

Springer-Lehrbuch

Heribert Cypionka

Grundlagen der Mikrobiologie

4., überarbeitete und aktualisierte Auflage

 Springer

Prof. Dr. Heribert Cypionka
Universität Oldenburg
Institut für Chemie und Biologie des Meeres
(ICBM)
Carl-von-Ossietzky-Str. 9-11
26111 Oldenburg
Deutschland
cypionka@icbm.de

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-642-05095-4

e-ISBN 978-3-642-05096-1

DOI 10.1007/978-3-642-05096-1

Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk be-rechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandgestaltung: WMX Design GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.de)

Vorwort zur 4. Auflage

Dem Springer-Verlag sei herzlich gedankt, dass er für die neue Auflage eine durchgehend farbige Ausstattung des Buches ermöglicht hat. Viele Fotos sind deshalb hinzugekommen, viele Abbildungen und der Text wurden überarbeitet, Kapitel 4 weitgehend neu geschrieben. Meine Arbeitsgruppe hat meine Abwesenheit während der Bearbeitung ohne Murren getragen – vielen Dank dafür! Der Biologischen Anstalt Helgoland (Alfred-Wegener-Institut) sowie der Murdoch University in Perth danke ich für die Gastfreundschaft während dieser Zeit. Viele haben wertvolle Hinweise gegeben und Bilder zur Verfügung gestellt. Dafür herzlichen Dank an Hans-Dietrich Bubenzen, Tobias Bockhorst, Ralf Cord-Ruwisch, Anna Cypionka, Ruth Cypionka, Bert Engelen, Arne Feinkohl, Susanne Fetzner, Nina Gunde-Cimermann, Kilian Hennes, Nicole Hildebrandt, Yvonne Hilker, Jasmin Hübner, Ulrich Kattmann, Renate Kort, Martin Könneke, Jorge Lalucat, Aharon Oren, Heike Oetting, Teresa Ottenjann, Eberhard Raap, Erhard Rhiel, Henrik Sass, Bernhard Schink, Andrea Schlingloff, Dirk Schüler, Meinhard Simon, Sonja Standfest, Karl-Otto Stetter, Sebastian Stockfleth, Klaus Wolf, Mariel Zapatka und viele andere, hier nicht genannte.

Oldenburg, im Februar 2010

Heribert Cypionka

Vorwort zur 1. Auflage

Dieses Buch ist aus einführenden Vorlesungen in die allgemeine Mikrobiologie, die Physiologie der Mikroorganismen und die mikrobielle Ökologie sowie aus Vorbereitungskursen für das Vordiplom Biologie und Marine Umweltwissenschaften an der Universität Oldenburg hervorgegangen. Es soll grundlegende Zusammenhänge und die vielfältigen Aspekte der Mikrobiologie darstellen. Dabei kann und soll es nicht eine enzyklopädisch vollständige Darstellung des gesamten Stoffes der Mikrobiologie geben. Ich habe versucht, die Datenfülle der vorhandenen Lehrbücher zu vermeiden und die wichtigsten Grundlagen möglichst anschaulich zu erklären.

Im Mittelpunkt stehen die Prokaryoten, ihr Energiestoffwechsel, ihre Lebenskonzepte, ihre spezifischen Leistungen in der Natur und für die Menschen. Viren und eukaryotische Mikroorganismen werden an verschiedenen Stellen vergleichend einbezogen. Morphologie und Systematik werden nur knapp behandelt. Aspekte, die auch in der Botanik, Zoologie, Biochemie und Genetik behandelt werden, treten gegenüber den spezifisch mikrobiologischen Fragestellungen in den Hintergrund. Allerdings werden moderne molekularbiologische Methoden erklärt.

Das Buch soll die Anforderungen des Vordiploms darstellen und erlernbar machen. Ich hoffe, dass auch Lehrende davon profitieren können. (Besonders an den Schulen wäre die Vermittlung eines anderen Bildes der Mikroben als das von heimtückischen Schädlingen wünschenswert). Ausgangspunkt eines jeden Kapitels sind jeweils Fragen, wie sie etwa in der Vordiplom-Prüfung gestellt werden. (Ich empfehle die Prüfungsvorbereitung zu zweit. Im wechselweisen Frage- und Antwortspiel lassen sich Zusammenhänge mit relativ wenig Mühe erarbeiten.) Die Abbildungen sind bewusst einfach gehalten, so dass man sie beim Lernen oder auch in einer Prüfung nachzeichnen kann. Die wichtigsten Begriffe werden in einem Glossar am Ende eines jeden Kapitels kurz definiert. Der Index am Schluß des Buches ist sehr ausführlich und enthält Hinweise auf Glossar, Abbildungen und Tabellen.

Wertvolle Hinweise zum Manuskript habe ich von den Kollegen Susanne Fetzner und Ulrich Kattmann aus Oldenburg sowie von Bernhard Schink aus Konstanz erhalten. Aus meiner Familie haben Ruth (sen.) und Anna bei der Korrektur des Manuskripts geholfen, die anderen – wie auch meine Arbeitsgruppe – klaglos meine zeit-

weise erheblich eingeschränkte Verfügbarkeit ertragen. Auch von den Studierenden kamen Verbesserungsvorschläge. Ihnen allen danke ich sehr herzlich!

Oldenburg, im Dezember 1998

Heribert Cypionka

Inhaltsverzeichnis

1	Mikrobiologie – Wissenschaft von unsichtbaren Lebewesen.....	1
1.1	Welt der Mikroben.....	1
1.2	Mikrobiologie.....	2
1.3	Mikroorganismen und Viren.....	4
1.4	Wissenschaftliche Basis der Mikrobiologie	5
1.5	Teilgebiete.....	5
1.6	Auswirkungen der Mikrobiologie.....	6
1.7	Kleine und große Zahlen	6
1.8	Oberflächen-Volumen-Verhältnis.....	8
1.9	Sind die Mikroben primitiv?	9
2	Aufbau der Zelle – der Grundbedarf des Lebendigen	13
2.1	Weshalb ist der Frosch grün?.....	13
2.2	Kennzeichen von Leben.....	14
2.3	Aufbau einer Prokaryotenzelle	15
2.4	Zellwand.....	15
2.5	Zellmembran.....	16
2.6	DNA	17
2.7	Plasmide.....	19
2.8	Informationsgehalt.....	19
2.9	Mechanismen der Genübertragung bei Prokaryoten.....	20
2.10	DNA-Replikation	20
2.11	Transkription und Translation.....	21
2.12	Stoffwechselfkatalyse	24
2.13	Unterschiede zwischen Prokaryoten und Eukaryoten.....	24
2.14	Einheit der Biochemie.....	26
2.15	Chemische Zusammensetzung der Zelle	27
2.16	Makro- und Spurenelemente.....	28

3	Spezielle Morphologie von Prokaryoten	33
3.1	Murein.....	35
3.2	Lysozym und Penicillin	36
3.3	Gram-negative und Gram-positive Bakterien.....	36
3.4	Kapseln und Schleime.....	37
3.5	Geißeln und Pili.....	39
3.6	Bewegungsmechanismen.....	40
3.7	Chemotaxis.....	41
3.8	Zelleinschlüsse	42
4	Eukaryotische Mikroorganismen	47
4.1	Die Gruppen der Protisten.....	48
4.2	Fortbewegung.....	52
4.3	Aufbau der Zelloberfläche	52
4.4	Entwicklungszyklen.....	53
4.5	Photoautotrophe Lebensweise.....	53
4.6	Phagotrophe und osmotrophe Lebensweise	54
4.7	Bedeutung von Protisten an verschiedenen Standorten	56
4.8	Pilze.....	56
4.9	Hefen	57
4.10	Lebensweise der Pilze.....	58
5	Viren	61
5.1	Aufbau von Viren	61
5.2	Klassifikation der Viren.....	62
5.3	RNA als Träger der Erbinformation.....	63
5.4	Lytischer Cyclus eines Bakteriophagen	64
5.5	Lysogenie	66
5.6	Transduktion.....	66
5.7	Der Phage Q β	67
5.8	Bestimmung des Phagentiters.....	68
6	Mikrobiologische Methoden	71
6.1	Mikroben sichtbar machen	71
6.2	Strahlengang des Mikroskops.....	73
6.3	Hellfeld-Mikroskopie und Färbungen.....	74
6.4	Transmissions-Elektronenmikroskopie	75
6.5	Phasenkontrast-Verfahren	76
6.6	Polarisation und Interferenz-Kontrast.....	77
6.7	Dunkelfeld	77
6.8	Fluoreszenz-Mikroskopie.....	78
6.9	Konfokales Laser-Scanning-Mikroskop.....	79
6.10	Digitale Auswertung von Bilderserien.....	79
6.11	Raster-Elektronenmikroskopie.....	80

6.12	Sterilisation.....	82
6.13	Teilentkeimung.....	83
6.14	Kulturmedium	83
6.15	Anreicherungskultur.....	84
6.16	Vereinzelung von Zellen.....	85
6.17	Direktisolierung.....	85
7	Klassifizierung und Grundstruktur des phylogenetischen Stammbaums.....	91
7.1	Taxonomie.....	91
7.2	Artenvielfalt.....	92
7.3	Einordnung einer Reinkultur	92
7.4	PCR – Polymerase-Kettenreaktion	94
7.5	Sequenzierung von DNA.....	95
7.6	Die ribosomale 16 S-RNA	97
7.7	Grundstruktur des phylogenetischen Stammbaums.....	99
7.8	Nachweis von Mikroorganismen mit molekularbiologischen Verfahren	101
8	Wachstum von Mikroben	105
8.1	Potenzielle Unsterblichkeit und der Traum der Bakterien	105
8.2	Wachstum und binäre Teilung einer Zelle	106
8.3	Exponentielles Wachstum einer Kultur.....	107
8.4	Wachstumsexperiment.....	109
8.5	Wachstumsphasen.....	110
8.6	Kontinuierliche Kultur	111
8.7	Substrat-Affinität und K_s -Wert	113
8.8	Turbidostat	113
9	Allgemeine Bioenergetik.....	115
9.1	Energieformen	115
9.2	Thermodynamische Grundlagen	116
9.3	Entropie und Ordnung.....	118
9.4	Widerspricht Leben dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik?	119
9.5	Freie Energie.....	119
9.6	Freie Energie von Transportprozessen.....	120
9.7	Freie Energie chemischer Reaktionen	121
9.8	Berücksichtigung der tatsächlichen Konzentration der Reaktionspartner.....	122
9.9	Freie Energie von Redoxreaktionen.....	122
9.10	Energiekopplung – der Umweg als biologisches Prinzip	123
9.11	ATP als Energiewährung.....	123
9.12	Energieladungszustand der Zelle.....	124

9.13	Mechanismen der ATP-Nutzung.....	124
9.14	Mechanismen der ATP-Regenerierung	125
10	Transport	131
10.1	Semipermeabilität.....	131
10.2	Aufnahme von partikulärer Substanz.....	132
10.3	Aufnahme von Eisen.....	134
10.4	Sekundärer Transport.....	134
10.5	Primärer Transport.....	135
10.6	Zucker-Transport durch Gruppentranslokation	136
11	Abbau eines Zuckermoleküls.....	139
11.1	Kopplung zwischen Anabolismus und Katabolismus.....	139
11.2	Überblick über das Stoffwechselgeschehen	140
11.3	Wachstum mit Glucose als Substrat	142
11.4	Energiebedarf für die Assimilation	142
11.5	Energieausbeute der Dissimilation	143
11.6	Berechnung des zu erwartenden Ertrages.....	143
11.7	Transport und Aktivierung von Glucose	143
11.8	Glykolyse.....	144
11.9	Reduktionsäquivalente.....	146
11.10	Pyruvat-Oxidation.....	148
11.11	Tricarbonsäure-Cyclus	149
11.12	Bilanz der Oxidation von Glucose	150
12	Regulation.....	153
12.1	Die Ebenen der Regulation	154
12.2	Die Bedeutung irreversibler Schritte	154
12.3	Regulation der Aktivität von Enzymen	155
12.4	Regulation der Glykolyse.....	157
12.5	Pasteur-Effekt.....	158
12.6	Regulation der Enzymaktivität durch chemische Modifikation.....	158
12.7	Beispiel Chemotaxis	158
12.8	Regulation der Genexpression.....	160
12.9	Operon-Struktur.....	161
12.10	Das <i>lac</i> -Operon von <i>Escherichia coli</i>	162
12.11	Katabolit-Repression.....	163
12.12	Regulation anabolischer Prozesse	163
12.13	Attenuation.....	163
13	Elektronentransport und chemiosmotische Energiekonservierung	167
13.1	Bilanz der Veratmung von Glucose.....	168
13.2	Prinzip des Elektronentransports.....	169
13.3	Komponenten der Atmungskette.....	170

13.4	Ablauf des Elektronentransports.....	172
13.5	Charakterisierung der Atmungskette	173
13.6	Chemiosmotische Energiekonservierung	173
13.7	Aufbau von chemiosmotischen Gradienten durch alternative Mechanismen.....	175
13.8	Chemiosmotische Gradienten in Bakterien, Mitochondrien und Chloroplasten.....	176
13.9	Energetische Bewertung des Protonen-Gradienten	177
13.10	ATP-Konservierung durch die membrangebundene ATPase.....	177
13.11	Energiebilanz von Atmung und chemiosmotischer ATP-Konservierung.....	179
14	Gärungen.....	183
14.1	Prinzip der Gärungen	183
14.2	Schlüsselreaktionen der ATP-Gewinnung bei Gärern.....	184
14.3	Rolle von Pyruvat bei den Gärungen.....	185
14.4	Milchsäure-Gärung.....	186
14.5	Alkoholische Gärung	188
14.6	Pyruvat-Ferredoxin-Oxidoreduktase	189
14.7	Pyruvat-Formiat-Lyase	189
14.8	Buttersäure-Gärung	190
14.9	Propionsäure-Gärung.....	192
14.10	Gemischte Säure-Gärung	193
14.11	Vergärung von Substratgemischen	193
15	Anaerobe Atmungsprozesse.....	197
15.1	Nitrat-Reduktion	198
15.2	Denitrifikation	199
15.3	Dissimilatorische Nitrat-Ammonifikation	201
15.4	Sulfat-Reduktion.....	202
15.5	Biochemie und Energiekonservierung bei der Sulfat-Reduktion.....	204
15.6	Vergärung von anorganischen Schwefelverbindungen	205
15.7	Schwefel-Atmung	206
15.8	Anaerobe Atmung mit Metall-Ionen als Elektronenakzeptoren.....	206
15.9	Reduktion von Kohlendioxid	206
15.10	Carbonat-Atmung.....	209
15.11	Methanogenese	209
15.12	Biochemie der Kohlendioxid-Reduktion zu Methan	210
15.13	Methanogene Acetat-Spaltung	212
15.14	Homoacetat-Gärung	212
16	Lithotropie – Verwertung anorganischer Elektronendonatoren	215
16.1	Lithotropie und das Dogma der biologischen Unfehlbarkeit.....	215
16.2	Biochemie und Energiekonservierung aus lithotropen Prozessen	217

16.3	Autotrophie	219
16.4	Photosynthese	219
16.5	Reaktionen der Photosynthese	221
16.6	Assimilatorischer Elektronentransport zur CO ₂ -Fixierung	222
16.7	Besonderheiten der oxygenen Photosynthese	222
16.8	Nutzung von Lichtenergie durch Halobakterien	223
17	Mikrobielle Ökologie und Biogeochemie.....	227
17.1	Mikrobielle Ökologie und Biogeochemie	227
17.2	Wechselbeziehungen in der mikrobiellen Ökologie	228
17.3	Konkurrenz um limitierende Ressourcen.....	228
17.4	Methoden der mikrobiellen Ökologie	230
17.5	Bestimmung von Anzahl und Biomasse	230
17.6	Analyse mikrobieller Lebensgemeinschaften	231
17.7	Messung mikrobieller Aktivitäten.....	233
17.8	Aktivitätsberechnung aus Gradienten	233
17.9	Kohlenstoff-Kreislauf.....	235
17.10	Effizienz der biogeochemischen Kreisläufe	236
17.11	Abbau organischer Substanz.....	237
17.12	Anaerober Abbau	238
17.13	Abbau der wichtigsten organischen Verbindungen.....	240
17.14	Xenobiotika	241
17.15	Stickstoff-Kreislauf.....	242
17.16	N ₂ -Fixierung	243
17.17	Assimilation von Stickstoff	243
17.18	Nitrifikation, Denitrifikation und dissimilatorische Nitrat-Ammonifikation	244
17.19	Anaerobe Ammonium-Oxidation, ANAMMOX.....	244
17.20	Schwefel-Kreislauf	244
17.21	Kreisläufe von Metallen	246
17.22	Phosphor-Kreislauf	247
17.23	Marine Mikrobiologie.....	247
17.24	Beispiel Nordsee	249
17.25	Rolle der Bakterien im Nahrungsnetz der Wassersäule.....	251
17.26	Sedimentation	252
17.27	Stoffkreisläufe im Sediment	252
17.28	Tiefe Biosphäre in marinen Sedimenten.....	254
17.29	Mikrobenmatten.....	255
17.30	Süßwasser-Seen.....	256
17.31	Sommerstagnation eines Sees	257
17.32	Wirkung von Phosphat auf die Sauerstoffkonzentration	258
17.33	Mikrobielle Ökologie des Bodens	258
17.34	Beispiel Wiese.....	259
17.35	Mikroflora tierischer Verdauungssysteme.....	260

17.36	Extremophile Bakterien – Standorte und Anpassungen	260
17.37	Stoffwechsel hyperthermophiler Prokaryoten	263
17.38	Leben an heißen Tiefseequellen	263
18	Wie das Leben angefangen haben könnte	269
18.1	Entstehung der Erde.....	269
18.2	Spuren des frühen Lebens	270
18.3	Urzeugung und primäre Biogenese	272
18.4	Uratmosphäre der Erde	272
18.5	Molekulare Evolution	273
18.6	Gab es zuerst Proteine oder Nukleinsäuren?.....	273
18.7	Organische und anorganische Kohlenstoffquellen.....	274
18.8	Waren die ersten Lebewesen Viren oder Bakterien?.....	274
18.9	Ein plausibles Szenarium.....	275
18.10	Entwicklung größerer Organismen	277
19	Biotechnologie und Umweltmikrobiologie	279
19.1	Biotechnologie	279
19.2	Lebensmittelmikrobiologie	280
19.3	Industrielle Mikrobiologie	281
19.4	Herstellung und Klonierung gentechnisch veränderter Organismen.....	283
19.5	Produkte der industriellen Mikrobiologie	283
19.6	Mikrobielle Erzzeugung	284
19.7	Umweltmikrobiologie.....	285
19.8	Bodensanierung	285
19.9	Behandlung von Abluft.....	286
19.10	Abwasserbehandlung	286
19.11	Schritte der Abwasserreinigung	289
19.12	Stickstoff-Eliminierung.....	290
19.13	Phosphat-Eliminierung	291
19.14	Bei der Abwasserbehandlung nicht entfernte Stoffe	291
19.15	Faulturm und Faulschlamm-Entsorgung	291
20	Humanpathogene Mikroben und Viren.....	295
20.1	Sind die Mikroben unsere Feinde?.....	295
20.2	Mikroflora des Menschen.....	297
20.3	Resistenz und Immunität	297
20.4	Infektionsverlauf.....	298
20.5	Bakterien-Ruhr	299
20.6	Lebensmittelvergiftung.....	300
20.7	Legionärskrankheit.....	300
20.8	HIV	300
20.9	Viroide und Prionen	302

20.10	Pathogene Pilze	302
20.11	Pathogene Protozoen	303
20.12	Behandlung von Infektionskrankheiten.....	303
21	Hundert Namen, die man kennen könnte	307
	Empfohlene Lehrbücher und weiter führende Literatur.....	317
	Index.....	319