

WTB

---

BAND 290

*Wolfgang Fritsche*

# Umwelt-Mikrobiologie

Mikrobiologie des Umweltschutzes  
und der Umweltgestaltung

WTB

---

BAND 290

*Wolfgang Fritsche*

# Umwelt-Mikrobiologie

Mikrobiologie des Umweltschutzes  
und der Umweltgestaltung

Mit 70 Abbildungen und 4 Tabellen



AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

## Reihe BIOLOGIE

Herausgeber:

Prof. Dr. H. Bochow, Berlin  
Prof. Dr. H. Böhme, Gatersleben  
Prof. Dr. E. Hofmann, Leipzig  
Prof. Dr. J. O. Hüsing, Rerik  
Prof. Dr. U. Taubeneck, Jena

Verantwortlicher Herausgeber dieses Bandes:

*Prof. Dr. U. Taubeneck*

Verfasser:

*Prof. Dr. sc. nat. W. Fritsche*  
Jena

ISSN 0084 - 0963

1985

Erschienen im Akademie-Verlag • Berlin, DDR-1086 Berlin, Leipziger  
Str. 3—4

© Akademie-Verlag Berlin 1985

Lizenznummer: 202 · 100/475/85

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: VEB Druckhaus „Maxim Gorki“, 7400 Altenburg

Lektor: Christiane Grunow

LSV 1344

Bestellnummer: 763'212 8 (7290)

01250

## Vorwort

Die Umwelt-Mikrobiologie befaßt sich mit mikrobiellen Aktivitäten, die für den Schutz, die Erhaltung und Gestaltung der menschlichen Umwelt von Bedeutung sind. Unter Umwelt ist die Gesamtheit der Faktoren zu verstehen, von denen die Existenz der Lebewesen abhängt. Die Umwelt des Menschen umfaßt also sowohl die natürlichen als auch die vom Menschen beeinflussten und gestalteten Bereiche der Erde. Die wissenschaftliche Fundierung der Maßnahmen zum Umweltschutz und zur Umweltgestaltung erfordert die Mitarbeit aller Wissenschaftsdisziplinen. Durch interdisziplinäre Zusammenarbeit ist ein System von Lösungen zu erarbeiten, das der Komplexität und Langfristigkeit der Aufgabe gerecht wird. Diese Lösungen müssen sowohl dem Anliegen einer sauberen und gesunden als auch produktiven Umwelt Rechnung tragen. Umweltschutz, Gesundheitsschutz, Sicherung der Ernährung und Rohstoffversorgung sind als Einheit zu verstehen.

In diesem Taschenbuch werden die Rolle der Mikroorganismen bei den in der Umwelt ablaufenden Stoffkreisläufen behandelt und Möglichkeiten aufgezeigt, mit Hilfe von Mikroorganismen zur Lösung von Umweltproblemen beizutragen. Die Mikroorganismen verfügen über ein breites Spektrum von Abbau- und Syntheseleistungen, das für Umweltbelange von Bedeutung ist. Wenn es darum geht, diese Leistungen gezielt für die optimale Gestaltung der Umwelt anzuwenden, stößt man schnell auf Grenzen des derzeitigen Erkenntnisstandes. Das Verhalten und die Aktivitäten von Mikroorganismen in Natur und Umwelt sind unzureichend erforscht. Das trifft in besonderem Maße für komplexe Systeme zu, wie sie in Form von Mikrobengesellschaften mit vielfältigen Interaktionen in einer sich ständig wandelnden Umwelt vorkommen. Es fehlen vor allem theoretische Grundlagen und Methoden, die zu quantifizierbaren Aussagen führen. Diese sind notwendig, um

Umweltveränderungen durch anthropogene Einflüsse vorauszu-  
sehen und negativen Nebenwirkungen und Spätschäden auf Öko-  
systeme vorbeugend zu begegnen. Nur auf ökologischer Basis  
können ökonomisch vertretbare Biotechnologien des Umwelt-  
schutzes und der Umweltgestaltung entwickelt werden, bei denen  
die Naturkräfte wirksamer genutzt werden. Es ist ein Anliegen des  
Buches, zu einer verstärkten Bearbeitung umweltrelevanter  
Grundlagen der Mikrobiologie anzuregen.

Umwelt-Mikrobiologie ist ein Teilgebiet der angewandten Mikro-  
benökologie. Auf die Behandlung der allgemeinen mikrobiellen  
Ökologie als Grundlage der Umwelt-Mikrobiologie wurde weit-  
gehend verzichtet, da darüber in der letzten Zeit mehrere Mono-  
graphien erschienen sind, u. a. von CAMPBELL in dieser Schriften-  
reihe. Ebenso werden Belange der medizinischen Mikrobiologie  
und Hygiene, der Nahrungs- und Futtermittelmikrobiologie und  
der Toxikologie nicht berücksichtigt. Mikroorganismen als umwelt-  
belastende Faktoren werden nur in Zusammenhang mit dem  
Fremdstoffmetabolismus behandelt.

Fortschritte in der Umweltforschung werden in entscheidendem  
Maße von der Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern, Agrar-  
und Forstwissenschaftlern, Wasserwirtschaftlern und Technologen  
abhängen. Es wurde daher versucht, das Buch so abzufassen, daß  
es auch für Vertreter dieser Disziplinen verständlich ist. Ab-  
schließend sei dem Wunsch Ausdruck gegeben, daß die Ausfüh-  
rungen zu einem tieferen Verständnis ökologischer Prozesse bei-  
tragen mögen. Es ist eine Voraussetzung für ein weitsichtiges  
umweltbewußtes Handeln.

Abschließend möchte ich den Herren Prof. Dr. TAUBENECK,  
Jena, und Herrn LÜTKE, Berlin, für wertvolle Anregungen und  
kritische Hinweise sehr danken.

W. FRITSCHÉ

## **Inhalt**

<b>1.</b>	<b>Einleitung: Umweltprobleme und mikrobielle Potenzen . . .</b>	<b>9</b>
1.1.	Komplexität der Umweltprobleme . . . . .	9
1.2.	Mikrobiologische Beiträge zur Umweltgestaltung . . . . .	11
1.2.1.	Entlastung von Ökosystemen . . . . .	11
1.2.2.	Abwasserreinigung . . . . .	16
1.2.3.	Abproduktnutzung . . . . .	18
1.2.4.	Umweltgemäße Pestizide . . . . .	21
1.2.5.	Bodenfruchtbarkeit . . . . .	23

## **Grundlagen**

<b>2.</b>	<b>Umweltrelevante Prinzipien der Mikrobenökologie . . . . .</b>	<b>26</b>
2.1.	Wesen der Mikroorganismen . . . . .	26
2.2.	Wesen der Ökosysteme . . . . .	27
2.3.	Spezialisierung durch mikrobielle Anpassungsstrategien . . .	30
2.4.	Ökonomische Substratverwertung durch Stoffwechselregulation . . . . .	33
2.5.	Antagonistische Prinzipien: Konkurrenz, Amensalismus, Parasitismus, Räubertum . . . . .	36
2.6.	Koexistenz und positive Interaktionen: Kommensalismus, Protokooperation, mutualistische Symbiose . . . . .	38
2.7.	Mikrobielle Sukzessionen und Ökosysteme . . . . .	47
<b>3.</b>	<b>Mikrobieller Abbau von Naturstoffen: Rezirkulation des Kohlenstoffes. . . . .</b>	<b>44</b>
3.1.	Kohlenstoff-Kreislauf und Sauerstoff-Umsatz . . . . .	44
2.2.	Aerobe Abbauprozesse . . . . .	48

3.3.1.	Langsam abbaubare Naturstoffe: Cellulose und Lignin . . . . .	50
3.2.2.	Abbau aromatischer Kohlenwasserstoffe. . . . .	54
3.3.	Anaerobe Abbauprozesse . . . . .	56
3.3.1.	Gärungen . . . . .	58
3.3.2.	Anaerobe Atmungen: Nitrat- und Sulfatatmung . . . . .	59
3.4.	Methanogenese und der Methan-Kohlendioxidzyklus . . . . .	62
<b>4.</b>	<b>Mikrobieller Abbau von organischen Fremdstoffen.</b> . . . .	<b>67</b>
4.1.	Zur Fremdstoff-Problematik . . . . .	67
4.2.	Prinzipien des mikrobiellen Fremdstoffmetabolismus . . . . .	70
4.2.1.	Strukturelle Ähnlichkeit mit Naturstoffen . . . . .	71
4.2.2.	Fremdstoffkonzentration . . . . .	73
4.2.3.	Cometabolismus . . . . .	73
4.2.4.	Kooperative Leistungen in Mischkulturen . . . . .	75
4.2.5.	Selektion neuer Leistungen . . . . .	75
4.2.6.	Ökosystem-Bedingungen . . . . .	78
4.3.	Aliphatische Kohlenwasserstoffe . . . . .	80
4.4.	Cycloalkane . . . . .	82
4.5.	Aromatische Kohlenwasserstoffe . . . . .	84
4.6.	Polychlorierte Biphenyle (PCB) . . . . .	88
4.7.	Alkylbenzensulfonat-Detergenzien . . . . .	89
4.8.	Plaste und andere synthetische Polymere . . . . .	89
4.9.	Herbizide . . . . .	90
4.9.1.	Phenoxyalkansäuren . . . . .	91
4.9.2.	Phenylamide . . . . .	91
4.9.3.	Triazine . . . . .	94
4.9.4.	Chlorierte Alkansäuren . . . . .	95
4.10.	Insektizide . . . . .	95
4.10.1.	Chlorkohlenwasserstoffe . . . . .	95
4.10.2.	Organophosphor-Insektizide . . . . .	97
4.11.	Enzymatische Mechanismen . . . . .	98
<b>5.</b>	<b>Mikrobielle Umsetzungen in den Stickstoff-, Schwefel- und Phosphor-Kreisläufen.</b> . . . .	<b>99</b>
5.1.	Der Stickstoff-Kreislauf . . . . .	99
5.1.1.	Der globale Stickstoff-Kreislauf . . . . .	99
5.1.2.	Umweltprobleme und der Stickstoff-Kreislauf . . . . .	101
5.1.3.	Biologische Stickstoffbindung . . . . .	103
5.1.4.	Ammonifizierung . . . . .	105

5.1.5.	Nitrifizierung . . . . .	106
5.1.6.	Denitrifizierung . . . . .	107
5.2.	Der Schwefel-Kreislauf . . . . .	107
5.2.1.	Der mikrobielle Schwefel-Kreislauf . . . . .	109
5.3.	Der Phosphat-Kreislauf . . . . .	111
<b>6.</b>	<b>Mikrobielle Umsetzungen von toxischen Metallen . . . . .</b>	<b>114</b>
6.1.	Mikrobielle Toxifikation und Detoxifikation . . . . .	114
6.2.	Mikrobielle Umsetzungen des Quecksilbers . . . . .	115
6.2.1.	Quecksilber in der Umwelt . . . . .	115
6.2.2.	Methylierung . . . . .	116
6.2.3.	Reduktionsprozesse . . . . .	117
6.2.4.	Der Quecksilberzyklus . . . . .	118
6.3.	Umsetzungen von Arsen, Selen und Blei . . . . .	119

## Anwendungen

<b>7.</b>	<b>Mikrobielle Abwasserreinigung, Gewässerschutz und Abluftreinigung . . . . .</b>	<b>120</b>
7.1.	Zum Abwasserproblem . . . . .	120
7.2.	Prinzipien der Abwasserreinigung . . . . .	121
7.3.	Aerobe Abbauprozesse . . . . .	123
7.4.	Spezielle Verfahren für schwer abbaubare Verbindungen . . . . .	127
7.5.	Schadstoffdetoxifikation durch fixierte Enzyme und Zellen . . . . .	130
7.6.	Anaerobe Abbauprozesse . . . . .	131
7.7.	Mikrobielle Stickstoff- und Phosphoreliminierung. . . . .	133
7.8.	Gewässerschutz und Gewässersanierung . . . . .	137
7.9.	Anthropogene Belastung der Meere. . . . .	140
7.10.	Mikrobielle Abluftreinigung . . . . .	142
7.11.	Kohle- und Erdölentschwefelung . . . . .	143
<b>8.</b>	<b>Mikrobielle Abproduktnutzung . . . . .</b>	<b>145</b>
8.1.	Eiweiß- und Äthanolproduktion aus Abwässern der Zellulose- und Lebensmittelindustrie. . . . .	146
8.2.	Biogas aus landwirtschaftlichen und kommunalen Abwässern . . . . .	147
8.3.	Kompost aus Klärschlamm und Siedlungsabfällen — Huminstoffsynthese . . . . .	151

8.4.	Bioadsorption und mikrobielle Akkumulation von Schwermetallen . . . . .	155
8.5.	Bakterielle Metallauflösung aus Abraumhalden. . . . .	156
<b>9.</b>	<b>Umweltgemäße Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel</b> . . . . .	<b>157</b>
9.1.	Mikrobiell abbaubare chemische Pflanzenschutzpräparate . . . . .	158
9.2.	Antagonistische Interaktionen — Basis für pestizide Wirkstoffe und mikrobielle Pflanzenschutzmittel . . . . .	159
9.2.1.	Mikrobielle Wirkstoffe als Pflanzenschutzpräparate . . . . .	161
9.2.2.	Lebende Mikroorganismen und Viren als Schädlingsbekämpfungsmittel . . . . .	164
<b>10.</b>	<b>Mikrobielle Leistungen zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit und der Pflanzenproduktion</b> . . . . .	<b>169</b>
10.1.	Biologische Luftstickstoffbindung durch Symbiose . . . . .	170
10.2.	Phosphatmobilisierung durch die Mykorrhiza . . . . .	173
10.3.	Wachstumsförderung durch Rhizosphärenbakterien. . . . .	174
10.4.	Schlußbemerkung . . . . .	176
<b>11.</b>	<b>Literatur</b> . . . . .	<b>177</b>
<b>12.</b>	<b>Sachregister</b> . . . . .	<b>191</b>

WTB

---

BAND 290

*Wolfgang Fritsche*

# Umwelt-Mikrobiologie

Mikrobiologie des Umweltschutzes  
und der Umweltgestaltung

Mit 70 Abbildungen und 4 Tabellen



AKADEMIE-VERLAG · BERLIN

## Reihe BIOLOGIE

Herausgeber:

Prof. Dr. H. Bochow, Berlin

Prof. Dr. H. Böhme, Gatersleben

Prof. Dr. E. Hofmann, Leipzig

Prof. Dr. J. O. Hüsing, Rerik

Prof. Dr. U. Taubeneck, Jena

Verantwortlicher Herausgeber dieses Bandes:

*Prof. Dr. U. Taubeneck*

Verfasser:

*Prof. Dr. sc. nat. W. Fritsche*

Jena

ISSN 0084 - 0963

1985

Erschienen im Akademie-Verlag • Berlin, DDR-1086 Berlin, Leipziger  
Str. 3—4

© Akademie-Verlag Berlin 1985

Lizenznummer: 202 · 100/475/85

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: VEB Druckhaus „Maxim Gorki“, 7400 Altenburg

Lektor: Christiane Grunow

LSV 1344

Bestellnummer: 763 212 8 (7290)

01250

## Vorwort

Die Umwelt-Mikrobiologie befaßt sich mit mikrobiellen Aktivitäten, die für den Schutz, die Erhaltung und Gestaltung der menschlichen Umwelt von Bedeutung sind. Unter Umwelt ist die Gesamtheit der Faktoren zu verstehen, von denen die Existenz der Lebewesen abhängt. Die Umwelt des Menschen umfaßt also sowohl die natürlichen als auch die vom Menschen beeinflussten und gestalteten Bereiche der Erde. Die wissenschaftliche Fundierung der Maßnahmen zum Umweltschutz und zur Umweltgestaltung erfordert die Mitarbeit aller Wissenschaftsdisziplinen. Durch interdisziplinäre Zusammenarbeit ist ein System von Lösungen zu erarbeiten, das der Komplexität und Langfristigkeit der Aufgabe gerecht wird. Diese Lösungen müssen sowohl dem Anliegen einer sauberen und gesunden als auch produktiven Umwelt Rechnung tragen. Umweltschutz, Gesundheitsschutz, Sicherung der Ernährung und Rohstoffversorgung sind als Einheit zu verstehen.

In diesem Taschenbuch werden die Rolle der Mikroorganismen bei den in der Umwelt ablaufenden Stoffkreisläufen behandelt und Möglichkeiten aufgezeigt, mit Hilfe von Mikroorganismen zur Lösung von Umweltproblemen beizutragen. Die Mikroorganismen verfügen über ein breites Spektrum von Abbau- und Syntheseleistungen, das für Umweltbelange von Bedeutung ist. Wenn es darum geht, diese Leistungen gezielt für die optimale Gestaltung der Umwelt anzuwenden, stößt man schnell auf Grenzen des derzeitigen Erkenntnisstandes. Das Verhalten und die Aktivitäten von Mikroorganismen in Natur und Umwelt sind unzureichend erforscht. Das trifft in besonderem Maße für komplexe Systeme zu, wie sie in Form von Mikrobengesellschaften mit vielfältigen Interaktionen in einer sich ständig wandelnden Umwelt vorkommen. Es fehlen vor allem theoretische Grundlagen und Methoden, die zu quantifizierbaren Aussagen führen. Diese sind notwendig, um

Umweltveränderungen durch anthropogene Einflüsse vorauszu-  
sehen und negativen Nebenwirkungen und Spätschäden auf Öko-  
systeme vorbeugend zu begegnen. Nur auf ökologischer Basis  
können ökonomisch vertretbare Biotechnologien des Umwelt-  
schutzes und der Umweltgestaltung entwickelt werden, bei denen  
die Naturkräfte wirksamer genutzt werden. Es ist ein Anliegen des  
Buches, zu einer verstärkten Bearbeitung umweltrelevanter  
Grundlagen der Mikrobenökologie anzuregen.

Umwelt-Mikrobiologie ist ein Teilgebiet der angewandten Mikro-  
benökologie. Auf die Behandlung der allgemeinen mikrobiellen  
Ökologie als Grundlage der Umwelt-Mikrobiologie wurde weit-  
gehend verzichtet, da darüber in der letzten Zeit mehrere Mono-  
graphien erschienen sind, u. a. von CAMPBELL in dieser Schriften-  
reihe. Ebenso werden Belange der medizinischen Mikrobiologie  
und Hygiene, der Nahrungs- und Futtermittelmikrobiologie und  
der Toxikologie nicht berücksichtigt. Mikroorganismen als umwelt-  
belastende Faktoren werden nur in Zusammenhang mit dem  
Fremdstoffmetabolismus behandelt.

Fortschritte in der Umweltforschung werden in entscheidendem  
Maße von der Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern, Agrar-  
und Forstwissenschaftlern, Wasserwirtschaftlern und Technologen  
abhängen. Es wurde daher versucht, das Buch so abzufassen, daß  
es auch für Vertreter dieser Disziplinen verständlich ist. Ab-  
schließend sei dem Wunsch Ausdruck gegeben, daß die Ausfüh-  
rungen zu einem tieferen Verständnis ökologischer Prozesse bei-  
tragen mögen. Es ist eine Voraussetzung für ein weitsichtiges  
umweltbewußtes Handeln.

Abschließend möchte ich den Herren Prof. Dr. TAUBENECK,  
Jena, und Herrn LÜTKE, Berlin, für wertvolle Anregungen und  
kritische Hinweise sehr danken.

W. FRITSCHÉ

## **Inhalt**

<b>1.</b>	<b>Einleitung: Umweltprobleme und mikrobielle Potenzen . . . .</b>	<b>9</b>
1.1.	Komplexität der Umweltprobleme. . . . .	9
1.2.	Mikrobiologische Beiträge zur Umweltgestaltung . . . . .	11
1.2.1.	Entlastung von Ökosystemen . . . . .	11
1.2.2.	Abwasserreinigung . . . . .	16
1.2.3.	Abproduktnutzung . . . . .	18
1.2.4.	Umweltgemäße Pestizide . . . . .	21
1.2.5.	Bodenfruchtbarkeit . . . . .	23

## **Grundlagen**

<b>2.</b>	<b>Umweltrelevante Prinzipien der Mikrobenökologie . . . . .</b>	<b>26</b>
2.1.	Wesen der Mikroorganismen . . . . .	26
2.2.	Wesen der Ökosysteme . . . . .	27
2.3.	Spezialisierung durch mikrobielle Anpassungsstrategien . . . .	30
2.4.	Ökonomische Substratverwertung durch Stoffwechselregulation . . . . .	33
2.5.	Antagonistische Prinzipien: Konkurrenz, Amensalismus, Parasitismus, Räubertum . . . . .	36
2.6.	Koexistenz und positive Interaktionen: Kommensalismus, Protokooperation, mutualistische Symbiose . . . . .	38
2.7.	Mikrobielle Sukzessionen und Ökosysteme . . . . .	47
<b>3.</b>	<b>Mikrobieller Abbau von Naturstoffen: Rezirkulation des Kohlenstoffes. . . . .</b>	<b>44</b>
3.1.	Kohlenstoff-Kreislauf und Sauerstoff-Umsatz . . . . .	44
2.2.	Aerobe Abbauprozesse . . . . .	48

3.3.1.	Langsam abbaubare Naturstoffe: Cellulose und Lignin . . . . .	50
3.2.2.	Abbau aromatischer Kohlenwasserstoffe. . . . .	54
3.3.	Anaerobe Abbauprozesse . . . . .	56
3.3.1.	Gärungen . . . . .	58
3.3.2.	Anaerobe Atmungen: Nitrat- und Sulfatatmung . . . . .	59
3.4.	Methanogenese und der Methan-Kohlendioxidzyklus . . . . .	62
4.	<b>Mikrobieller Abbau von organischen Fremdstoffen.</b> . . . .	67
4.1.	Zur Fremdstoff-Problematik . . . . .	67
4.2.	Prinzipien des mikrobiellen Fremdstoffmetabolismus . . . . .	70
4.2.1.	Strukturelle Ähnlichkeit mit Naturstoffen . . . . .	71
4.2.2.	Fremdstoffkonzentration . . . . .	73
4.2.3.	Cometabolismus . . . . .	73
4.2.4.	Kooperative Leistungen in Mischkulturen . . . . .	75
4.2.5.	Selektion neuer Leistungen . . . . .	75
4.2.6.	Ökosystem-Bedingungen . . . . .	78
4.3.	Aliphatische Kohlenwasserstoffe . . . . .	80
4.4.	Cycloalkane . . . . .	82
4.5.	Aromatische Kohlenwasserstoffe . . . . .	84
4.6.	Polychlorierte Biphenyle (PCB) . . . . .	88
4.7.	Alkylbenzensulfonat-Detergenzien . . . . .	89
4.8.	Plaste und andere synthetische Polymere . . . . .	89
4.9.	Herbizide . . . . .	90
4.9.1.	Phenoxyalkansäuren . . . . .	91
4.9.2.	Phenylamide . . . . .	91
4.9.3.	Triazine . . . . .	94
4.9.4.	Chlorierte Alkansäuren . . . . .	95
4.10.	Insektizide . . . . .	95
4.10.1.	Chlorkohlenwasserstoffe . . . . .	95
4.10.2.	Organophosphor-Insektizide . . . . .	97
4.11.	Enzymatische Mechanismen . . . . .	98
5.	<b>Mikrobielle Umsetzungen in den Stickstoff-, Schwefel- und Phosphor-Kreisläufen.</b> . . . .	99
5.1.	Der Stickstoff-Kreislauf . . . . .	99
5.1.1.	Der globale Stickstoff-Kreislauf . . . . .	99
5.1.2.	Umweltprobleme und der Stickstoff-Kreislauf . . . . .	101
5.1.3.	Biologische Stickstoffbindung . . . . .	103
5.1.4.	Ammonifizierung . . . . .	105

5.1.5.	Nitrifizierung . . . . .	106
5.1.6.	Denitrifizierung . . . . .	107
5.2.	Der Schwefel-Kreislauf . . . . .	107
5.2.1.	Der mikrobielle Schwefel-Kreislauf . . . . .	109
5.3.	Der Phosphat-Kreislauf . . . . .	111
<b>6.</b>	<b>Mikrobielle Umsetzungen von toxischen Metallen . . . . .</b>	<b>114</b>
6.1.	Mikrobielle Toxifikation und Detoxifikation . . . . .	114
6.2.	Mikrobielle Umsetzungen des Quecksilbers . . . . .	115
6.2.1.	Quecksilber in der Umwelt . . . . .	115
6.2.2.	Methylierung . . . . .	116
6.2.3.	Reduktionsprozesse . . . . .	117
6.2.4.	Der Quecksilberzyklus . . . . .	118
6.3.	Umsetzungen von Arsen, Selen und Blei . . . . .	119

## Anwendungen

<b>7.</b>	<b>Mikrobielle Abwasserreinigung, Gewässerschutz und Abluftreinigung . . . . .</b>	<b>120</b>
7.1.	Zum Abwasserproblem . . . . .	120
7.2.	Prinzipien der Abwasserreinigung . . . . .	121
7.3.	Aerobe Abbauprozesse . . . . .	123
7.4.	Spezielle Verfahren für schwer abbaubare Verbindungen . . . . .	127
7.5.	Schadstoffdetoxifikation durch fixierte Enzyme und Zellen . . . . .	130
7.6.	Anaerobe Abbauprozesse . . . . .	131
7.7.	Mikrobielle Stickstoff- und Phosphoreliminierung. . . . .	133
7.8.	Gewässerschutz und Gewässersanierung . . . . .	137
7.9.	Anthropogene Belastung der Meere . . . . .	140
7.10.	Mikrobielle Abluftreinigung . . . . .	142
7.11.	Kohle- und Erdölentschwefelung . . . . .	143
<b>8.</b>	<b>Mikrobielle Abproduktnutzung . . . . .</b>	<b>145</b>
8.1.	Eiweiß- und Äthanolproduktion aus Abwässern der Zellulose- und Lebensmittelindustrie. . . . .	146
8.2.	Biogas aus landwirtschaftlichen und kommunalen Abwässern . . . . .	147
8.3.	Kompost aus Klärschlamm und Siedlungsabfällen — Huminstoffsynthese . . . . .	151

8.4.	Bioadsorption und mikrobielle Akkumulation von Schwermetallen . . . . .	155
8.5.	Bakterielle Metallauflösung aus Abraumhalden. . . . .	156
<b>9.</b>	<b>Umweltgemäße Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel . . . . .</b>	<b>157</b>
9.1.	Mikrobiell abbaubare chemische Pflanzenschutzpräparate . . . . .	158
9.2.	Antagonistische Interaktionen — Basis für pestizide Wirkstoffe und mikrobielle Pflanzenschutzmittel . . . . .	159
9.2.1.	Mikrobielle Wirkstoffe als Pflanzenschutzpräparate . . . . .	161
9.2.2.	Lebende Mikroorganismen und Viren als Schädlingsbekämpfungsmittel . . . . .	164
<b>10.</b>	<b>Mikrobielle Leistungen zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit und der Pflanzenproduktion . . . . .</b>	<b>169</b>
10.1.	Biologische Luftstickstoffbindung durch Symbiose . . . . .	170
10.2.	Phosphatmobilisierung durch die Mykorrhiza . . . . .	173
10.3.	Wachstumsförderung durch Rhizosphärenbakterien. . . . .	174
10.4.	Schlußbemerkung . . . . .	176
<b>11.</b>	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>177</b>
<b>12.</b>	<b>Sachregister . . . . .</b>	<b>191</b>