

*Alexandru Braha und Ghiocel Groza*

# **Moderne Abwassertechnik**

Erhebung, Modellabsicherung, Scale-Up, Planung



WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA



*Alexandru Braha und  
Ghiocel Groza*

**Moderne Abwassertechnik**

***Beachten Sie bitte auch  
weitere interessante Titel  
zu diesem Thema***

Hellmann, D.-H., Riegler, G. (Hrsg.)

**Maschinentechnik in der Abwasserreinigung**

**Verfahren und Ausrüstung**

2003, ISBN 3-527-30606-4

Wiesmann, U., Choi, I. S., Dombrowski, E.-M.

**Biological Wastewater Treatment**

**Fundamentals, Microbiology, Industrial Process Integration**

2006, ISBN 3-527-31219-6

Oppenländer, T.

**Photochemical Purification of Water and Air**

**Advanced Oxidation Processes (AOPs): Principles, Reaction  
Mechanisms, Reactor Concepts**

2003, ISBN 3-527-30563-7

*Alexandru Braha und Ghiocel Groza*

# **Moderne Abwassertechnik**

Erhebung, Modellabsicherung, Scale-Up, Planung



WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

## **Autoren**

### ***Prof. Dr.-Ing. Alexandru Braha***

Konrad-Adenauer-Str. 66  
30853 Langenhagen  
Deutschland

### ***Prof. Dr. Ghiocel Groza***

TU für Bauwesen und Maschinen  
Blv. Lacul Tei 128  
Bukarest  
Rumänien

■ Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

## **Bibliographische Informationen der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

© 2006 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Printed in the Federal Republic of Germany

**Satz** Kühn & Weyh, Satz und Medien,  
Freiburg

**Druck** betz-Druck GmbH, Darmstadt

**Bindung** Litges & Dopf Buchbinderei GmbH,  
Heppenheim

**ISBN-13:** 978-3-527-31270-2

**ISBN-10:** 3-527-31270-6

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort IX

Einleitung: Abwassertechnik – Stiefkind der Verfahrenstechnik? XIII

Danksagung XVII

<b>1</b>	<b>Mikrobiologische Grundzüge in der Bioverfahrenstechnik</b>	<b>1</b>
1.1	Form und Gestalt der Mikroorganismen in Ökosystemen und in der industriellen Biotechnologie	1
1.1.1	Eukaryotische und prokaryotische Zellen und ihre Struktur	2
1.1.2	Grund- und Regulationsmechanismen des Stoffwechsels und der Energieumwandlung	4
1.1.3	Mutation und Erbgutübertragung	6
1.2	Bioverfahrenstechnische Aspekte des Stoffwechsels	8
1.2.1	Produktionsverfahren	8
1.2.1.1	Biomassegewinnung	8
1.2.1.2	Biosynthese von Stoffwechselprodukten	8
1.2.1.3	Biotransformation	9
1.2.1.4	Industrieller Einsatz von Biomasse an natürlichen Standorten (Erzlaugungsverfahren)	9
1.2.2	Substratabbau	10
1.2.2.1	Denitrifikation	11
1.2.2.2	Methanbildung	11
1.2.2.3	Oxidation von TOC- und TKN-haltigen Verbindungen	13
<b>2</b>	<b>Verfahrenstechnische Überlegungen zur Modellbildung in der biologischen Abwasserbehandlung</b>	<b>21</b>
2.1	Reaktionstechnisches Verhalten von Bioreaktoren mit suspendierter Biomasse	22
2.1.1	Verweilzeitverhalten	22
2.1.2	Kinetik der Konzentrationsabnahme kohlenstoffhaltiger Verbindungen	36
2.1.2.1	Reaktion 0. Ordnung ( $n = 0$ )	36
2.1.2.2	Reaktion 1. Ordnung ( $n = 1$ )	37

2.1.2.3	Reaktionen 2. Ordnung ( $n = 2$ )	43
2.1.2.4	Reaktionen $n$ . Ordnung	44
2.1.2.5	Reaktion 1. Ordnung mit nicht abbaubarem Term	50
2.1.3	Variierende Reaktionsordnung und Biomassekonzentration	53
2.1.3.1	C-Oxidation bei vernachlässigbarer Biomassezufuhr durch den Ablauf des Vorklärbeckens (VKB)	53
2.1.3.2	C-Oxidation mit gleichzeitigem Biomassezuwachs	60
2.1.3.3	N-Oxidation mit gleichzeitigem Biomassezuwachs	78
2.1.3.4	Kinetik der Denitrifikation	83
2.1.3.5	Kinetik des Sauerstoffverbrauches	92
2.1.4	Kinetik streng anaerober Prozesse	95
2.2	Reaktionstechnisches Verhalten von Reaktoren mit immobilisierter Biomasse	99
2.2.1	Reaktion 1. Ordnung	100
2.2.2	Reaktion variierender Ordnung	104
2.3	Erkundung des Temperatureinflusses auf die biokinetischen Geschwindigkeitskoeffizienten	108
2.4	Kinetik des Sauerstofftransports	112
2.5	Zwischenbemerkungen zu Bioreaktor und Modellbildung	119
<b>3</b>	<b>Statistische Datenauswertungsverfahren</b>	<b>123</b>
3.1	Statistische Kennwerte und Prüfverfahren	124
3.1.1	Statistische Kennwerte	126
3.1.2	Statistische Prüfverfahren	129
3.2	Regressionsrechnung	138
3.3	Zwischenbemerkungen zu statistischen Auswertungsverfahren	158
<b>4</b>	<b>Bakterienmischpopulationen und Stoffumwandlungsprozesse bei multiplen Abwassersubstraten</b>	<b>165</b>
4.1	Biomassenzuwachs/Bestimmungsverfahren	165
4.2	Multiple Substrate und deren analytische Bestimmung	168
4.3	Allgemeine Bemerkungen zur Anwendung von Summenparametern bei der Modellbildung	168
4.4	Kinetik mikrobieller Prozesse bei suspendierter Biomasse	169
4.4.1	Statische Kulturen ( <i>batch culture</i> )	169
4.4.1.1	Die Adaptations- oder lag-Phase	171
4.4.1.2	Exponentielles Wachstum	172
4.4.1.3	Übergangsphase	174
4.4.1.4	Stationäre Phase	179
4.4.1.5	Absterbephase	179
4.4.2	Kinetik dynamischer Kulturen ( <i>continuous culture</i> )	180
4.4.2.1	CSTRs ohne Biomasserückführung	180
4.4.2.2	CSTRs mit Biomasserückführung	181
4.4.2.3	Energiedichte, Scherkräfte und Belüften	186



4.5	Tropfkörper – Kinetik mikrobieller Prozesse bei auf Füllkörpern immobilisierter Biomasse	192
4.5.1	Prozessintensivierung – Fallstudie	193
4.5.2	Versuchsplanung und -durchführung	200
4.5.3	Diskussion der Modellergebnisse	202
<b>5</b>	<b>Durchführung kinetischer Untersuchungen mittels Labor- und Halbtechnikums-Belebtschlammreaktoren</b>	<b>207</b>
5.1	Versuche in einstufigen Halbtechnikums-Belebtschlammreaktoren	211
5.1.1	Versuchsplanung und -durchführung	211
5.1.2	Batchreaktor – Versuchsplanung/-durchführung	225
5.1.3	Zwischenbemerkungen zu einstufigen Belebtschlammreaktoren bei der Industrie-Abwasserreinigung	240
5.2	Versuche in einer Halbtechnikums-Mischbeckenkaskade	242
5.2.1	Beschreibung der Anlage und Versuchsplanung	242
5.2.2	Datenauswertung und Diskussion der Ergebnisse	248
5.2.2.1	Kurzer theoretischer Abriss	248
5.2.2.2	CSTR-Kaskade – Messergebnisse und Modellvoraussagen	251
5.2.2.3	Zwischenbemerkungen zum Substratabbau in Mischbeckenkaskaden	256
5.3	Schlussfolgerungen zur Modellerstellung/-übertragung auf Bioreaktoren in der Klärtechnik	256
<b>6</b>	<b>Das Lawrence-McCarty-Modell</b>	<b>261</b>
6.1	Das Schlammalter als Planungs- und Betriebsregelgröße	261
6.2	Modell-Erweiterung und Fallstudien bei Ingenieur-Büros	265
6.2.1	Theoretische Grundüberlegungen	265
6.2.2	Anwendung des erweiterten Schlammalter-Modells	267
6.2.3	Modellmäßige Prozessanalyse der Messergebnisse	268
6.3	Schlussbetrachtungen zum Schlammalter-Modell	274
6.4	Automatische Betriebsführung auf der Grundlage reaktionstechnischer Modelle	278
6.4.1	Aufgabenstellung beim Großklärwerk Isai	278
6.4.2	Ist-Zustand der örtlichen Gegebenheiten in Iasi	278
6.4.3	Betriebliche Grundüberlegungen zur ABF	278
6.4.4	ABF – verfahrenstechnische Beschreibung	280
6.4.4.1	Die $(\theta_C)_{\text{Modell}, T=20^\circ\text{C}}$ -Prozessführung	280
6.4.4.2	Die $(\theta_C)_{\text{emp.}, T=20^\circ\text{C}}$ -Prozessführung	290
6.4.4.3	Prozessführung nach $(\theta_C)_{\text{Handbetrieb}, T=20^\circ\text{C}}$	290
6.5	ABF – IASI – Bemerkungen/Ausblick	291
<b>7</b>	<b>„State of the Art“ in der Klärtechnik und Bio-Verfahrenstechnik</b>	<b>295</b>
7.1	Einleitender Überblick	295
7.2	Kommentar/Ausblick	299

<b>8</b>	<b>Fest-Flüssig-Trennung in statischen Klärern und Eindickern</b>	<b>303</b>
8.1	Abwassertechnische Klassifizierung von Suspensionen	303
8.2	Modellerstellung für Fest-Flüssig-Trenneinheiten	307
8.3	Zwischenbemerkungen/Ausblick	307
<b>9</b>	<b>Gleichmäßiges Absetzen versus Fluidisation</b>	<b>309</b>
9.1	Theoretische Grundüberlegungen	309
9.2	Modellansätze bei Absetz-/Fluidisierungsprozessen	311
9.3	Bemerkungen zu „zone-settling“ und Fluidisierungsansätzen	323
<b>10</b>	<b>Die „limiting-solids-flux-theory“ – Fallstudien</b>	<b>329</b>
10.1	Theoretische Aspekte	329
10.2	Sedimentation-Fallstudien	339
10.2.1	Prozessanalyse kompakt ausflockender Partikel	339
10.2.1.1	Laborvorschrift – Allgemeines	339
10.2.1.2	Diskussion der Ergebnisse	340
10.2.1.3	Zwischenbemerkungen	348
10.2.2	Fallstudie – Schwach ausflockende Partikel	349
10.2.2.1	Allgemein	349
10.2.2.2	Labor-Versuchsdurchführung	350
10.2.2.3	Prozessanalyse und Diskussion der Ergebnisse	352
10.2.2.4	Zwischenbemerkungen	361
10.3	Schlussbemerkungen zur Modellerstellung mittels Sedimentationsversuchen	361
<b>11</b>	<b>Einbindung der Flockenkompression bei Belebtschlämmen in die Massen-Flux-Theorie</b>	<b>367</b>
11.1	Schlammkompression – <i>State of the Art</i>	367
11.2	Aufgabenstellung	370
11.3	Versuchsplanung und -durchführung	370
11.4	Theoretische Grundüberlegungen	379
11.4.1	Der Kurgaev'sche Kompressionsansatz	379
11.4.1.1	Erweiterung des Kurgaev'schen Modells	383
11.4.2	Der Coulson-Richardson-Kompressionsansatz (CR)	385
11.4.2.1	Erweiterung des CR-Kompressionsansatzes	386
11.5	Diskussion der Ergebnisse	388
11.6	Dimensionierung eines statischen Eindickers	397
11.7	Schlammkompression – Schlussbemerkungen	399
<b>12</b>	<b>Schlusswort – Ausblick</b>	<b>409</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>419</b>

## Vorwort

Mit vor allem in Wirtschafts- und Geisteswissenschaften gängigen Begriffen wie „Theorie“ oder „Theoretisches Modell“ (wo sich dies meistens auf ungeprüfte Spekulationen, Annahmen und Vermutungen und manchmal, naturbedingt, sogar auf überhaupt nicht prüfbare Hypothese bezieht) haben nicht wenige auf dem natur- oder ingenieurwissenschaftlichen Bereich tätige Akademiker so ihre Schwierigkeiten. Bereits das Wort „Modelldenkweise“ als solches gilt nicht wenigen von ihnen als suspekt, und dies trotz der ganz verschiedenen Grund(be)deutung in diesen den exakten Wissenschaften zuzurechnenden Disziplinen, bei denen diese Begriffe in der Regel ein fachlich-kohärentes System von bereits verifizierten oder zumindest noch immer verifizierbaren Hypothesen und Phänomenen bezeichnen.

Allerdings ist die Neigung vieler Wissenschaftler allein der Ratio das wissenschaftlich-technische Agieren zuzuschreiben sicherlich falsch, da „reine“ (nur) Rationalität lediglich einen jener vielen allgemeinen Faktoren erfasst, welche das menschliche Agieren bestimmen und bedauerlicherweise nicht einmal der dominierende. Hinzu kommt, dass wir im Bereich des wissenschaftlich-technischen Denkens, obwohl häufig mit sich rasch wandelnden Situationen konfrontiert, viel eher dazu neigen, uns nicht nur an unseren Denkschemata festzuhalten und sogar neue Informationen zu verdrehen, um sie in diese Schemata einzupassen, als dass wir bereit wären, unsere Denkweise zu ändern; das abwassertechnische Gebiet bildet hinsichtlich der hierfür benötigten Akzeptanz des Neuen überhaupt keine Ausnahme. Beispielhaft hierfür möge eine Wiedergabe der Auffassungen weltbekannter Siedlungswasserwirtschaftler wie W. v. d. Emde, W. Gujer, L. Huber, K. H. Krauth und P. Schleyen aus dem führenden Abwasser-Standardwerk in Deutschland aus dem Jahr 1990 dienen [1].

*„In der Arbeitsgruppe bestand sofort Übereinstimmung, dass die maßgebende Bemessungsgröße für Anlagen zur Nitrifikation/ Denitrifikation das Schlammalter ( $t_S$ ) ist. Eine Bemessung nach der Stickstoff-Schlammbelastung ist daher nicht zielführend. Für die Berechnung des Rauminhaltes von Belebungsbecken dienen jedoch weiterhin die BSB<sub>5</sub>-Schlammbelastung  $B_{TS}$  und die BSB<sub>5</sub>-Raumbelastung  $B_R$ .“*

In ihrer 1970 abwassertechnisch als bahnbrechend zu bezeichnenden Veröffentlichung [2] räumten Lawrence und McCarty bis dahin existierende Unklarheiten über die Definition des Schlammalters aus, und erwähnen mit Weitsicht

*In essence, the models presented herein are only a mathematical formalization of what has been observed to be the important parameters by designers, operators, and investigators in the past. Such formalization, hopefully, will furnish relationships with predictive value to serve not only in the design and control of existing treatment processes, but also will aid in the biological processes for other purposes, such as denitrification...“*

Bei gemeinsamen Systemeigenschaften Großmaßstabsreaktor  $\leftrightarrow$  Labor-Pilotreaktor kann dann viel leichter (und viel preiswerter) das Modell geprüft und zu einer statistisch abgesicherten Modell-Voraussage für die Großanlage eingesetzt werden [2]. Dabei setzen die Scale-up- und Optimierungsprobleme solcher Stoffumwandlungsprozesse eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Siedlungswasserbauern und Verfahrenstechnikern einerseits und Mikrobiologen sowie (Bio)-Chemikern andererseits voraus. Eine gemeinsame Sprachregelung bei allen diesen mitwirkenden Disziplinen führt unweigerlich dazu, dass bei den Ingenieurwissenschaftlern Grundzüge der Mikrobiologie und bei den Naturwissenschaftlern ein gewisses Verständnis für technische Zusammenhänge in immer größer werdendem Ausmaß benötigt werden. Ziel der nachfolgenden Ausführungen ist es daher, die zur Zeit relativ schmale Brücke zwischen diesen sich noch abgrenzenden Fachgebieten zu erweitern, um über gemeinsames Denken in Modellkategorien eine Querverbindungen zwischen Natur- und Ingenieurwissenschaften zu schaffen.

Um dieser Situation Rechnung zu tragen, werden auf der Basis schon im Labormaßstab zu planender Versuchsdurchführung nicht nur die Modellbildung an sich sondern auch in der Theorie oft angewandte mathematische „Tricks“ detailliert beschrieben, die das statistisch abgesicherte Herausfinden der auf die Prozessmechanismen einzeln einwirkenden Parameter wesentlich transparenter gestalten.

Trotz der nach „viel Theorie“ lautenden Thematik ist das Handbuch dank der vielen darin präsentierten realen Fallstudien stark an der Praxis orientiert und verzichtet auf langwierige theoretische Herleitungen. Dem Anwender, seien es Studierende oder in Entwicklung Tätige, kommen zahlreiche grapho-analytische Lösungen sowie sich daran anschließende Computersimulationen entgegen, die seinen künftigen Umgang mit statistisch abgesicherten Datenreihen, deren Einsatz ins Modell und dessen Prüfung auf Adäquatheit immer vertrauter machen. Kritisch eingestellten Lesern würden die Autoren für jede Anregung dankbar sein, denn auch was eventuell Gutes kann zum Feind des Besseren werden...

**Literaturverzeichnis**

- 1 Imhoff, K., Imhoff, R.: Taschenbuch der Stadtentwässerung, Oldenbourg-Verlag, 27. Auflage, München (1990), S. 222.
- 2 Lawrence, A. W., McCarty, P.: Unified Basis for Biological Treatment Design and Operation. Journal of San. Eng Div., SA 3, June (1970), S. 757/778.



## Einleitung

### Abwassertechnik – Stiefkind der Verfahrenstechnik?

Als Hauptaufgaben der Klärtechnik gelten die Abwasserreinigung vor dem Ableiten in natürliche Gewässer und die Behandlung der dabei anfallenden, überwiegend organisch belasteten Abwasserschlämme. Dies erfolgt in so genannten mechanisch-biologisch-chemischen Kläranlagen, in denen das Abwasser mehreren Reinigungsstufen unterzogen wird. In den „mechanischen“ Reinigungsstufen werden zuerst grobe, im Abwasser schwimmende/schwebende Feststoffe durch einen Siebvorgang entfernt; dies wird von so genannten Rechenanlagen getätigt. Eine zweite Gruppe zu entfernender Stoffe umfasst sandartige, von Fetten und Ölen verschmutzte Teilchen (Sandfanggut), vorwiegend mineralischer aber auch organisch-ausflockender Natur; da sie in der Regel eine größere Dichte als das Abwasser haben, sinken sie in so genannten Sandfängen zu Boden, wo sie mit geeigneten Vorrichtungen beseitigt werden. Drittens werden fettige und ölige Bestandteile, die normalerweise schwimmen, entweder in auch mit Luftpfeblung versehenen Spezial-Sandfängen, oder in Fett- und Ölabscheidern ausgetragen, um eine mögliche Öl-Anhaftung an der Biomasse nachfolgender biologischer Reinigungsstufen (luft-undurchlässiger Oberflächenfilm) weitestgehend zu vermeiden [1, 2]. Der vierte Schritt der Fest-Flüssig-Trennung wird in Klärern (Vorklärbecken – VKB) vollzogen, da sich im Abwasser noch viele feinstdispergierte, lediglich durch die durch mehrstündige Aufenthaltszeiten geförderte Konglomeratbildung, sedimentierfähige Teilchen befinden. Zur Anhebung der Trennleistung wird mancherorts ein kleiner Teil des Rücklaufschlammes (Überschussschlamm) in die Vorklärbecken zurückgeführt oder dem Vorklärbecken eine FlockungsFällstation vorgeschaltet. Dadurch wird ein Teilchen-Ausflockungseffekt im Vorklärbecken hervorgerufen und die biologische Stufe entlastet [2, 3]. In der nachfolgenden aeroben biologischen Abwasserreinigung werden bei Durchlauf-Anlagen für die Reagenzien  $\text{Abwasser} \leftrightarrow \text{Biomasse} \leftrightarrow \text{Luftsauerstoff}$  zwei Arten von Kontaktverfahren angewandt, um die bakterielle Umwandlung gelöster organischer Abwasser-Substratkomponenten in (Biomasse)Schlamm-Zuwachs zu bewirken. Diese zwei Bioreaktor-Arten kann man als (1): Bioreaktoren mit suspensierter Biomasse (*suspended growth*) und (2): Bioreaktoren mit immobilisierter Biomasse (*attached growth*) definieren. Nach der erfolgten Reaktion benötigt aber der Bioreaktor-Abfluss beider diesen Kontaktverfahren eine Fest-Flüssig-Trennung (Biomassezuwachs sowie biologisch-resistente ur-gelöste

Teilchen), die wiederum andere Klärer, so genannte Nachklärbecken (NKB), erzwingen. Je nach der Art der Biomassebeteiligung, suspendiert oder an Trägern immobilisiert, haben solche NKB sehr unterschiedliche Biomassenströmen und Substrat-Restkonzentrationen zu „bewältigen“. Deshalb sollten kurz einige technologisch-anlagenmäßig spezifische Aspekte solcher Bio-Kontaktverfahren beschrieben werden [1, 4, 5].

Bei den Verfahren mit suspendierter Biomasse (Belebungsanlagen) bildet die durch Luftzufuhr aufgewirbelte Biomasse im Abwasser des Belebungsbeckens eine Suspension heraus (Abwasserschlammgemisch), die nach Verlassen des Bioreaktors (Belebungsbeckens) den nach geschalteten Nachklärbecken (NKB) zufließt. Demnach haben die Nachklärbecken abwassertechnischer Belebungsanlagen als wichtigste Aufgabe, durch Sedimentation feine/feinste Teilchen des belebten Schlammes vom biologisch gereinigten Abwasser zu trennen. Danach kann der NKB-Ablauf, an sich ein voll biologisch-mechanisch gereinigtes Abwasser, in ein natürliches Gewässer abgeleitet werden. Daher ist der Abscheidegrad im Nachklärbecken entscheidend für die Reinigungsleistung der ganzen Belebungsanlage. Von dem in den NKB abgesetzten Belebtschlamm wird der größte Teil als Rücklaufschlamm in das Belebungsbecken zurückgeführt, ein viel kleinerer Anteil wird als so genannter NKB-Überschussschlamm, selten separat vom VKB-Schlamm (Primärschlamm), zu den statischen Eindickern gefördert [1, 4, 5]. Hieraus wird ersichtlich, dass die Nachklärbecken bei Belebungsanlagen, neben erwähnter, weitestgehender Biomasse-Trennung, ein zufrieden stellendes Aufkonzentrieren des abgesetzten Belebtschlammes zwecks benötigter Rückführung in das Belebungsbecken, mitsamt Sammeln/Zwischenspeichern dieses Belebtschlammes, als zusätzliche Aufgabe übernehmen und erfüllen müssen. Bei anhaltendem Regenwetter, d. h. zu hoher hydraulischer NKB-Oberflächenbelastung, kann es passieren, dass das Abwasserschlammgemisch aus dem Belebungsbecken den abgesetzten, abgespeicherten Schlamm aus den Nachklärbecken verdrängt. Die Folgen sind, der Rücklaufschlamm wird dünner und über den NKB-Ablauf kann ein massiver Schlammabtrieb einsetzen.

In der Regel wird die Belastbarkeit einer Belebungsanlage mit organischen Schmutzstoffen vom Gehalt an aktivem Schlamm im Belebungsbecken maßgebend bestimmt, da der Schlammgehalt im Belebungsbecken stark von der Funktionstüchtigkeit des Nachklärbeckens bei wechselnder hydraulischer Belastung und von der Schlammrückführung abhängt. Da insbesondere kleine Kläranlagen durch organische Stoßbelastungen gefährdet sind, ist es für deren Betrieb günstiger, ein größeres Belebungsbecken mit geringerem Schlammgehalt und dafür ein entsprechend kleineres Nachklärbecken zu wählen, als ein kleineres Belebungsbecken mit größerer Nachklärung einzusetzen. Dadurch wird auch der Erscheinung entgegengewirkt, dass es durch zu lange Aufenthaltszeiten in der Nachklärung zu unkontrollierten Denitrifikationsvorgängen und damit zum Schlammauftreiben kommt.

Andererseits begrenzt eine klein gehaltene Nachklärung die Mitbehandlung von Regenwasser, dem versucht man in der herkömmlichen Planung mit meist unangemessen groß gewählten Sicherheitskoeffizienten entgegenzuwirken,



damit auch bei Regenwetter der Schlamm Spiegel in der Nachklärung nicht so weit ansteigt, dass größere Mengen Belebtschlamm verloren gehen. Können das Nachklärbecken und die Rücklaufsteuerung nicht so ausgelegt werden, dass die erforderliche Regenwassermenge mitbehandelt werden kann, muss ein anderes Reinigungsverfahren, z. B. die Abwasserreinigung in Pflanzen-Kläranlagen mit richtigen Öko-Teichen, gewählt werden (dies würde aber den Rahmen dieser Arbeit sprengen, da deren ingenieurmäßige Umweltproblematik ganz andere Bereiche anspricht).

Besteht der Bioreaktor aus Tropfkörpern (Füllkörperkolonnen) oder aus rotierenden Scheibentauchanlagen (deren Füllkörper als Fläche zur Bildung des sich aus dem organischen Abwassersubstrat herausbildenden Biofilm/-Rasens dienen), so wird das Anhaften der Biomasse (des Biorasens) erheblich erleichtert. Daher beschränkt sich die Aufgabe der Nachklärung bei Bioreaktoren mit immobilisierter Biomasse darauf, aus der biologischen Stufe anfallende, technisch-absetzbare Partikel auf die für die Einleitung in den Vorfluter *zulässige* Menge zu verringern. Zusätzliche Aufgaben, wie Biomasse-Rückführung, Abspeicherung und Aufkonzentrierung des Schlammes, fallen bei solchen Anlagen aus. Hinzu fallen bei der Nachklärung von Tropfkörpern/Scheibentauchkörpern verfahrenstechnisch-bedingt auch wesentlich geringere Zulaufkonzentrationen an Suspensa an; lediglich einige Hundert Milligramm/Liter. Daraus resultiert auch eine an sich weitgehend geringere Fest-Flüssig-Trennproblematik. Einerseits trennen sich zugewachsene, abfallende Rasenteilchen/-Konglomerate im Vergleich zu Belebungsanlagen viel leichter/schneller vom gereinigten Abwasser, andererseits fließt das meist darin nur teil-biologisch gereinigte Abwasser in der Regel einer nach geschalteten zweiten Bioreinigungs und Nachklärstufe zu [1, 4, 5].

Abwassertechnische Anlagen mit immobilisierter Biomasse werfen bei deren Planung / Betrieb kaum ähnlich schwerwiegende Probleme des Biomasse-Verhaltens auf, da deren Nachklärbecken um eine Zehnerpotenz niedriger liegende Biomasse-Volumenströme zu bewältigen haben und wegen fehlender Biomasserückführung kaum noch eine starke Schlammaufkonzentrierung oder -speicherung zu gewährleisten haben.

Insofern ist für den Planer/Forscher die Erkundung der Absetzcharakteristika der Biomasse in Konzentrationsbereichen ab Hunderten Milligramm/Liter entscheidend, daher sollte die Bestimmung der Flockenabsetzeigenschaften auch in Suspensaschwärmen und nicht nur in Konzentrationsbereichen von einigen Milligramm/Liter erfolgen.

- **Merksatz:** *Verfahrenstechnisch zeichnet sich hierbei allerdings ab, dass letztendlich das ganze Biomasseverhalten, also modellmäßige Koppelung der Biomasse-Reaktionsgeschwindigkeit mit ihren Absetzcharakteristika in einem System: Bioreaktorart – Nachklärbecken angestrebt werden sollte.*

## Literaturverzeichnis

- 1 Schneider, Dries, Roth, Baumann, Drogig: Grundlagen für den Betrieb von Belebungsanlagen mit gezielter Stickstoff- und Phosphorelimination, Verlag ATV-DVWK, Stuttgart (2004).
- 2 Bischofberger, W., Ruf, M., Hruschka, H, Hegemann, W.: Anwendung von Fällungsverfahren zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit biologischer Kläranlagen Teil II, Berichte aus Wasserquote-wirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, München (1978), H 22.
- 3 Wolter C., Hahn, H, H: Absetzvorgänge in Vorklärbecken und deren Einflüsse auf die Leistung der biologischen Stufe, KA Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 2001(48) Nr. 3, S 541/348.
- 4 Benefield, L., D. and Randall, C., W.: Biological Process Design for Wastewater Treatment, Prentice-Hall, Inc., NJ 07632 (1980), S. 201/210.
- 5 Metcalf and Eddy: Wastewater Engineering, McGraw-Hill Book Company. Sec. Edition, New York (1979).

## Danksagung

Besonders herzlicher Dank, Anerkennung und Wertschätzung gelten dem früheren BASF-Direktor, Herrn Dr. rer. nat. Joachim Frost. Er erkannte schon Ende der 70er Jahre, dass die BASF Ludwigshafen zunehmend mit Problemen des allgemeinen Umweltschutzes konfrontiert werden würde. Seiner Weitsicht waren im Zusammenhang mit der Errichtung des mechanisch-biologischen BASF-Großklärwerks (1971) einige abwassertechnische Feld-Pilotvorhaben zu verdanken, die wiederum zu einer Reduzierung der geschätzten Investitionssumme von 220 Mill. DM führten. Meinen Kollegen, den BASF-Mitarbeitern Dipl.Math. Rolf Bautsch und Dipl.Math. Ferdinand Hafner, danke ich (Braha – damals frisch gebackener BASF-Mitarbeiter) herzlich für ihre kollegiale Haltung und die vielen Denkanstöße während unserer Zusammenarbeit bei der Durchführung dieser Feld-Pilotvorhaben.

Die aus diesen Arbeiten resultierenden Fachpublikationen erregten das Interesse des Verfahrenstechnikers Professor Dr.-Ing. Udo Wiesmann (TU Berlin), er ermöglichte mir (Braha) eine Promotion als externer Doktorand. Seiner anspruchsvollen Durchsicht der Dissertationsthese sowie dem wohlwollenden Einsatz seiner Feder ist es zu verdanken, dass die Dissertation (1986) nichts an Glanz und Deutlichkeit verlor.

Nicht weniger Anerkennung gebührt dem Wasserchemiker Dr. Nowak, Ottersberg, für die Zusammenarbeit bei Planungsaufträgen zur Klärwerkmodernisierung mehrerer städtischer Gemeinden und Industrien. Dabei kam die Modelldenkweise zur Anwendung und es wurde mit Mikropilotanlagen im Labormaßstab gearbeitet.

Anerkennung gebührt auch dem Bukarester Institut für Erforschung von Industrie-Abwässern (I.C.P.E.A.R), dessen Mitarbeiter die neue Methode des Denkens, Forschens und Auswertens in Modellkategorien schnell auffassten und ihren Studien für die neuen rumänischen Großklärwerke in Bukarest und Iasi zugrunde legten. Vor allem in die Bemessung der Belebungsanlagen flossen diese neu erworbenen Erkenntnisse ein.

Besonderer Dank gilt dem damaligen Dekan der Fakultät für Hydrotechnik (Bukarest), Professor Dr.-Ing. Dan Stematiu (heute zum TU-Oberrektor nominiert), einer wahrlich außergewöhnlichen Persönlichkeit. Ihm gelang es mit unglaublichem Erfolg einen Interprofessionalitätsaustausch zwischen dem Verfahrensingénieur Braha (Gastprofessor an der Bukarester TU für Bauwesen und

Maschinen (1991)) und dem Mathematiker Dr. Ghiocel Groza (damals Assistent, heute Ordentlicher Professor für Angewandte Mathematik, TU Bukarest) einzuleiten, der zu einer langjährigen Kooperation führte. Dieser langjährigen Zusammenarbeit sind über 20 gemeinsame Fachpublikationen entsprungen, so auch das in Ihren Händen liegende Handbuch.

Schlicht menschlich betrachtet verdanken wir Autoren unseren Ehefrauen Ioana Braha und Maria Groza doch wohl alles, da sie während all dieser Jahre dieses, einem alles abverlangende, Kreativefeuer mit liebevollem Verständnis unterstützten, und nicht zuletzt, weil bei nicht wenig Gezeichnetem und Geschriebenem, deren Glanzschliff ihren Federn entsprang!

Ihnen widmen wir Autoren dieses Buch.

Langenhagen, im Juni 2006

Die Autoren

# 1

## Mikrobiologische Grundzüge in der Bioverfahrenstechnik

Eine Einführung in die Bioverfahrenstechnik ohne Bezugnahme zur Mikrobiologie und zur Biochemie ist undenkbar. Obwohl die biologische Verfahrenstechnik auf den Prinzipien der allgemeinen Verfahrenstechnik und gleichzeitig auf der damit verbundenen Tradition der Siedlungswasserwirtschaft, d.h. auf deren ungeheuren Mengen an empirischem Datenmaterial und Beobachtungen aufbaut, sind es doch gerade die aus dem Verständnis für die Mikrobiologie sowie aus dem Zusammenwirken von Biologie und Verfahrenstechnik abgeleiteten Besonderheiten, die das Gebiet der Bioverfahrenstechnik so anspruchsvoll, aber auch so interessant machen. Um biologische Verfahrenstechnik betreiben zu können, ist ein grundlegendes Verständnis der spezifischen mikrobiologischen und biochemischen Faktoren und Anforderungen notwendig, welches diesen neu entstandenen Zweig „Bioverfahrenstechnik“ prägt und ihn von der chemischen oder mechanischen Verfahrenstechnik unterscheidet. Es wäre an dieser Stelle verfehlt, all diese Aspekte umfassend zu behandeln. Dafür gibt es Monographien aus berufener Feder, wie u. a. [3–5]. Vielmehr werden hier zweckgerichtet jene mikrobiologischen Aspekte angesprochen, die für die später behandelten verfahrenstechnischen Zusammenhänge relevant sind. Der Biochemiker oder der Mikrobiologe möge diesen Abschnitt überspringen; der angehende Siedlungswasserbauer oder Verfahrenstechniker sowie auch der Entwicklungsingenieur und der Apparatebauer, welcher zum ersten Mal mit technischer Biologie konfrontiert wird, mag darin Erläuterungen finden, welche seinen Aufgaben dienlich sein können.

### 1.1

#### Form und Gestalt der Mikroorganismen in Ökosystemen und in der industriellen Biotechnologie

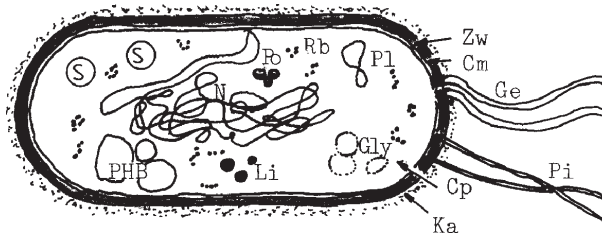
Aus der Sicht der Mikrobiologen lassen sich hierzu folgende Aspekte nennen, die für den Bioverfahrenstechniker von Bedeutung sein können: Form und Gestalt der Mikroorganismen, der Stoffwechsel und die Energetik mikrobieller Stoffumwandlungsprozesse, Bakterienwachstum und die Regulation biologischer Vorgänge [3]. So lassen sich die Mikroorganismen aufgrund ihrer Zellstruktur in zwei abgrenzbare Gruppen unterteilen. Die erste Gruppe umfasst höher, d.h. stärker differenzierte Mikroorganismen, die Eukaryoten, deren Zellorganisation

derjenigen der Tiere und Pflanzen gleicht. Hierzu gehören Algen, Pilze und Protozoen. Die zweite Gruppe wird von den niederen Mikroorganismen, den Prokaryoten, gebildet; zu diesen gehören die Bakterien, denen aufgrund ihrer erheblichen Bedeutung in der Ökobiotechnologie der Schwerpunkt nachfolgender Ausführungen eingeräumt wird.

1.1.1

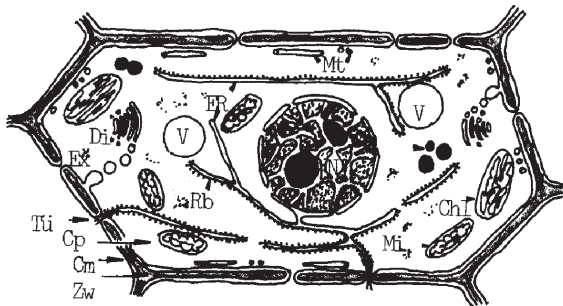
**Eukaryotische und prokaryotische Zellen und ihre Struktur**

Es gibt eine große Anzahl verschiedener Arten von Eu- und Prokaryoten, die zusammen eine systematische Ordnung bilden. In den Prokaryoten hat man Relikte aus der Frühzeit der organischen Evolution zu sehen und ihre Entwicklung zu den Eukaryoten stellt die größte Diskontinuität in der Evolution der Organismen dar [3]. Die prinzipielle Struktur der Prokaryoten und der Eukaryoten ist aus Abb. 1-1 und Abb. 1-2 zu ersehen.



**Abb. 1-1:** Schematisches Längsschnittbild einer prokaryotischen Zelle (Bakterienzelle) und die Typen der intracytoplasmatischen Membranstrukturen. Cm - Cytoplasmamembran; Cp - Cytoplasma; Ge - Geißel; Gly - Glykogengranula; Ka - Kapsel;

Li - Lipidtropfen; N - Nucleus oder Kern; PHB - Poly-beta-hydroxybuttersäure; Pi - Pili; Pl - Plasmid; Po - Polyphosphatgranula; Rb - Ribosomen und Polysomen; S - Schwefeleinschlüsse; Zw - Zellwand; nach [3].



**Abb. 1-2:** Kombiniertes schematisches Längsschnittbild einer eukaryotischen Zelle (Pflanzenzelle). Notationen: Chl - Chloroplasten; Cm - Cytoplasmamembran; Cp - Cytoplasma; Di - Dictyosomen; ER - Endoplasmatisches

Reticulum; Ex - Sekretionsvesikeln (Exocytose); Li - Lipidtropfen; Mi - Mitochondrien; Mt - Mikrotubuli; N - Nucleus oder Kern; Rb - Ribosomen; Tü - Tüpfel mit Plasmodesmen; V - Vakuolen; Zw = Zellwand; nach [3].

Die wichtigsten morphologischen Unterschiede verschiedener Zelltypen werden in der Tab. 1–1 zusammengetragen und nachstehend kurz kommentiert.

**Tabelle 1–1:** Morphologische Unterschiede verschiedener Zelltypen; nach [7].

Zelltyp	Größenordnungen	Besonderheiten
Prokaryotische Mikroorganismen	1 $\mu\text{m}$ Zellvolumen etwa $10^{-12}$ ml Zellmasse etwa $10^{-12}$ g	viele Zellformen möglich, Einzeller oder Mycelbildner, sehr einfach organisierte Zellen, im Lichtmikroskop schwer differenzierbare Zellkomponenten, schnell wachsend
Eukaryotische Mikroorganismen	10 $\mu\text{g}$	Einzeller oder Mycelbildner, im Lichtmikroskop gut beobachtbar (Zellstrukturen), können morphologisch komplizierte Formen annehmen
Pflanzenzellen	50 $\mu\text{m}$	fragil, langsam wachsend
Tierische Zellen	50 bis 100 $\mu\text{m}$	sehr fragil (keine Zellwände), wachsen sehr langsam

Jede Zelle besteht aus dem Cytoplasma, einer kolloidalen Suspension von Proteinen, Hydrocarbonaten und anderen komplexen Komponenten, wie die zur Synthese von Proteinen benötigte Ribonukleinsäure (RNA), sowie Kernmaterial, welches seinerseits überwiegend den Erbgutträger, die Desoxyribonukleinsäure (DNA), beinhaltet. Sie wird nach außen hin von einer Zellwand, die vorwiegend mechanische Funktion erfüllt, umhüllt; das ist bei den Pflanzenzellen und den meisten Bakterien der Fall [3–5].

Bei Eukaryoten ist die DNA ausschließlich auf einer Anzahl von Untereinheiten, den Chromosomen, im Zellkern verteilt [3], wohingegen bei Prokaryoten und insbesondere bei Bakterien auch extrachromosomale DNA-Ringe, Plasmide, als Erbgutträger nachgewiesen worden sind [3], die bevorzugt Träger von resistenten (erworbenen) Eigenschaften sind, wie z. B. gegen Schwermetalle, Antibiotika, Chemotherapeutika, toxische organische Verbindungen (AOX, PCB, etc.) [6].

Für die Eucyten ist eine ausgeprägte Unterteilung des Cytoplasmas, dieser aus Plasmagrundsubstanz, d. h. aus vorwiegend Enzymen und Ribonukleinsäure (RNA) bestehenden Flüssigkeit, in eine Vielzahl von Reaktionsräumen charakteristisch, die durch die Einstülpungen der Cytoplasmamembran gebildet werden, wohingegen bei den Protocyten durch die Cytoplasmamembran zur Zellwand hin das Cytoplasma abgeschlossen wird, in welchem lediglich Zelleinschlüsse, so genannte Vesikeln, und der Zellkern eingebettet sind.

Sowohl bei Eukaryoten wie auch bei Prokaryoten und vor allem bei Bakterien ist die Zellwand nicht starr sondern elastisch. Der Innendruck der Zelle ist osmotisch bedingt, wobei die osmotisch wirksame Schranke die Cytoplasmamembran ist; sie ist

semipermeabel und kontrolliert den Ein- und Austritt gelöster Substanzen. Demgegenüber ist die Zellwand für Salze und zahlreiche niedermolekulare Substanzen durchlässig [3]. Da die Mehrheit der unter den Aspekten des Stoffwechsels und der Energetik betrachteten biochemischen Reaktionen im Innern der Zelle stattfinden, müssen auch die Reaktionspartner, z. B. Kohlenstoffquelle und Sauerstoff, sowie die Stoffwechselprodukte an den Ort, sind daher intrazellulär, d. h. in einem sehr eng definierten Verhältnis, zu halten. Nur so verlaufen Stoffumsetzungen in der Zelle optimal. Außerhalb der Zelle (extrazellulär) allerdings liegen die gleichen Substanzen oft in ganz anderen Konzentrationen vor. Der Verfahreningenieur muss bei Stofftransportberechnungen solche biologischen Transportphänomene berücksichtigen, indem er der eigentlichen Zellgrenzschicht für den selektiven Transport der Nährstoffe in das Zellinnere hinein oder aus diesem heraus – der Cytoplasmamembran – und den dabei beteiligten Diffusionsmechanismen Rechnung trägt [7].

### 1.1.2

#### **Grund- und Regulationsmechanismen des Stoffwechsels und der Energieumwandlung**

Die stoffwechselphysiologischen Vorgänge, die sich in Bioreaktoren abspielen, vollziehen sich über biochemische Reaktionsketten, welche grundsätzlich von verschiedenen Enzymen (Proteine oder mit Proteinen kombinierte anorganische Moleküle) der Bakterienzelle katalysiert werden [3, 5, 8]. In Abhängigkeit vom Nährstoffangebot (Substrat) werden die aufgenommenen Substanzen dem Betriebsstoffwechsel (Katabolismus), respektive Baustoffwechsel (Anabolismus) zugeführt. Der erste hat die Aufgabe, der Bakterienzelle energiereiche Verbindungen, wie die Adenosintriphosphatsäure (ATP), die als energiereiches Phosphat als Elementarquantum [3] der biologischen Energie zwischen Energie erzeugenden und Energie verbrauchenden Vorgängen fungiert, zur Verfügung zu stellen und so den benötigten Energiebedarf für den Baustoffwechsel, d. h. für Bakterienwachstum und -vermehrung, zu sichern. Das prinzipielle Ablaufschema solcher Stoffumwandlungsprozesse wird in Abb. 1–3 dargestellt.

Die Stoffumsetzungen in der Zelle werden von Enzymen, welche dabei die Rolle eines (Bio)Katalysators spielen, besorgt. Die wesentlichsten Merkmale eines solchen Enzymproteins sind das Erkennen der betreffenden Substratkomponente(n), die Katalyse und die Regulierbarkeit der katalytischen Aktivität. Jedes Enzym ist also durch eine bestimmte Substratspezifität und eine bestimmte Wirkungsspezifität ausgezeichnet [3]. Da ein solches Enzym als Biokatalysator fungiert, vollzieht sich die Kette biochemischer Reaktionen nicht nur bei einer erniedrigten Aktivierungsenergie und normalen Temperaturen, sondern auch mit Reaktionsgeschwindigkeiten, die um etwa zehn Potenzen (!) höher liegen als die nicht enzymatischer Reaktionen. (Näheres über Enzym katalysierte Reaktionsmechanismen und assimilatorische und dissimilatorische Prozesse ist dem Abschnitt 1.2.2.3 zu entnehmen.)

Eine ganz wesentliche, erst im letzten Jahrzehnt von den Biochemikern entdeckte, Eigenschaft der Enzyme ist die steuerbare Veränderlichkeit ihrer katalyti-



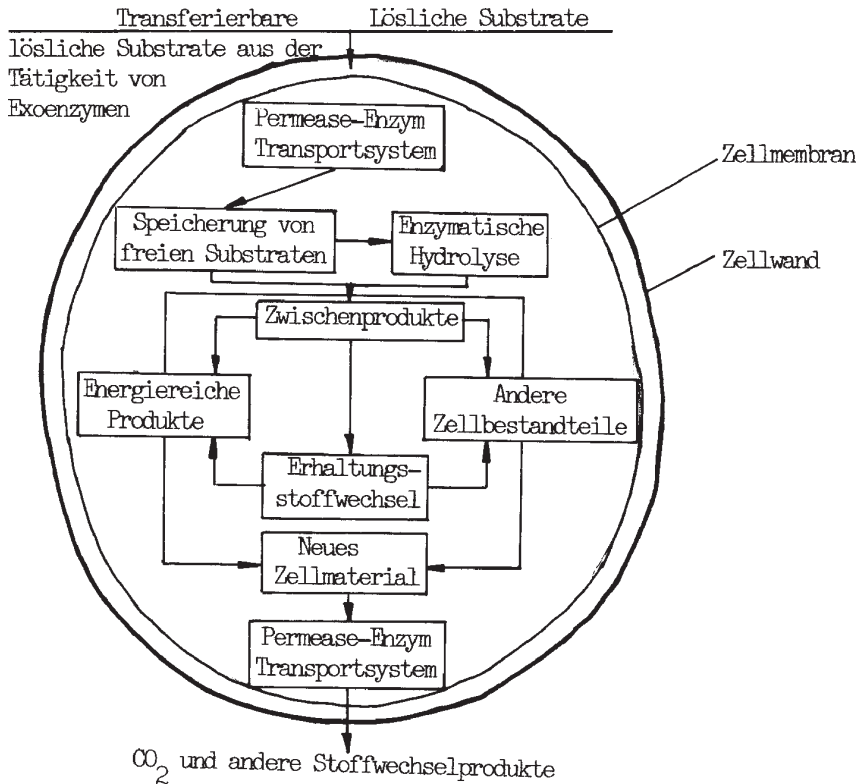


Abb. 1-3: Stoffwechselvorgänge in der Bakterienzelle; nach [8].

schen Aktivität. So wird mittels eines „katalytischen Zentrums“, zumindest in gewissen Enzymen, nicht nur die betreffende Substratkomponente metabolisiert, sondern auch das entsprechende Endprodukt der Reaktionskette oder andere niedermolekulare Verbindungen, deren Einflussnahme auf die Enzymaktivität sinnvoll ist, „erkannt“ [3].

Bei Anpassung an ein bestimmtes Substrat werden somit zwei Vorgänge wirksam: die phänotypische Adaption (enzymatische Anpassung) und die genotypische Adaption (Anpassung durch Selektion). Bei ersterer stellt die Zelle ihr Enzymmuster auf die Verwertung der im Substrat befindlichen organischen Stoffe ab. Die Regulation dieser Vorgänge erfolgt über genetisch festgelegte Mechanismen, die als Enzymaktivierung, -inhibierung und Repression in der Bakterienphysiologie bezeichnet werden [3–5, 7, 8]. Hiermit wird auch sichergestellt, dass die Reihenfolge der Aufnahme der einzelnen verwertbaren Substanzen einer Steuerung unterliegt, wobei in der Regel über eine katabolische Repression [3] zuerst jene Substratkomponente metabolisiert wird, welche auch die höchste Wachstumsrate ermöglicht. Dieser sequentielle Abbau im Falle von Multikomponentensubstraten wird als *Diauxie* bezeichnet [3, 5, 8]. Zum Erscheinungsbild der phänotypischen Adaption gehört schließlich auch die Bildung von Exoenzymen,

die den ersten Schritt des mikrobiologischen Angriffs auf das Substrat bilden und hierzu meist nur einen geringen Zeitbedarf von Minuten bis Stunden erfordern, um eine entsprechende Änderung des Enzymmusters herbeizuführen. Die genotypische Adaption hingegen beinhaltet die artliche Auswahl (Selektion) jener am besten für den Abbau einer bestimmten Substratkomponente geeigneten Mikroorganismenpopulation. Besonders bei schwer abbaubaren Substraten (Industrieabwässern) setzt daher ein erheblicher Selektionsdruck ein, wodurch entsprechende, zeitlich bedingte Speziesprädominanzen entstehen [9]. Dieser Adaptionsvorgang nimmt einen erheblich längeren Zeitraum in Anspruch (mehrere Wochen) und führt in der Regel zur Bildung voll akklimatisierter Bakterienstämme. Alle diese Regelmechanismen haben im Prinzip zur Folge, dass die Mikroorganismen ihre Nährstoffe sparsam verwenden, keine Energie verschwenden und keine unnötigen Stoffe bilden. Eine Chance der biologischen Verfahrenstechnik besteht nun aber gerade darin, abnormes Regelverhalten für technisch interessante Prozesse auszunutzen. So kann z. B. die Ausscheidung vieler Stoffwechsel- und Sekundärmetabolite als Folge einer Fehlregulation (z. B. Überproduktion) des Stoffwechsels betrachtet werden [8].

Unter der Voraussetzung, dass von einem Organismus die Stoffwechselwege sowie deren Regulation bekannt sind, kann somit ein Hochleistungsstamm selektioniert werden. Der Biotechnologe macht sich hierbei zunutze, dass fehlregulierte Mutanten den einen oder anderen Stoff überproduzieren, anhäufen oder ausscheiden [7]. Für den Bioverfahrenstechniker ist es wichtig zu wissen, dass sowohl Substrate wie auch Endprodukte stimulierend (Effektoren) in die biologische Regulation eingreifen können. Dies wirkt sich oft in einer Herabsetzung der Reaktionsgeschwindigkeit und damit in einer Minderbildung des gesuchten Produktes (geringere Reinigungsleistung in der biologischen Abwassertechnik) aus.

Die Kenntnis der Regulationsmechanismen eröffnet somit große Möglichkeiten zur Steigerung der Raum-Zeit-Ausbeute, wozu zuallererst die Genetiker angesprochen werden, da das Auffinden einer Mutanten, welche sich durch das vorher erwähnte abnormale Regulationsverhalten auszeichnet, für einen technischen Prozess äußerst Erfolg versprechend sein kann [7]. Auf diese in der allgemeinen Biotechnologie und nicht zuletzt in der Ökobiotechnologie (Klärtechnik) immer mehr an Bedeutung gewinnende Thematik wird nachstehend kurz eingegangen.

### 1.1.3

#### **Mutation und Erbgutübertragung**

Eine Mutation ist eine zufällige oder für einen technischen Prozess erzeugte (hochgezüchtete) Veränderung des Erbgutes einer Zelle, welche auf die Nachkommen dieser Zelle vererbt wird. Bis zu einem gewissen Grad treten Mutationen spontan auf. Die natürliche Mutationsrate ist allerdings sehr gering; sie liegt bei einer Mutation pro  $10^6$  Genduplikationen [6].

Erheblich bedeutsamer als diese natürliche Mutation ist die Erzeugung von Mutanten mittels chemischer oder/und physikalischer Methoden (induzierte Mutation) sowie durch Anwendung gentechnologischer Eingriffe. Letzteres ist

eine Errungenschaft neuester Zeit; man nennt sie auch Rekombinationstechnik oder, etwas polemischer, Genmanipulation. Sie basiert im Wesentlichen darauf, dass mit Hilfe komplizierter Verfahren eine ganz spezifische Erbinformation aus dem Erbgutträger (Genom) einer Zelle herausgeschnitten und in das Genom einer anderen Zelle eingebaut wird; mit dieser „Gentechnologie“-Technik wird noch ein zukunftsreiches, selbständiges Gebiet auf uns zukommen [10] und dessen muss sich der Bioverfahrenstechniker bewusst sein. Man denke nur an die Herstellung billiger Proteinmasse aus zurzeit minderwertigen Rohstoffen.

In der Ökobiotechnologie stellt sich das Problem des Herauszüchtens mutierter Bakterien durch genotypische Adaption zum biologischen Abbau spezieller, schwer abbaubarer Inhaltsstoffe aus Industrieabwässern weniger kompliziert, dennoch nicht weniger wichtig, dar. So zeichnet sich in der Abwassertechnik seit einigen Jahren der Trend des Übergangs von ein- zu mehrstufigen biologischen Reinigungsverfahren ab [11–13], indem man die Spezialisierung von Bakterienstämmen auf leicht abbaubare (1. Stufe) und schwer abbaubare (2. Stufe) Substratkomponenten durch Trennung der entsprechenden Biozönose-Kreisläufe einführt und sich die große Mutationsrate der in der ersten Stufe vorhandenen Mikroorganismen zunutze macht [11]. Es wird hierbei auf die rasche Anpassung der Protocyten auf mutagen wirkende (Ver)Änderung des Substrates sowie die Vererbung resistenter Eigenschaften über in der Zelle frei schwimmende Plasmide (DNA-Ringe) auf nicht Plasmid tragende Bakterien hingewiesen, was durch Trennung von den langsamer wachsenden und Bakterien fressenden Eukaryonten eine hohe Vermehrungs- und Mutationsrate der in der 1. Stufe tätigen Prokaryonten bewirkt [11].

Es liegt daher auf der Hand, dass die Entwicklung solcher, auf einen gewissen Anteil des Substrates hoch spezialisierter, Mikroorganismen zu anderen Werten von Prozessparametern – und das will heißen auch zu unterschiedlichen Substratabbaugeschwindigkeiten in dem betreffenden Bioreaktor – als im Falle der Einstufigkeit führt. Ein ähnlicher, nicht aber identisch verlaufender sequentieller Abbau findet auch in einer mehrstufigen Kaskadenschaltung [14] statt, obwohl es sich diesmal um einen einzigen Biomasserücklauf handelt. Auch hierbei dürfte die mikrobiologische Anpassung an das abzubauen Substrat eine Rolle spielen, sich allerdings in die Richtung einer phänotypischen bewegend, und nicht, wie bei getrennten Biomasserückführungen, überwiegend auf genotypischer Adaption basierend.

Die Strategie der Selektion/Anpassung von mutierten Bakterienstämmen ist von größter Bedeutung für die weitere Aufklärung des Zellstoffwechsels und zur Erkennung der Mechanismen der Regulation in der allgemeinen Biotechnologie, da sie die Wege für eine bewusste Selektion von Hochleistungsmutanten für die Produktion aller Substanzen weist, die mit Hilfe von Mikroorganismen gewonnen werden können [3]. Ähnlich stellt sich das Problem bei der Heranzüchtung mutierter Bakterienstämme in der Ökobiotechnologie dar, wodurch in Bioreaktoren höhere Raum-Zeit-Ausbeuten und ein weitergehender Abbau biologisch schwer abbaubarer Substratkomponenten erreicht werden können [11, 12].

## 1.2

### Bioverfahrenstechnische Aspekte des Stoffwechsels

In der allgemeinen Biotechnologie dient der Einsatz mikrobiell verlaufender Prozesse zuallererst der *Gewinnung* von Reaktionsprodukten. In der Ökobiotechnologie hingegen liegt der Schwerpunkt auf der *Vernichtung* organischer Substratkomponenten durch mikrobiellen Abbau respektive darin, durch deren Oxidation oder Reduktion eine Überführung in anorganische und die Umwelt weniger belastende Endprodukte zu bewirken. Der hiermit einhergehende Biomassezuwachs stellt ein unerwünschtes Reaktionsprodukt dar, da dieses wiederum entsorgt, d. h. entwässert und deponiert oder getrocknet und verbrannt werden muss (vgl. Abschnitt 1.2.2). Dementsprechend haben sich auch die technologischen Aspekte bei der Prozessanalyse zu richten, worauf nachstehend kurz eingegangen wird.

#### 1.2.1

##### Produktionsverfahren

###### 1.2.1.1 Biomassegewinnung

Unter Biomasse versteht man die in einem technischen Prozess gewachsenen Zellen, wobei es sich sowohl um Bakterien- und Hefezellen als auch um Myzelien oder Algenzellen handeln kann. Der Hauptrohstoff für die Mehrzahl technisch relevanter Verfahren zur Herstellung mikrobieller Biomasse ist das Kohlenstoff enthaltende Substrat (Kohlenstoffquelle). Darunter fallen [7]:

- Zuckerhaltige Rohstoffe (Melasse, Molke, Kartoffeln, Mais, Sulfitablauge, etc.),
- Cellulose (grüne Biomasse), welche z. B. mittels spezifischer Enzyme (Cellulosen) zur Herstellung von Glucose-Sirup eingesetzt werden kann,
- n-Alkane und Methanol als Rohstoff zur Herstellung von mikrobiellem Protein.

###### 1.2.1.2 Biosynthese von Stoffwechselprodukten

Stoffwechselprodukte werden eingeteilt in Primärmetabolite (Aminosäuren, Nukleotide, Nukleinsäure, etc., d. h. die niedermolekularen Bausteine der Zelle) und Sekundärmetabolite (Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen, Pflanzen oder Tieren), für die keine Funktion im Stoffwechsel erkennbar ist [7]. Zu den wichtigsten Primärmetaboliten gehören u. a.:

- Alkohole, Ketone, Säuren, Methan,
- Aminosäuren, Nukleotide,
- Vitamine, Polysaccharide.

Durch die sprunghaft gestiegenen Energiepreise haben sich die auf mikrobieller Basis arbeitenden Herstellungsverfahren gegenüber den chemischen Syntheseverfahren der Petrochemie als konkurrenzfähig erwiesen. Diese Situation wird

zugunsten der Biotechnologie noch stärker verbessert, wenn man Abfallprodukte oder preisgünstige Rückstände aus der Verarbeitung landwirtschaftlicher Erzeugnisse als Rohstoffe einsetzt; Einzelheiten hierüber in [4]. Sekundärmetabolite ihrerseits zeigen in Bezug auf die chemische Struktur eine außerordentliche Mannigfaltigkeit, da darunter sowohl aliphatische, aromatische und heterocyclische Verbindungen als auch Aminosäure-, Peptid- und Zuckerderivate fallen. Die werden wie Biopolymere der Zellen aus Substanzen des Primärmetabolismus aufgebaut und sind deshalb mit dessen Sequenzen eng verbunden [4]. Die Herstellung von Sekundärmetaboliten stellt meist hohe Anforderungen an die Verfahrensingenieure, da die Herstellungsprozesse in den Bioreaktoren den Umgang mit nicht newtonschem Verhalten aufweisenden Nährlösungen oder Kultivationsbrühen bedingen [7]; Näheres hierüber in [4].

### 1.2.1.3 Biotransformation

Unter Biotransformation versteht man ein- oder mehrstufige Reaktionen, bei denen mit Hilfe von Mikroorganismen oder den daraus isolierten Enzymsystemen eine Substanz in eine andere umgewandelt wird. Hierunter fallen: Hydroxilierung an verschiedenen Positionen, Einführung einer Dehydrierung, Isomerisierung und Aromatisierung [4, 7].

Die Biotransformation weist einige Vorteile gegenüber der chemischen Transformation und Synthese auf, zu denen die „sanfte Chemie“, d. h. der Ablauf der Reaktionen unter milden Temperatur- und Druckbedingungen, gehört. Hinsichtlich der Verfahrensform lassen sich Biotransformationen einteilen in [15]:

- Biotransformation mit fixierten Zellen,
- Biotransformation mit isolierten und immobilisierten Enzymen,
- Biotransformation mit wachsenden Zellen.

Die neuste Entwicklung geht eindeutig in die Richtung fixierten Biomaterials [16]. Bei dieser Art des Vorgehens wird nämlich die Transformationskapazität der Zellen besser genutzt als bei Verwendung freier Zellen. Ferner wird die Prozessstabilität und damit auch die Raum-Zeit-Ausbeute des Reaktors verbessert [7]. Einzelheiten hierüber in [4, 7, 15, 16].

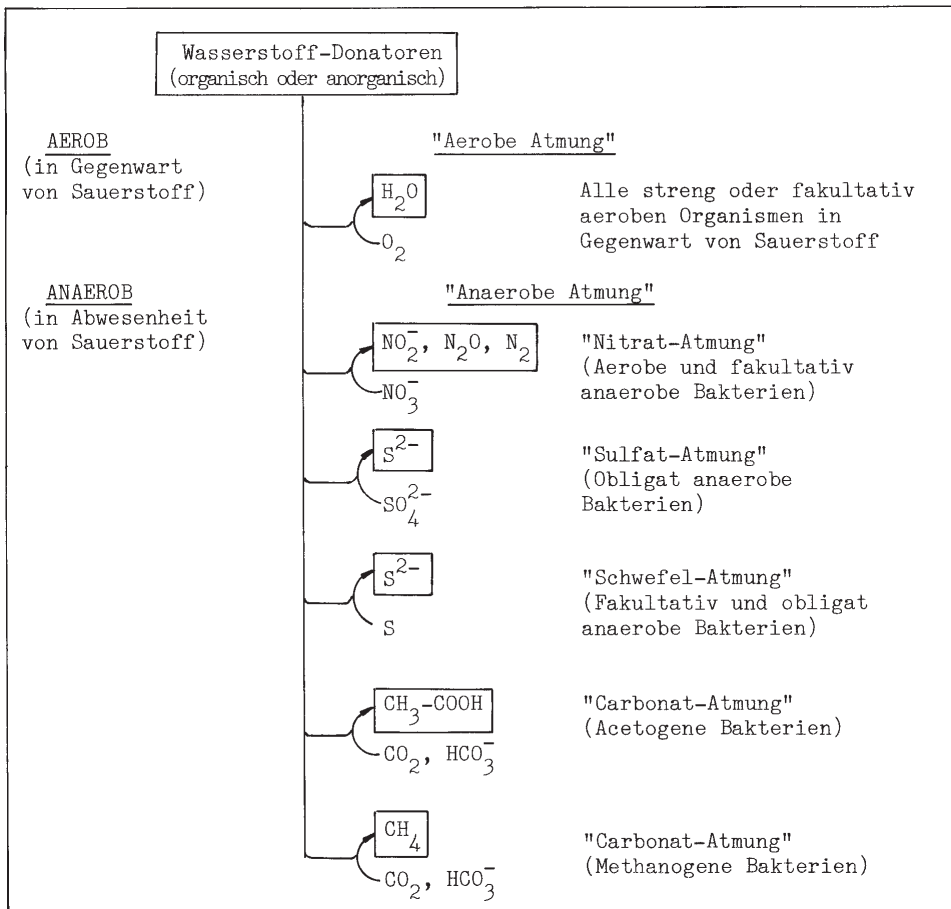
### 1.2.1.4 Industrieller Einsatz von Biomasse an natürlichen Standorten (Erzlaugungsverfahren)

Im Unterschied zu allen bisher genannten mikrobiellen Prozessen, welche als Monokultur in oft sterilisierten Bioreaktoren ablaufen, wird dieses Verfahren am natürlichen Standort im Biobergbau in großem Ausmaß eingesetzt. Entsprechend den Lagerstätten, dem pH-Wert und der Temperatur der Umgebung stellen sich unterschiedliche Speziesprädominanz in der Mischkultur ein [7].

## 1.2.2

**Substratabbau**

Bei den speziell in der Klärtechnik hierfür eingesetzten Verfahren handelt es sich um eine die Natur nachahmende, technisch aber intensivierte Destruktion von gelösten organischen Substratkomponenten (biologische Reinigung). Hierzu gehören als Extremfälle die aeroben (unter Zufuhr von Sauerstoff) und anaeroben (unter Ausschluss von Sauerstoff) Reinigungsverfahren. Zwischen diesen zwei Grenzen liegen die anoxischen und aerob-anaerob-fakultativen Prozesse, bei denen man von einer „anaeroben Atmung“ [3], wie „Nitratatmung“, „Sulfat-atmung“, „Carbonat-atmung“ und anderen sprechen kann (Abb. 1–4).



**Abb. 1–4:** Prozesse der Energiegewinnung durch Elektronentransportphosphorylierung unter aeroben und anaeroben Bedingungen, auch „aerobe Atmung“ und „anaerobe Atmung“ genannt; nach [3].