... werden ca. 55.000 ha tropischen Regenwaldes vernichtet !

... werden ca. 20.000 ha fruchtbaren Ackerlandes zerstört !

... sterben 100 bis 200 Tier- bzw. Pflanzenarten aus !

Angesichts dieser Fakten schätzte das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 1997 in einer offiziellen Erklärung ein, dass „*menschliches Leben und Wirtschaften an einem Punkt angelangt ist, an dem es Gefahr läuft, sich seiner eigenen natürlichen Grundlagen zu berauben*“.

**Wirksamer Umweltschutz** bedeutet vor allem:

- Schutz der natürlichen Umwelt vor Gefahrstoffen
- Umweltverträgliche Abfallentsorgung
- Minimierung der Entnahme von nicht erneuerbaren Rohstoffen aus der natürlichen Umwelt

Wie die o.g. Fakten und Zahlen verdeutlichen, besteht auf diesem Gebiet weltweit ein enormer Handlungsbedarf. Problemlösungen führen zu Märkten, und der Umweltschutz ist heute einer der dynamischsten Wachstumsmärkte. Es besteht kein Zweifel, dass die Nachfrage nach umweltverträglichen Verfahren, Technologien und Produkten weiter zunehmen wird.

Zur Entlastung der natürlichen Umwelt werden in zunehmendem Maße auch biologische Stoffwandlungsprozesse eingesetzt und ständig weiterentwickelt. Im Ergebnis dessen hat sich die **Umweltbiotechnik als ingenieurtechnische Fachrichtung** herausgebildet. Sie beschäftigt sich mit der Entwicklung und dem technischen Einsatz biologischer Verfahren zum vorbeugenden Schutz der natürlichen Umwelt (**Prävention**) bzw. zu deren Wiederherstellung (**Sanierung**).

Die Anfänge der Umweltbiotechnik reichen zurück bis an das Ende des 19. Jahrhunderts. Zu diesem Zeitpunkt wurde in England und Deutschland damit begonnen, die **biologische**

## 14 Biologische Stoffwandlung im technischen Umweltschutz ( Einführung )

---

**Abwasserreinigung** einzuführen. Diese ist bis heute eines der wichtigsten Arbeitsfelder der Umweltbiotechnik (→ *Kapitel 7*).

Noch viel älter ist die vom Menschen praktizierte **Kompostierung bzw. Vergärung von organischen Feststoff-Abfällen**. Diese biologische Art der Abfallbehandlung wurde allerdings erst in jüngerer Zeit in effiziente, großtechnische Verfahren und Anlagen umgesetzt (→ *Kapitel 9*).

Seit den 70-er Jahren werden biologische Stoffwandlungsprozesse auch gezielt zur Reinigung von belasteten Böden und Grundwässern eingesetzt. Diese mit dem Begriff **Altlastensanierung** verbundenen Verfahren (→ *Kapitel 11*) haben wesentlich zum heutigen Ansehen der Umweltbiotechnik in der breiten Öffentlichkeit beigetragen.

Etwa im gleichen Zeitraum nahm auch die **biologische Abluftreinigung** einen enormen technischen Aufschwung. Heute stehen für dieses Teilgebiet unterschiedliche Bioreaktor-Systeme zur Verfügung, mit denen gasförmige Schad- und Geruchsstoffe bei hohem Wirkungsgrad aus Abluftströmen eliminiert werden können (→ *Kapitel 10*).

Der Entwicklung von effizienten Systemen zur energetischen Nutzung von Biogas ist es zu verdanken, dass die **Anaerobtechnik** gegenwärtig einen großen Aufschwung in der biologischen Abwasser- und Abfallbehandlung erlebt (→ *Kapitel 7 und 9*).

Neben diesen klassischen Anwendungsfeldern der Umweltbiotechnik gibt es aber inzwischen auch sehr vielversprechende Ansätze zur Integration biologischer Stoffwandlungsprozesse in bestehende Produktionslinien und –prozesse (**Integrierte Biotechnik**). Sie verfolgen das Ziel, durch Kreislaufführung bzw. Mehrfachnutzung von Hilfsstoffen und/oder Prozesswässern sowie durch stoffliche Verwertung von Reststoffen im industriellen Sektor künftig den Verbrauch an natürlichen Ressourcen zu senken und den Ausstoß von umweltbelastenden Abfallstoffen drastisch zu reduzieren (→ *Kapitel 13*).

### 1.1 Grundoperationen der Verfahrenstechnik und Besonderheiten der biologischen Stoffwandlung

Die großen Fortschritte der menschlichen Zivilisation in den letzten beiden Jahrhunderten sind untrennbar mit den Entwicklungen auf dem Gebiet der **Verfahrenstechnik** verbunden. Diese ingenieurwissenschaftliche Disziplin hat entscheidend dazu beigetragen, dass heute für die unterschiedlichsten Aufgabenstellungen - nicht nur im Bereich der industriellen Produktion - eine ganze Reihe sogenannter **verfahrenstechnischer Grundoperationen** (engl. **unit operations**) zur Verfügung stehen.

Besondere Bedeutung für den technischen Umweltschutz haben die Verfahren zur Trennung von Stoffgemischen bzw. zur Umwandlung oder Immobilisierung von Stoffen. Die wichtigsten Grundoperationen (einschließlich der biologischen Stoffwandlung) auf diesem Sektor sind in *Tabelle 1-1* zusammengestellt.

Mit biologischen Stoffwandlungsprozessen befasst sich die **Biotechnologie**. Sie ist eine anwendungsorientierte Wissenschaft der Mikrobiologie und Biochemie und steht in sehr enger Verbindung mit der technischen Chemie und der Verfahrenstechnik. Bei den von ihr untersuchten biochemischen Reaktionen werden als Leistungsträger entweder lebende Zellen (Mikroorganismen oder Zellen bzw. Zellgewebe von Pflanzen oder Tieren) eingesetzt oder aber Enzyme bzw. andere Bestandteile aus diesen Zellen.

**Tabelle 1-1:** Übersicht über Verfahren zur Trennung von Stoffgemischen bzw. zur Stoffwandlung oder –immobilisierung (nach THOME-KOZMIENSKY 1995)

Verfahrenstyp	Verfahren
<b>Thermische Verfahren</b>	Verbrennung <i>(chem.)</i> Vergasung (Pyrolyse) <i>(chem.)</i> Verdampfen / Trocknen <i>(physikal.)</i> Kristallisation <i>(physikal.)</i> Destillation / Rektifikation <i>(physikal.)</i>
<b>Physikalische Trennverfahren</b>	Sedimentation / Zentrifugation Flotation Adsorption Absorption / Extraktion Desorption (Strippen) Filtration Membranfiltration Elektrolyse Dialyse Elektrodialyse
<b>Chemische Verfahren der Stoffwandlung bzw. -trennung</b>	Flockung / Fällung Spaltung von Emulsionen Neutralisation Ionenaustausch Oxidation / Reduktion (Elektro-)Dehalogenierung
<b>Biologische Stoffwandlung</b> (Biokonversion)	Aerobe Verfahren Anaerobe Verfahren

Eine biochemische Stoffwandlung (**Biokonversion**) lässt sich formal wie folgt darstellen:



Jede biochemische Stoffumwandlung weist eine spezifische Reaktionskinetik auf (→ *Kapitel 5*). Sind die entsprechenden kinetischen Kenngrößen einmal bekannt, so kann der jeweilige Biokonversionsprozess in Anlagentechnik übertragen und in den großtechnischen Maßstab überführt werden (analog zur Vorgehensweise in der chemischen Verfahrenstechnik).

Die Umweltbiotechnik ist ein Teilgebiet der Biotechnologie. Biotechnische Verfahren, die zur Abwasserreinigung, Abfallbehandlung, Boden sanierung bzw. Abluftreinigung eingesetzt werden (sogenannte **Graue Biotechnologie**), nutzen als Leistungsträger meist lebende (d.h. sich vermehrende) Mikroorganismen oder deren Enzyme als erneuerbare Biokatalysatoren.

## 16 Biologische Stoffwandlung im technischen Umweltschutz ( Einführung )

---

Von alternativen (z.B. thermischen oder chemischen) Verfahren unterscheiden sie sich darüber hinaus durch folgende vorteilhafte Merkmale:

- sie kommen ohne extreme Temperaturen und Drücke aus (*geringer Energiebedarf*)
- sie benötigen i.a. keine Hilfsstoffe (*minimaler Chemikalienverbrauch*)
- sie verursachen i.d.R. keinen sekundären Schadstoff-Ausstoß (d.h. *Problemlösung statt Problemverlagerung*)

Daraus lässt sich bereits ableiten, dass umweltbiotechnische Verfahren im allgemeinen umweltverträglich und vergleichsweise kostengünstig sind. Da sie in den o.g. klassischen Anwendungsfeldern hauptsächlich zur Aufbereitung von Restströmen bzw. Abfallstoffen eingesetzt werden, zählt man sie zu den **nachsorgenden Umwelttechnologien** (engl. **end-of-the-pipe technologies**, Kurzform **EOP**). Dieser Begriff grenzt sie z.B. von solchen Trennverfahren ab, mit deren Hilfe in einem laufenden Produktionsprozess bestimmte Roh- oder Hilfsstoffe „unterwegs“ zurückgewonnen werden können und somit gar nicht erst als „Entsorgungsgut“ anfallen.

Doch schon seit längerem zeichnet sich eine nächste Generation von umweltbiotechnischen Verfahren deutlich ab. Im Unterschied zu den klassischen Verfahren setzen diese neuerdings an den Quellen der Entstehung von Abfallstoffen an (**dezentrale Abwasser-** bzw. **Abfallbehandlung**) und werden nach Möglichkeit sogar direkt in bestehende Produktionslinien integriert (**Prozess-** bzw. **Produktionsintegrierter Umweltschutz** – Kurzform **PIUS**). Ihr dortiger Einsatz ist darauf ausgerichtet, umweltbelastende chemische Teilprozesse durch umweltverträgliche biologische Stoffwandlungen abzulösen bzw. bestimmte Reststoffe in wiederverwertbare Sekundärprodukte oder Massenrohstoffe umzuwandeln (→ *Kapitel 13*).

Selbst mit Hilfe von PIUS-Maßnahmen ist die Forderung nach völliger Reststoff-Freiheit bei der Produktion unter großtechnischen Bedingungen nicht zu erfüllen. Es sei an dieser Stelle ausdrücklich angemerkt, dass es die „rückstands- und abfallfreie Produktion“ nicht geben kann (genauso wenig, wie der Mensch selbst mit seinem natürlichen Stoffwechsel ohne gewisse „Rückstände“ nicht auskommt). Deshalb wird man auch künftig nicht auf die nachsorgenden Umwelttechnologien verzichten können.

Bei allen Maßnahmen, die im Hinblick auf einen wirksamen Schutz der natürlichen Umwelt notwendig erscheinen, darf jedoch eines nie vergessen werden: In der Weltwirtschaft gibt es keinen Bonus für eine gute Absicht. Trotz seiner gebotenen Dringlichkeit aus Sicht der Ökologie muss sich daher auch der Umweltschutz stets an dem wirtschaftlich Machbaren orientieren, d.h. an dem, was sich unter dem Preisdruck im internationalen Wettbewerb noch durchsetzen lässt. Produktionsanlagen, die durch einen hohen Umweltschutz-Aufwand unrentabel sind, müssten letztlich abgeschaltet werden, was zwangsläufig mit unerwünschten sozialen Folgen verbunden wäre.

### 1.2 Bioreaktoren als technische Ökosysteme

Umweltbiotechnische Verfahren funktionieren grundsätzlich nach dem Vorbild der Natur. Sie basieren auf Prozessen, die in den natürlichen Ökosystemen auch ohne das Zutun des Menschen ablaufen (→ *Abschnitte 3.3 bis 3.7*). Der Verfahrenstechniker hat dabei „lediglich“ für die entsprechenden technischen Randbedingungen zu sorgen, damit der angestrebte Prozess mit möglichst hoher Rate und Ausbeute und auf möglichst kleinem Raum

abläuft. Vorbedingung für alle biologischen Verfahren zur Elimination von umweltbelastenden oder -gefährdenden Stoffen sind ein ausreichendes Nährstoffangebot und günstige Milieubedingungen, damit sich die am jeweiligen Reinigungsprozess beteiligten Mikroorganismen optimal entwickeln können.

Kernstück umweltbiotechnischer Verfahren ist der **Bioreaktor**. Er fungiert als Lebensraum für die Mikroorganismen als Leistungsträger, welche mit Hilfe ihres Stoffwechsels bestimmte Substrate in gewünschter Weise umwandeln und somit für den Bioverfahrenstechniker die eigentlichen „Werkzeuge“ darstellen. Da es sich hierbei meist um Lebensgemeinschaften von sehr unterschiedlichen Mikrobenarten handelt, die vielfältigen technischen Einflüssen unterworfen sind, ist es durchaus angebracht, Bioreaktoren als technische Ökosysteme zu bezeichnen (zum Begriff Ökosystem siehe → *Abschnitt 3.1*).

Kennzeichnend für Mikroorganismen sind ihre **geringe Zelldimension** sowie ihre **Lebensweise als Einzeller** (bzw. als Organismen, die aus wenigen Zellen bestehen). Die geringen Abmessungen der Mikroorganismen (→ *Abschnitt 2.1*) bedingen ein sehr hohes Verhältnis von Zelloberfläche zu Zellvolumen und damit intensivste Wechselwirkungen mit der äußeren Umgebung. Zusammen mit den vergleichsweise geringen Transportwegen in der Mikrobenzelle führt dies zu **hohen spezifischen Stoffwechselraten** (bezogen auf die Biomasse), die um Größenordnungen über denen von pflanzlichen und tierischen Zellen liegen.

Grundsätzlich können aus einem Fluidstrom (z.B. Abwasser oder Abluft) nur solche Substanzen mikrobiell eliminiert bzw. umgewandelt werden, die in irgendeiner Weise Nährstoffcharakter für die beteiligten Organismen haben – sei es, dass sie von ihnen zum Aufbau körpereigener Substanz und/oder zur Energiegewinnung genutzt werden können oder aber zumindest derartigen Substanzen strukturell ähneln.

Die Höhe der spezifischen Stoffumsatzrate hängt entscheidend vom wachstumsphysiologischen Zustand der Mikrobenzellen ab. Gewöhnlich treten die höchsten Raten dann auf, wenn sich die Mikroorganismen optimal vermehren. Dazu müssen jedoch neben dem Zielsubstrat auch alle anderen für das Wachstum erforderlichen Nährstoffe in ausreichender Menge vorliegen. Andererseits fällt dabei überschüssige Biomasse an, die i.d.R. nachträglich aus dem System entfernt werden muss und wiederum Abfall darstellt, der zu entsorgen ist.

Bauform und Betriebsweise des Bioreaktors richten sich nach dem jeweiligen Einsatzbereich und müssen die spezifischen Anforderungen des verwendeten biologischen Systems berücksichtigen (→ *Kapitel 6*). Dies betrifft insbesondere (*i*) die Milieubedingungen (z.B. Temperatur, pH-Wert, Sauerstoffkonzentration) und (*ii*) die Art und Konzentration der Nährstoffe.

Biologische Stoffwandlungsprozesse sind i.d.R. an die wässrige Phase gebunden. Zu den Aufgaben, die ein Bioreaktor im allgemeinen zu erfüllen hat, gehören daher:

- **Durchmischen / Homogenisieren** des Reaktorinhalts (für den optimalen Stofftransport innerhalb der Flüssigphase) → *Abschnitte 6.1.1* und *6.3*
- **Zerteilen unterschiedlicher Phasen** (z.B. Dispergieren von Luft als zweiter Phase zur Schaffung großer Phasengrenzflächen für einen guten Sauerstoffeintrag in die Flüssigphase) → *Abschnitte 6.1.1, 6.1.2* und *7.5.5*
- **Wärmetransport** (d.h. Abführen der Reaktionswärme sowie derjenigen Wärme, die im Reaktionsmedium beim Durchmischen mit mechanisch bewegten Einbauten erzeugt wird)

## 18 Biologische Stoffwandlung im technischen Umweltschutz ( Einführung )

**Tabelle 1-2:** Wichtige Kenngrößen von umweltbiotechnischen Anlagen und Verfahren

Auslegungsgrößen	Stellgrößen	Zustandsgrößen	Zielgrößen (Beispiele)
<b>Reaktor</b> (Typ und Abmessungen)		<b>Flüssigphase:</b> Temperatur, Viskosität, pH, Eh, pO <sub>2</sub> , pH <sub>2</sub> , pCO <sub>2</sub> , elektr. Leitfähigkeit, Größe der Gasblasen, Stoffkonzentrationen (Biomasse, Substrat, Produkt)	Hoher Wirkungsgrad → Einhaltung von Grenzwerten für die zulässige Umweltbelastung +
<b>Beschickungs- bzw. Dosierpumpen</b> (Art / Kapazität)	Durchflussrate Dosagen	Volumen- / Masseströme → Nährstoffe (z.B. N, P oder Spurenelemente)	Hohe Raum-Zeit-Ausbeute +
<b>Rührersystem</b> (Art / Kapazität)	Drehzahl (Rührer)		Gewinnung von heizwertreichem Biogas +
<b>Belüftungssystem</b> (Art / Kapazität)	Belüftungsrate und ggf. Druck	<b>Gasphase:</b> Temperatur, pO <sub>2</sub> , pCO <sub>2</sub> , Stoffkonzentrationen (flüchtige organ. Substanzen)	Gewinnung von Stoffwechsel(end)produkten +
<b>Heizung / Kühlung</b>	Temperatur und ggf. Druck		Minimaler Energieverbrauch Minimale Abfallmengen → minimale Betriebskosten +
<b>Fest-flüssig-Separator</b> (Art / Kapazität) zur Biomasse-Abtrennung u. ggf. -Rückführung oder <b>Aufwuchsträger</b> (Art u. Menge) zur Biomasse-Rückhaltung		<b>Feststoffphase:</b> Biomasse (lebend / tot): Trocken substanz / organische Trockensubstanz Proteine Enzyme / Coenzyme Lipide DNA / RNA	Gewinnung von Brauchwasser aus organisch belastetem Schmutzwasser
Raum-, Flächen- bzw. Schlammbelastung			

Hierfür bieten sich verschiedene technische Varianten an (→ *Kapitel 6* und *Abschnitt 7.5.5*). Neben der Apparate- und Maschinenteknik ist auch eine geeignete Prozess-Steuerung und -regelung erforderlich, um jederzeit für das angestrebte Prozessziel die günstigsten Maßnahmen treffen zu können (→ *Abschnitt 12.1*).

Einen Überblick über die verschiedenartigen Kenngrößen umweltbiotechnischer Anlagen und Verfahren liefert die Zusammenstellung in *Tabelle 1-2*.

Zu den Grundgrößen in der Umwelttechnik gehören die **Stoffkonzentration**  $c_S$  (in g/l bzw. kg/m<sup>3</sup>) und die **Stoff-Fracht** (als die pro Zeiteinheit anfallende und aufzubereitende Stoffmenge; Symbol:  $\dot{m}_S$  für Massestrom). Sie sind über die **Fließrate** (Volumenstrom des jeweiligen Fluids in m<sup>3</sup>/h oder m<sup>3</sup>/d) miteinander gekoppelt:

$$\dot{m}_S = c_S \cdot \dot{V}_{Fluid} \quad (Gl. 1-1)$$

Zwischen beiden Größen besteht ein sehr wesentlicher Unterschied: Während die Konzentration eines Schadstoffes durch Verdünnung (z.B. mit Wasser) nahezu beliebig abgesenkt werden kann, bleibt die jeweilige Fracht auch trotz Verdünnung konstant (→ Kapitel 5). Abgesehen vom grundsätzlichen Verdünnungsverbot, erfolgt daher im Umweltrecht die Festlegung stoffbezogener Emissionsgrenzwerte (→ Abschnitt 1.3) stets sowohl für die Konzentration als auch für die Fracht.

Zur Charakterisierung der Leistungsfähigkeit umweltbiotechnischer Anlagen und Verfahren verwendet man allgemein die drei nachfolgend beschriebenen Kenngrößen:

- **Wirkungsgrad** (Symbol  $\eta$ , Einheit: dimensionslos oder %) - gibt den mit einer Aufbereitungsanlage erreichbaren Grad der Elimination für ein bestimmtes Zielsubstrat an:

$$\eta [-] = \frac{c_S^{ein} - c_S^{aus}}{c_S^{ein}} = 1 - \left( \frac{c_S^{aus}}{c_S^{ein}} \right) \quad \text{bzw.} \quad \eta [\%] = \frac{c_S^{ein} - c_S^{aus}}{c_S^{ein}} \cdot 100 \quad (Gl. 1-2)$$

- mit  $c_S^{ein}$  Konzentration des zu eliminierenden Stoffes bzw. Stoffgemisches (in g/l oder kg/m<sup>3</sup>) im unbehandelten Stoffstrom (Ausgangskonzentration)  
 $c_S^{aus}$  Austrittskonzentration des jeweiligen Stoffes bzw. Stoffgemisches (in g/l oder kg/m<sup>3</sup>) nach erfolgter biologischer Behandlung

- **Raumbelastung** [Symbol  $B_R$  oder auch  $B_V$ ; gebräuchliche Einheiten: kg/(m<sup>3</sup><sub>R</sub> · h) oder kg/(m<sup>3</sup><sub>R</sub> · d)] – gibt diejenige Stoffmasse an, mit welcher 1 m<sup>3</sup> Reaktorvolumen pro Zeiteinheit beaufschlagt wird:

$$B_R = \frac{\dot{m}_S}{V_R} = \frac{c_S^{ein} \cdot \dot{V}^{Zulauf}}{V_R} \quad (Gl. 1-3)$$

- mit  $\dot{V}^{Zulauf}$  Fließrate (Volumenstrom in m<sup>3</sup>/h oder m<sup>3</sup>/d) des aufzubereitenden Fluids (z.B. Abwasser, Abluft)  
 $V_R$  Arbeitsvolumen des Bioreaktors (in m<sup>3</sup>)

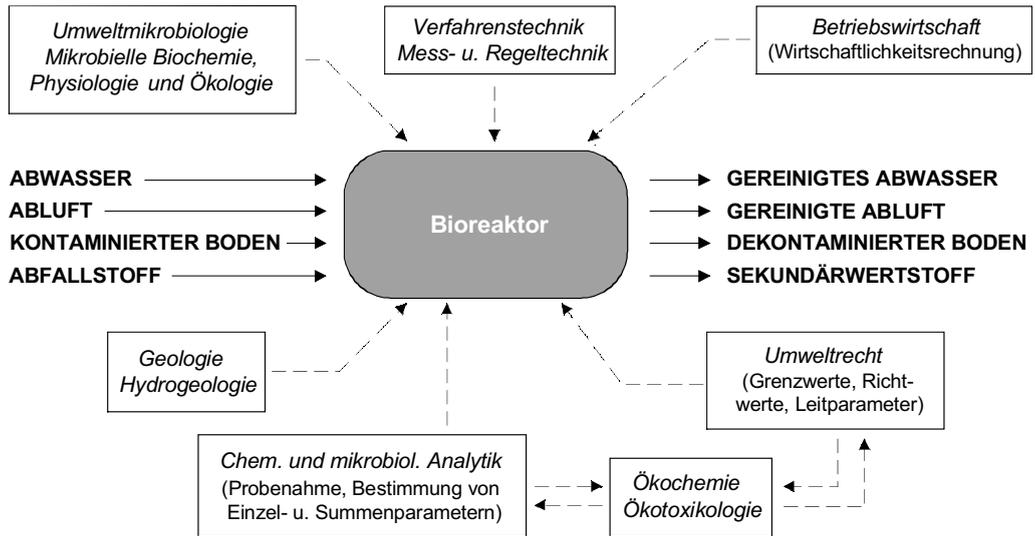
- **Raum-Zeit-Ausbeute** [Kurzform **RZA**; gebräuchliche Einheiten: kg/(m<sup>3</sup><sub>R</sub> · h) oder kg/(m<sup>3</sup><sub>R</sub> · d)] - gibt diejenige Stoffmasse an, die pro Zeiteinheit in 1 m<sup>3</sup> Reaktorvolumen umgesetzt bzw. eliminiert wird:

$$RZA = B_R \cdot \eta = \frac{(c_S^{ein} - c_S^{aus})}{V_R} \cdot \dot{V}^{Zulauf} \quad (Gl. 1-4)$$

Wie dem *Bild 1-1* zu entnehmen ist, bedarf es bei der Entwicklung und Optimierung umweltbiotechnischer Verfahren der engen Zusammenarbeit von Fachleuten aus sehr unterschiedlichen Wissensgebieten. Ausgehend von einer konkreten Problemstellung und/oder einer **Ist-Analyse** (Identifizieren möglicher Schwachstellen von bereits existierenden Verfahren und Ableiten des entsprechenden Bedarfs an Forschung und Entwicklung) sind dabei typischerweise folgende Arbeitsschritte zu leisten:

1. Definieren der **Zielgrößen** (sowohl in qualitativer als auch quantitativer Hinsicht)
2. Auffinden eines **geeigneten mikrobiellen Systems** zum Erreichen der Zielgrößen

## 20 Biologische Stoffwandlung im technischen Umweltschutz ( Einführung )



**Bild 1-1:** Umweltbiotechnik (mit dem Bioreaktor als Kernstück) und wichtige Randgebiete

3. Ermittlung der Milieuanforderungen und kinetischen Grundgrößen des ausgewählten mikrobiellen Systems und Nachweis der Effizienz sowie der technischen Realisierbarkeit des Prozesses im Labor- bzw. Technikumsmaßstab (**Machbarkeitsstudie**)
4. Definieren der prozessbestimmenden **Zustandsgrößen** und Ableitung der erforderlichen reaktor- und maschinentechnischen Kenngrößen (**Auslegungsgrößen**)
5. Festlegen der **Stellgrößen** und Erarbeitung geeigneter **Strategien zur Prozess-Steuerung und -Regelung**

Den Abschluss der Verfahrensentwicklung bilden üblicherweise die Erprobung und Optimierung des Verfahrens im halbtechnischen Maßstab vor Ort mit einer sogenannten Pilotanlage (**Pilotierung**) und die **Wirtschaftlichkeitsanalyse** (einschließlich des Vergleichs mit alternativen Verfahren).

Die Wirtschaftlichkeit steht bei der Verfahrensentwicklung als Zielgröße an oberer Stelle. Biologische Verfahren im technischen Umweltschutz stehen stets im Wettbewerb mit alternativen Verfahren physikalischer, chemischer und ggf. thermischer Art. Den Ausschlag dafür, welcher dieser Technologien im Einzelfall schließlich der Vorzug gegeben wird, hängt nicht zuletzt von den Kosten ab, die mit der Anschaffung und dem Betrieb der entsprechenden Anlagen verbunden sind (→ *Abschnitt 12.2*).

Für berufliche Tätigkeiten, bei denen die Arbeitnehmer mit Mikroorganismen oder anderen biologischen Agenzien in direkten Kontakt kommen (bzw. kommen können), welche beim Menschen Infektionen oder toxische Wirkungen hervorrufen (bzw. hervorrufen können), gelten die Regelungen und Vorschriften der **Biostoffverordnung** (Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen; Kurzform **BioStoffV**). Zum Schutz der Gesundheit von unmittelbar betroffenen Arbeitnehmern sind hier spezielle Sicherheitsvorkehrungen zu treffen, auf die ausführlicher in → *Abschnitt 12.3* eingegangen wird.

### 1.3 Umweltrechtliche Anforderungen als Zielgrößen für die Entwicklung und den Einsatz umwelttechnischer Verfahren

Umweltschutzmaßnahmen dienen dem Ziel, die Lebensqualität unserer Umwelt zu erhalten bzw. zu verbessern. In der „freien Marktwirtschaft“ stellt sich ein hinreichender Umweltschutz naturgemäß nicht von selbst ein. Um gegenüber der Konkurrenz bestehen zu können, sind die Unternehmen vielmehr bestrebt, die Kosten zur Behebung von Umweltschäden aus industrieller Produktion nach Möglichkeit auf die Allgemeinheit abzuwälzen (**Externalisierung der Kosten für Umweltschutzmaßnahmen**). Dieser Markt-Logik folgend wurden Aufwendungen für Umweltschutzmaßnahmen lange Zeit als externe (Folge-)Kosten betrachtet, die außerhalb der Unternehmen entstehen und nicht in deren Rentabilitäts-erwägungen eingehen.

Von einzelnen Wissenschaftlern erstmals öffentlich thematisiert wurde der Gegensatz von endloser wirtschaftlicher Akkumulation und der Begrenztheit der natürlichen Ressourcen Ende der 60-er bzw. Anfang der 70-er Jahre. Aufmerksam auf den globalen Aspekt von Umweltgefährdungen und Umweltschutz machte die in dieser Zeit publizierte Studie des **Club of Rome** mit dem Titel „*Die Grenzen des Wachstums*“.

In der Bundesrepublik Deutschland verpflichtet das geltende Grundgesetz zwar den Staat zum Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen, jedoch enthält es kein besonderes Umweltgrundrecht des einzelnen Bürgers. Das Umweltrecht als eigenständiges Rechtsgebiet entwickelte sich hier erst, nachdem sich Ende der 60-er Jahre die allgemeine Erkenntnis durchgesetzt hatte, dass der bis dahin praktizierte industrielle Raubbau an der Natur bereits zu schwerwiegenden Schäden in Boden, Atmosphäre und Wasser als den elementaren Lebensgrundlagen geführt hat und die Unternehmen als Verursacher von Umweltschäden nur durch Recht und Gesetz zu entsprechenden umweltschützenden Maßnahmen gezwungen werden können.

Staatliche Zielvorstellungen zum Schutz der natürlichen Umwelt tauchen offiziell erstmals im Umweltprogramm der Bundesregierung von 1971 auf. Sie beinhalten (i) die Sicherung einer gesunden Umwelt, (ii) den Schutz der Umweltmedien (Boden, Wasser, Luft, Tier- und Pflanzenwelt) vor nachteiligen Eingriffen durch den Menschen, und (iii) die Beseitigung von Schäden oder Nachteilen, die durch menschliche Eingriffe in die Natur entstanden sind.

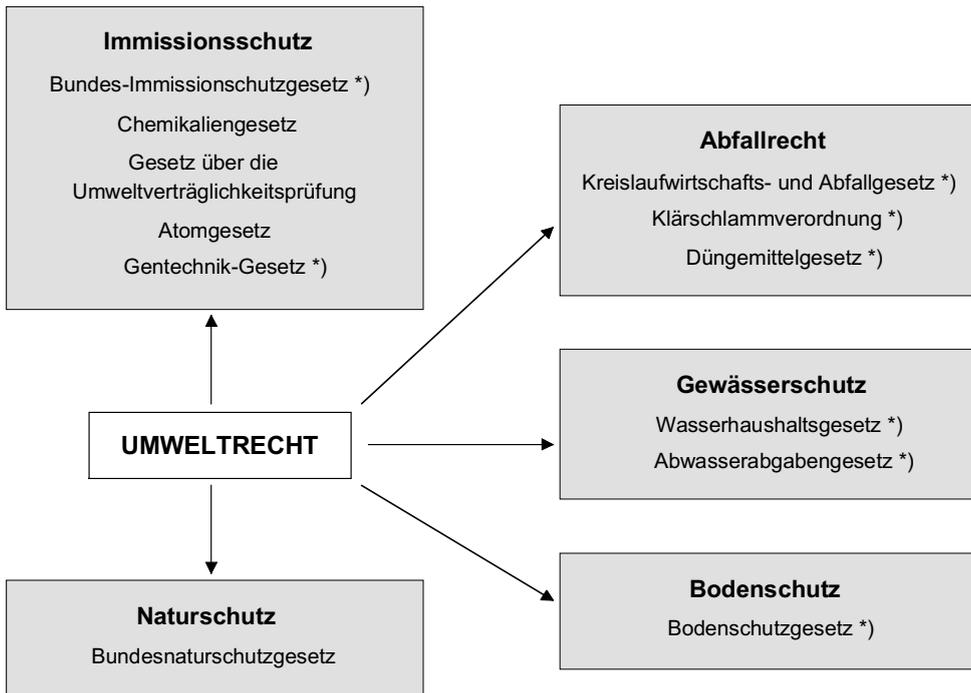
Mittlerweile hat sich in Deutschland das Umweltrecht als eigenständiges Rechtsgebiet fest etabliert. Zu seinem Kernbestand gehören ca. 20 Gesetze, 61 Verordnungen und rund 4.690 Verwaltungsvorschriften. Wie in *Bild 1-2* dargestellt, gliedert es sich in die folgenden fünf Rechtsgebiete:

#### **IMMISSIONSSCHUTZ, GEWÄSSERSCHUTZ (WASSERRECHT), ABFALLRECHT, BODENSCHUTZ, NATURSCHUTZ**

Üblich für jedes dieser Rechtsgebiete ist die Dreiteilung in:

- **Rahmengesetzgebung des Bundes** (z.B. Wasserhaushaltsgesetz) als allgemeingültiges ordnungspolitisches Instrumentarium
- **Landesgesetze** (zur konkreten Umsetzung der gesetzlichen Anforderungen in den einzelnen Bundesländern)
- **Kommunale Regelungen** (z.B. örtliche Abwassersatzungen)

## 22 Biologische Stoffwandlung im technischen Umweltschutz ( Einführung )



**Bild 1-2:** Teilgebiete und wichtige Rahmengesetze des deutschen Umweltrechts (Erläuterungen zum Inhalt der mit \*) gekennzeichneten Gesetze bzw. Verordnungen → *Kapitel 7 bis 11*)

Neben die innerstaatlichen Umweltgesetze treten in zunehmendem Maße länder- und grenzüberschreitende Regelungen der Europäischen Union. Sie dienen dem Ziel der Harmonisierung des Umweltrechts in Europa.

### Emissionen und Emissionsgrenzwerte

Als **Emissionen** werden im Umweltrecht definitionsgemäß die von einer technischen Anlage ausgehenden Verunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme bzw. Strahlen bezeichnet. Im weitesten Sinne beinhaltet dieser Begriff also alles, was als Verunreinigung von einem „Umweltverschmutzer“ (**Emittent**) an die Umgebung abgeführt wird. Vom Verursacher aus gelangen Emissionen durch Ausbreitung, Verteilung und Verdünnung als **Immissionen** zum Empfänger (**Immitent**), also zu Mensch, Tier oder Pflanze. Als schädliche Umwelteinwirkungen gelten alle Immissionen, die nach Art, Ausmaß und Dauer „geeignet sind, erhebliche Nachteile oder Belästigungen für die Allgemeinheit herbeizuführen“.

Mit dem **Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)** in dessen erster Fassung von 1974 hat sich in der Bundesrepublik Deutschland der Staat erstmals offiziell verpflichtet, „Gefahren abzuwenden“, die sich aus Belastungen der Umwelt (Luftverunreinigung, Lärm) infolge industrieller Produktion für Mensch, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser sowie die Atmosphäre ergeben. Aus rechtlicher Sicht gehört der Begriff **Gefahr** in das

Polizei- und Ordnungsrecht (wo es um die Abwehr von Gefahren für die öffentliche Sicherheit und Ordnung geht). Eine Gefahr ist definitionsgemäß dann gegeben, wenn bei ungehindertem Ablauf des Geschehens ein Zustand eintritt, bei dem ein zu schützendes Gut (z.B. die menschliche Gesundheit oder die ungestörte Natur) mit „hinreichender Wahrscheinlichkeit“ verletzt bzw. geschädigt wird.

Ein besonders hoher Rang wird dem **Schutzgut „Menschliche Gesundheit“** eingeräumt - hier begründet allein schon eine geringe Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts eine Gefahr.

Das BImSchG dient jedoch nicht nur der Gefahrenabwehr, sondern soll darüber hinaus dem Entstehen von schädlichen Umwelteinwirkungen wirksam vorbeugen. Die Skala der umweltrechtlichen Terminologie wurde deshalb erweitert und beinhaltet heute u.a. die folgenden Begriffe:

- **Umweltrisiko** → als die Möglichkeit des Eintritts einer Umweltbeeinträchtigung, soweit sie nicht aufgrund praktischer Vernunft ausgeschlossen erscheint
- **Umweltgefahr** → als dasjenige Umweltrisiko, welches unter Berücksichtigung des Grades seiner Eintrittswahrscheinlichkeit und des möglichen Schadensumfangs nicht mehr hinnehmbar und daher strikt abzuwehren ist
- **Besorgnisanlass** → als Bezeichnung für einen Zustand, der das Ergreifen von geeigneten Vorsorgemaßnahmen gebietet
- **Restrisiko** → als Bezeichnung für einen Zustand, der als sozial verträglich gilt und somit hinzunehmen ist

Mit dem Ziel der Vorsorge wurden mittlerweile für unterschiedliche Arten von Emissionen **Grenzwerte** (engl. **limit values**) festgelegt, z.B. in Form von höchstzulässigen Stoffkonzentrationen bzw. -frachten. Sie stellen rechtsverbindliche Normen dar. Werden sie überschritten, so sind unbedingt Maßnahmen zu ihrer Einhaltung einzuleiten. Die Festlegung von Grenzwerten für Gefahrenstoffe basiert auf (i) experimentell ermittelten, toxikologisch begründeten Wirkungsschwellen, (ii) Risikoberechnungen unter Berücksichtigung der chemisch-analytischen Nachweisgrenzen, oder (iii) behördlichem Ermessen (ohne toxikologischen Hintergrund).

Im Unterschied zu den Grenzwerten haben die **Richt- bzw. Leitwerte** (engl. **guidelines**) lediglich die Qualität von Zielwerten (wünschenswerte Belastungsobergrenzen) und sind gesetzlich nicht bindend. Angaben zur **Grundbelastung** (d.h. zu den üblicherweise anzutreffenden Konzentrationen von chemischen Substanzen in der ungestörten Umwelt) liefern die sogenannten **Referenz- bzw. Orientierungswerte**.

Grenz- und Leitwerte stellen für den Umwelttechniker entscheidende Zielgrößen dar. Aus ihnen leiten sich die Anforderungen (z.B. Wirkungsgrad) an die Art der zur Emissionsminderung einzusetzenden bzw. neu zu entwickelnden Verfahren und Anlagen ab (→ *Abschnitt 1.2*).

## Grundprinzipien der Umweltpolitik

Um für die Umwelt insgesamt ein hohes Schutzniveau zu erreichen, sind in der Umweltpolitik **medienübergreifende Konzepte** unerlässlich, d.h. bei der Genehmigung und Bewertung von Industrieanlagen sind neben den möglichen Emissionen (in die Atmosphäre, das

## **24 Biologische Stoffwandlung im technischen Umweltschutz ( Einführung )**

---

Wasser und den Boden) stets auch abfallwirtschaftliche Aspekte, Ressourcen- und Energieeffizienz sowie die Vorbeugung von Unfällen einzubeziehen.

Für umweltgefährdende bzw. -belastende Stoffe gilt neben allen Richtlinien, Verordnungen und Gesetzen in erster Linie das **Minimierungsgebot**. Es beinhaltet die Forderung an alle Beteiligten dafür Sorge zu tragen, dass (i) Schadstoffe nicht in die allgemeine Umwelt gelangen, (ii) nicht mit Schadstoffen gearbeitet wird, wenn hierzu Alternativen bestehen, und (iii) Schadstoffe so wenig wie irgend möglich zu einer Belastung werden können.

In der Praxis stoßen diese Forderungen allerdings vielfach an Grenzen. Hierzu gehören vor allem die Ökonomie (Kostenfaktor), aber auch menschliches Fehlverhalten (mangelnde Sorgfalt, Streben nach Komfort/Genuss etc.).

Als Leitbild der Umweltpolitik in Deutschland gilt das **Vorsorgeprinzip**. Es orientiert auf die Vermeidung möglicher Umweltbeeinträchtigungen durch frühzeitiges Handeln (z.B. Umweltverträglichkeitsprüfung bei der Inbetriebnahme neuer technischer Anlagen, Festlegung von Luftreinhalte-Plänen oder von abwassertechnischen Zielprogrammen).

Die Zuweisung der Verantwortlichkeit für Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Beseitigung von Umweltbeeinträchtigungen erfolgt im allgemeinen nach dem **Verursacherprinzip**, d.h. die entsprechenden Kosten werden dem jeweiligen Verursacher auferlegt (Internalisierung der Kosten für Umweltschutzmaßnahmen). Kann der Verursacher jedoch nicht festgestellt werden oder ist er finanziell nicht belastbar, so sind nach dem **Gemeinlastprinzip** die erforderlichen Kosten von der Allgemeinheit zu tragen.

Gemäß einem weiteren Grundprinzip sollen schließlich Staat und Gesellschaft eng bei der Lösung von Umweltproblemen unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorschriften zusammenarbeiten, wobei alle Betroffenen frühzeitig einzubeziehen sind (**Kooperationsprinzip**). Dies beinhaltet z.B. auch staatliche Kontrollen durch technische Überwachungsvereine und die Zusammenführung widerstreitender Interessen durch Umweltverwaltung und Wirtschaft.

Spätestens seit der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro im Jahre 1992 ist das Stichwort „**Nachhaltige Entwicklung**“ (engl. **sustainable development**“) in aller Munde. Es meint, dass zur langfristigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen allein eine solche wirtschaftliche Entwicklung anzustreben ist, die von der Umwelt dauerhaft ausgehalten wird (→ *Abschnitt 13.1*). Zugleich schwingt in diesem Stichwort die Überzeugung mit, dass eine dauerhaft umweltverträgliche Wirtschaftsentwicklung überhaupt möglich ist.

In 1996 wurde von der Europäischen Kommission die **EU-Richtlinie 96/91 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung** verabschiedet. Sie enthält Regelungen und Auflagen für die Genehmigung besonders umweltrelevanter Industrieanlagen auf der Grundlage eines medienübergreifenden Konzepts. Ein wichtiges Element dieser Richtlinie ist die Forderung nach Anwendung der „**Besten Verfügbaren Techniken**“ (Kurzform **BVT**) bei allen Neuanlagen (spätestens ab 2007 auch bei allen bestehenden Anlagen). Sie definiert die BVT als „... *den effizientesten und fortschrittlichsten Entwicklungsstand der Tätigkeiten und entsprechenden Betriebsmethoden, der spezielle Techniken als praktisch geeignet erscheinen lässt, grundsätzlich als Grundlage für die Emissionsgrenzwerte zu dienen, um Emissionen in und Auswirkungen auf die gesamte Umwelt allgemein zu vermeiden oder, wenn dies nicht möglich ist, zu vermindern*“.

Ohne dass die BVT im einzelnen materiell konkretisiert werden, schreibt die Richtlinie den Begriffen „Technik“, „verfügbar“ bzw. „beste“ folgende Inhalte zu:

- **Techniken** → „sowohl die angewandte Technologie als auch die Art und Weise, wie die Anlage geplant, gebaut, gewartet, betrieben und stillgelegt wird“
- **verfügbar** → „die Techniken, die in einem Maßstab entwickelt sind, der unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses die Anwendung unter in dem betreffenden industriellen Sektor wirtschaftlich und technisch vertretbaren Verhältnissen ermöglicht, gleich, ob diese Techniken innerhalb des betreffenden EU-Mitgliedsstaats verwendet oder hergestellt werden, sofern sie zu vertretbaren Bedingungen für den Betreiber zugänglich sind“
- **beste** → „die Techniken, die am wirksamsten zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt sind“

Im Hinblick auf eine europäische Harmonisierung sieht die Richtlinie vor, dass zwischen den EU-Mitgliedsstaaten ein regelmäßiger Informationsaustausch über die BVT erfolgt. Die Ergebnisse sollen von der Europäischen Kommission in Form sogenannter BVT-Merkblätter veröffentlicht werden und sind künftig bei der Festlegung von Genehmigungsaufgaben zu berücksichtigen. Federführend bei der Europäischen Kommission ist das „Europäische IPPC-Büro“ (IPPC = Integrated Pollution Prevention and Control), das seinen Sitz in Sevilla hat. In dessen technischen Arbeitsgruppen wie auch im sektorübergreifenden Steuerungsgremium ist die Bundesrepublik Deutschland durch das Umweltbundesamt vertreten.

Den vielleicht wichtigsten Meilenstein auf dem Weg zur Harmonisierung des Umweltrechts in Europa stellt die im März 2004 verabschiedete **EU-Richtlinie 2004/35 zur Umwelthaftung** dar. Die in ihr enthaltenen Festlegungen und Regelungen bilden einen ordnungspolitischen Rahmen für die Haftung bei der Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden auf der Grundlage des Verursacherprinzips (*siehe oben*) und sollen gewährleisten, dass in der Zukunft Umweltschäden infolge wirtschaftlicher Aktivitäten nach Möglichkeit gar nicht erst zustande kommen, andernfalls aber rasch und wirksam beseitigt werden. Als Umweltschäden gelten dabei: (i) Schäden an Tier- und Pflanzenarten und deren natürlichen Lebensräumen, (ii) Schäden an Gewässern, (iii) die Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit durch die Verschmutzung von Böden.

Betroffen von der neuen Richtlinie sind in erster Linie die Betreiber von tatsächlich oder potentiell (umwelt-)gefährlichen Produktionsanlagen (z.B. Chemie- und Pharmabetriebe, Emittenten von Schwermetallen) sowie die Betreiber von Mülldeponien und Abfallverbrennungsanlagen, indem sie künftig haftbar gemacht werden für die Kosten der Vermeidung oder Behebung von Umweltschäden, welche nachweislich auf ihr Konto gehen. Aber auch andere Unternehmen, deren schuldhaftes Handeln oder Fahrlässigkeit zu Umweltschäden geführt haben, sollen entsprechend zur Verantwortung gezogen werden können.

## Kapitel 2

# Mikroorganismen und die Grundzüge ihres Stoffwechsels

Der zielgerichtete Einsatz von Mikroorganismen für umwelttechnische Belange setzt Kenntnisse über deren spezifische Lebensweise und ein Grundverständnis des mikrobiellen Stoffwechsels voraus. Im Folgenden sollen daher die Milieuanprüche und Ernährungsweisen der Mikroorganismen sowie ihre vielfältigen Stoffwechselaktivitäten näher beleuchtet werden.

## 2.1 Merkmale und Lebensweise von Mikroorganismen

Mikroorganismen unterscheiden sich von anderen Lebewesen hauptsächlich durch:

- ihre geringe Zelldimension
- ihre **Lebensweise als Einzeller** (bzw. als Organismen, die aus wenigen Zellen bestehen)

Zu den Mikroorganismen zählen neben den **Bakterien** (als prokaryontische Organismen mit membranloser Kernregion, geringer Zellkompartimentierung und rascher Vermehrung durch einfache Zweiteilung) die **Pilze, Hefen** und **Protozoen** (als eukaryontische Organismen mit echtem Zellkern und mit Organellen).

Die Größe von Bakterien liegt gewöhnlich im Bereich von 1  $\mu\text{m}$ . Nur wenige, wie z.B. die Cyanobakterien, erreichen Zelldimensionen um 10  $\mu\text{m}$ . Ungefähr in dieser Größenordnung liegt der Durchmesser der Pilz- und Hefenzellen (*Tabelle 2-1*). Die geringen Abmessungen der Mikroorganismen bedingen ein sehr hohes Verhältnis von Zelloberfläche zu Zellvolumen und damit intensivste Wechselwirkungen mit der Umwelt. Zusammen mit den relativ geringen Transportwegen in der Zelle ermöglicht dies sehr **hohe spezifische Stoff-**

**Tabelle 2-1:** Morphologischer Vergleich von unterschiedlichen Zelltypen

Zelltyp	Größenordnung	Numerisches Verhältnis { Zelloberfläche : Zellvolumen }	Besondere Merkmale
<b>Prokaryontische Mikroorganismen</b> (Bakterien, Cyanobakterien)	Größe: 1 $\mu\text{m}$ Zellvolumen: $10^{-12} \text{ mm}^3$ Zellmasse: $10^{-12} \text{ g}$	ca. 6	Äußerst vielfältige Zellformen; Einzeller oder Myzelbildner; Zellen sehr einfach organisiert; Zellkomponenten im Lichtmikroskop kaum differenzierbar; rasche Vermehrung
<b>Eukaryontische Mikroorganismen</b> (Pilze, Hefen, Protozoen)	Größe: 10 $\mu\text{m}$	ca. 0,6	Einzeller oder Myzelbildner mit z.T. komplizierter Zellmorphologie; Zellstrukturen im Lichtmikroskop gut erkennbar
<b>Pflanzliche Zellen</b>	Größe: 50 $\mu\text{m}$	ca. 0,12	Fragil; langsame Vermehrung
<b>Tierische Zellen</b>	Größe: 50-100 $\mu\text{m}$	0,06-0,12	Sehr fragil (keine Zellwände); sehr langsame Vermehrung

**wechsleraten** (bezogen auf die Biomasse), die um Größenordnungen über denen von pflanzlichen und tierischen Zellen liegen.

Mikroorganismen bestehen zu etwa 80 % aus Wasser – der Rest ist organische Substanz, die sich zur Hälfte aus Proteinen zusammensetzt. Bis zu 20 % der organischen Zellsubstanz entfallen auf die Polysaccharide der äußeren Zellwand. Der Rest verteilt sich auf Lipide und die Nukleinsäuren (DNA, RNA). Aus der Elementaranalyse (*Tabelle 2-2*) leitet sich entsprechend den unterschiedlichen Atomgewichten eine formale Summenformel für mikrobielle Biomasse von  $C_5H_7O_2N$  ab.

Bei den **Bakterien** handelt es sich um eine nach Form, Physiologie und Umweltansprüchen äußerst vielgestaltige Gruppe von Lebewesen (*Tabelle 2-3*). Viele Arten besitzen Bewegungsorganellen in Form von Geißeln, die entweder endständig angeordnet sind (polare Begeißelung) oder sich über die gesamte Zellwand verteilen (peritriche Begeißelung).

Die Zellwand der Bakterien enthält als integralen Bestandteil ein makromolekulares Peptidoglycan (Mureingerüst). Dieses Heteropolymer besteht aus Ketten von N-Acetylglucosamin und Acetylmuraminsäure. Die Muraminsäure-Glieder sind über ihre Lactylgruppen peptidisch verküpft. Der Gehalt an Peptidoglycan in den Zellwänden ist ausschlaggebend dafür, ob sich die Bakterien mit Kristallviolett dauerhaft anfärben lassen oder nicht. Nach GRAM, dem Erfinder dieser Färbemethode, unterscheidet man daher zwischen GRAM-positiven und GRAM-negativen Bakterien.

Den Aufbau einer typischen Bakterienzelle zeigt *Bild 2-1*. Bisher sind rund 5.000 unterschiedliche Bakterienarten im Labor kultiviert und vollständig charakterisiert worden. Zur eindeutigen Beschreibung einer bestimmten Bakterienart bzw. -gattung gehören folgende Grundangaben (Ordnungskriterien):

- **Morphologie** der Einzelzelle (Zellform, Anzahl u. Anordnung der Geißeln) und ggf. der Zellkolonien (Farbe, Form u.a.)
- **Anfärbbarkeit nach GRAM** und Zusammensetzung der Zellwandkomponenten
- **Physiologie** (Verhältnis zum Luftsauerstoff; Art der Energiegewinnung; Temperatur- und pH-Abhängigkeit des Wachstums; Spektrum der verwertbaren Substrate)
- **Typischer Standort** und ggf. typische Beziehungen zu anderen Lebewesen

Die Zellvermehrung von Bakterien erfolgt durch einfache Zweiteilung (binäre Spaltung einer Zelle in zwei Tochterzellen). Die Teilungsgeschwindigkeit (Wachstumsrate) ist zum einen abhängig vom Angebot an verwertbaren Nährstoffen und anderen physikalisch-chemischen Umweltfaktoren (Temperatur, pH, Sauerstoffversorgung, osmotischer Druck u.a.), zum anderen vom genetisch determinierten Potential (**Genotyp**) des betreffenden Bakteriums.

Einige Bakterien können Dauerformen in Gestalt von sogenannten **Endosporen** ausbilden und in diesem Zustand über Jahre hinweg ihre Lebensfähigkeit erhalten. Die Sporen sind im Vergleich zu den vegetativen Zellen sehr viel widerstandsfähiger – sie können selbst längere Perioden des völligen Austrocknens, Temperaturen von kochendem Wasser und den Einfluss giftiger Chemikalien unbeschadet überstehen. Bei günstigen Umweltbedingungen keimen sie unter Bildung vegetativer Zellen wieder aus.

Nach ihrem Verhältnis zum Luftsauerstoff lassen sich die Bakterien unterteilen in:

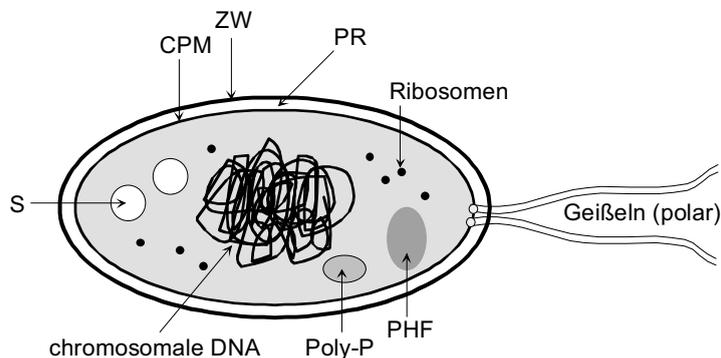
- **Strikt oder obligat aerobe** Bakterien → sind für ihr Wachstum essentiell auf den molekularen Sauerstoff der Luft angewiesen (→ *Abschnitt 2.3.2.1*)

## 28 Zellstoffwechsel der Mikroorganismen

- **Fakultativ anaerobe Bakterien** → wachsen normalerweise in Gegenwart von Luft-sauerstoff, können dies aber auch unter anoxischen Bedingungen tun (→ *Abschnitt 2.3.2.1*)
- **Mikro-aerophile Bakterien** → benötigen zwar Luftsauerstoff für ihr Wachstum, tolerieren aber nur einen sehr geringen Sauerstoffpartialdruck (bis maximal 0,03 bar)

**Tabelle 2-2:** Stoffliche Zusammensetzung von Bakterien und anderen Mikroorganismen

Frischmasse	in % der Frischmasse
Wassergehalt	70 ... 85
Trockenmasse	15 ... 30
Biopolymere	in % der Trockenmasse
Proteine	50
Lipide	10
Polysaccharide der Zellwand	10 ... 20
RNA	10 ... 20
DNA	3 ... 4
Bioelemente	in % der Trockenmasse
C	50
O	20
N	14
H	8
P	2 .. 6
S	1 .. 3
K	1
Ca	0,5
Mg	0,5
Fe	0,2



**Bild 2-1:** Längsschnitt durch eine typische Bakterienzelle (schematische Darstellung; **ZW** – Zellwand, **CPM** – Cytoplasma-Membran, **PR** – periplasmatischer Raum, **Poly-P** – Polyphosphat-Granula, **PHF** – Polyhydroxy-Fettsäuren als Speicherstoffe, **S** – Schwefeleinschlüsse)

Unter den Bakterien finden sich Arten mit den unterschiedlichsten Ernährungsweisen und Milieuanforderungen. Einige von ihnen haben sich im Laufe der Evolution selbst an extreme Standortbedingungen angepasst (*Tabelle 2-4*).

Bakterien mit speziellen Stoffwechselleistungen können aus Freilandproben gezielt angereichert und in Form von sogenannten Reinkulturen isoliert werden. Dazu wählt man im Labor solche Nährmedien und Wachstumsfaktoren aus, an welche der betreffende Organismus am besten angepasst ist und sich unter diesen **selektiven Bedingungen** schneller vermehrt als alle übrigen Begleitorganismen. Meist ist schon 1 Gramm Gartenerde, Schlamm oder Sediment ausreichend, um im Labor ein Bakterium in Reinkultur zu isolieren, das einen beliebigen Naturstoff zu verwerten vermag.

**Cyanobakterien** sind in der Natur weit verbreitet, z.B. in Gewässern, Böden und Reisfeldern. Sie besitzen einen hochspezialisierten Photosyntheseapparat ( $\rightarrow$  *Abschnitt 2.4.1*), der dem von Algen und höheren Pflanzen entspricht und mit dessen Hilfe sie  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre binden und in körpereigene organische Stoffe umwandeln können. Cyanobakterien sind die größte, formenreichste und am weitesten verbreitete Gruppe der photosynthetisch aktiven Prokaryonten. Die zusätzliche Fähigkeit, molekularen Stickstoff aus der Atmosphäre zu binden ( $\rightarrow$  *Abschnitt 3.4.4*), befähigt sie dazu, selbst an extremen Standorten zu wachsen.

**Pilze** gehören zu den eukaryontischen Mikroorganismen. Wie die pflanzlichen und tierischen Zellen besitzen sie einen echten Zellkern, eine robuste Zellwand und mit Zellsaft gefüllte Vakuolen. Sie sind weitgehend unbeweglich und gewinnen ihre Energie durch Oxidation organischer Kohlenstoffverbindungen. Der Vegetationskörper von Pilzen ist ein Thallus. Er besteht aus querwandlosen oder durch Querwände (Septen) zellig gegliederten Fäden (**Hyphen**) von 5 bis 10  $\mu\text{m}$  Durchmesser, die sich vielfach verzweigen. Die Gesamtheit der Hyphenmasse eines Pilzes wird als **Myzel** (Mycelium) bezeichnet.

Pilze können sich sowohl ungeschlechtlich als auch geschlechtlich fortpflanzen. Die asexuelle Vermehrung erfolgt entweder durch Sporenbildung, Knospung oder durch Fragmentierung der Hyphen in Einzelzellen (welche sich ähnlich wie Sporen verhalten). Am häufigsten ist die Bildung von Sporen anzutreffen. Bei den *Penicillium*- und *Aspergillus*-Arten entstehen sie aus Abschnürungen (**Konidien**) an den Hyphenenden. Bei anderen Pilzen (z.B. *Mucor*- und *Rhizopus*-Arten) erfolgt die Bildung der Sporen im Inneren von speziellen Behältnissen (**Sporangien**).

Die sexuelle Fortpflanzung von Pilzen basiert wie bei allen anderen Eukaryonten auf der Verschmelzung der Kerne von zwei geschlechtlichen Elternzellen.

Die Pilzhyphen wachsen vorwiegend an ihrer Spitze (**apikales Wachstum**), jedoch ist bei den meisten Pilzen jeder Teil des Myzels potentiell wachstumsfähig. Zur Vermehrung von Pilzen im Labor genügt also meist ein einzelnes kleines Myzelstück, um daraus einen neuen Vegetationskörper entstehen zu lassen.

Eine Zusammenstellung der taxonomischen Gruppen und wichtigen Vertreter der Pilze findet sich in *Tabelle 2-5*. Zusammen mit den Ständerpilzen (*Basidiomycetes*) gehören die Schlauchpilze (*Ascomycetes*) zu den sogenannten höheren Pilzen. Diejenigen Vertreter unter den Pilzen, denen das sexuelle (perfekte) Stadium fehlt oder bei denen es zwar vermutet wird, jedoch bislang noch nicht nachgewiesen worden ist, werden in der Gruppe der *Fungi imperfecti* zusammengefasst. Es wird angenommen, dass sie Konidienstadien von Ascomyceten darstellen, deren Ascus-Status entweder noch nicht entdeckt worden ist oder im Laufe der Evolution verloren ging.

### 30 Zellstoffwechsel der Mikroorganismen

**Tabelle 2-3:** Einteilung der bekannten Bakterien nach ihren morphologischen Merkmalen und typischen StoffwechsellLeistungen (nach SCHLEGEL 1992)

Gruppen	Repräsentative Gattungen
<b>GRAM-positive Bakterien</b>	
Kokken	<i>Micrococcus, Staphylococcus, Streptococcus, Leuconostoc, Ruminococcus, Sarcina</i>
Nicht-sporenbildende Stäbchen	<i>Lactobacillus, Listeria</i>
Coryneforme Bakterien und Aktinomyceten	<i>Corynebacterium, Arthrobacter, Brevibacterium, Cellulomonas, Propionibacterium, Eubacterium, Streptomyces, Mycobacterium, Nocardia, Frankia, Actinoplanes</i>
Endosporen bildende Stäbchen und Kokken	<i>Bacillus, Sporolactobacillus, Thermoactinomyces, Clostridium, Desulfotomaculum</i>
<b>GRAM-negative Bakterien</b>	
Kokken	<i>Neisseria, Moraxella, Acinetobacter, Paracoccus, Veillonella</i>
Aerobe Stäbchen und Kokken	<i>Pseudomonas, Xanthomonas, Zooglea, Acetobacter, Azotobacter, Beijerinckia, Rhizobium, Agrobacterium, Alcaligenes, Legionella</i>
Aerobe chemolithotrophe Bakterien	<i>Nitrobacter, Nitrospira, Nitrococcus, Nitrosomonas, Nitrosospira, Nitrosococcus, Nitrosolobus, Thiobacillus, Sulfolobus</i>
Scheidenbakterien	<i>Sphaerotilus, Leptothrix</i>
Fakultativ anaerobe Stäbchen	<i>Escherichia, Klebsiella, Enterobacter, Salmonella, Shigella, Proteus, Erwinia, Vibrio, Aeromonas, Zymomonas</i>
Anaerobe Bakterien	<i>Bacteroides, Fusobacterium, Selenomonas</i>
Archaeobakterien	<i>Methanobacterium, Methanosarcina, Methanothrix, Methanococcus, Halobacterium, Halococcus, Sulfolobus, Thermoproteus, Desulfurococcus, Thermococcus</i>
Spiralförmige und gekrümmte aerobe Bakterien	<i>Spirillum, Azospirillum, Campylobacter, Helicobacter, Bdellovibrio</i>
Gekrümmte anaerobe Bakterien	<i>Desulfovibrio, Butyrovibrio</i>
Spirochaeten	<i>Spirochaeta, Treponema, Borrelia, Leptospira</i>
<b>Gleitende Bakterien</b>	<i>Myxococcus, Cytophaga, Sporocytophaga, Flexibacter</i>
<b>Sondergruppen</b>	
Bakterien mit Anhängseln, prosthekate Bakterien und knospende Bakterien	<i>Beggiatoa, Thiothrix, Leucothrix</i>
Obligat zellparasitische Bakterien	<i>Rickettsia, Chlamydia</i>
Mollicutes (Mycoplasma-Gruppe)	<i>Mycoplasma, Spiroplasma</i>
Anaerobe phototrophe Bakterien (anoxygen)	<i>Rhodospirillum, Rhodopseudomonas, Rhodobacter, Chromatium, Thiospirillum, Chlorobium,</i>
Aerobe phototrophe Bakterien (Cyanobakterien)	<i>Synecococcus, Gloeocapsa, Oscillatoria, Anabaena, Nostoc</i>