

Inhaltsverzeichnis

1	Die Mikroorganismen – eine kurze Einführung	26		
	<i>Georg Fuchs</i>			
1.1	Überblick	26	1.7.4	Stoffwechselfähigkeit und individuelle Anpassungsfähigkeit
1.2	Was sind Mikroorganismen?	26		Stoffwechselfähigkeit
1.3	Die Anfänge der Mikrobiologie	26	1.7.5	Individuelle Anpassungsfähigkeit
1.4	Die alten drei Reiche: Tiere, Pflanzen und Protisten	29	1.7.6	Rasche genetische Anpassung
1.4.1	Tiere	29	1.7.7	Verbreitung und Überdauerungsvermögen
1.4.2	Pflanzen	29		Mikroorganismen als Modellobjekte der Forschung
1.4.3	Protisten	29	1.8	Rolle der Mikroorganismen für unseren Planeten Erde
1.5	Von den zwei Reichen der Prokaryonten und Eukaryonten zu drei neuen Domänen	30	1.8.1	Kreislauf des Kohlenstoffs
1.5.1	Die zwei Reiche: Prokaryonten und Eukaryonten	30		Mineralisierung des Kohlenstoffs
1.5.2	Die drei neuen Domänen: Archaea, Bacteria und Eukarya	31	1.8.2	Kohlendioxidfixierung
1.6	Phylogenetischer Stammbaum und Evolution der Organismen	32	1.8.3	Kreislauf des Stickstoffs
1.7	Allgemeine Eigenschaften der Mikroorganismen	36	1.8.4	Kreislauf des Phosphors
1.7.1	Das erfolgreiche Prinzip Kleinheit und große Zahl	36	1.8.5	Kreislauf des Schwefels
1.7.2	Größeneinheit Mikrometer, die Elle des Mikrobiologen	36		Mikroorganismen und ihre Fressfeinde
1.7.3	Großes Oberfläche/Volumen-Verhältnis und seine Folgen	36	1.9	Mikroorganismen als Symbionten
			1.10	Mikroorganismen im Dienste des Menschen
			1.10.1	Klassische mikrobielle Verfahren
			1.10.2	Neue mikrobielle Verfahren
			1.10.3	Mikroorganismen und Gentechnologie
			1.10.4	Mikroorganismen in Umweltprozessen
			1.10.5	Monopolstellung der Mikroorganismen
			1.11	Mikroorganismen als Gesundheitsmacher – der Mensch als besiedelter Raum
			1.12	Mikroorganismen als Krankheitserreger
2	Die Prokaryonta und die prokaryontische Zelle	54		
	<i>Georg Fuchs, frühere Bearbeitung: Erwin Schneider*</i>			
2.1	Überblick	54	2.4	Die Prokaryontenzelle – Zellform, Größe und chemische Zusammensetzung
2.2	Prokaryonten versus Eukaryonten	54	2.4.1	Morphologische Merkmale
2.2.1	Struktur des Genoms	56	2.4.2	Stoffliche Zusammensetzung
2.2.2	Struktur der Zelle	57		Proteine
2.3	Archaea versus Bacteria	59		Desoxyribonukleinsäure
				Ribonukleinsäure
				Polysaccharide und Zellwände
				Lipide

2.4.3	Speicherstoffe	69	Bacteroidetes	75
2.4.4	Ausgewählte Beispiele prokaryontischer Organismen aus dem „natürlichen“ System.	69	Grüne Schwefelbakterien, Chlorobiaceae	75
2.4.5	Bacteria.	71	Spirochaetes	75
	Proteobakterien (= Purpurbakterien)	71	Deinococcus-Thermus -Gruppe.	75
	Grampositive Bakterien.	72	Chloroflexi (Grüne Nicht-Schwefelbakterien). ..	75
	Cyanobakterien.	74	Thermotogae	76
	Chlamydiae.	74	Aquificae	76
	Planctomycetes.	75	2.4.6 Archaea.	76
			Euryarchaeota.	76
			Crenarchaeota und Thaumarchaeota	76
3	Pilze			
	<i>Erika Kothe</i>			
3.1	Überblick	80	3.7	Ökologie und wirtschaftliche Bedeutung der Pilze
3.2	Ernährungsweise	80	3.7.1	Schimmelpilze und Mykotoxine
3.3	Phylogenie	82	3.7.2	Holzabbau
3.3.1	Basidiomyceten	84	3.7.3	Pilze in der Bioremediation
3.3.2	Ascomyceten	84	3.8	Interaktionen mit Pflanzen
3.3.3	Die Verwandtschaftsgruppe der Zygomyceten	84	3.8.1	Infektionen durch phytopathogene Pilze. .
3.3.4	Die Chytridien	85		Eindringen in die Pflanze
3.4	Die pilzliche Zelle	86		Wachstum <i>in planta</i>
3.4.1	Aufbau der pilzlichen Zelle	86	3.8.2	Pflanzliche Abwehrmechanismen
3.4.2	Pilzwachstum.	86		Basisresistenz der Pflanze und Entgiftung im Pilz
	Hefen	86		Elicitoren zur Induktion der Pflanzenabwehr . . .
	Filamentöse Pilze.	87		Rezeptoren und Geninduktion in der Pflanze. . .
	Septen	87	3.8.3	Effektoren des Pilzes
	Luftmycel und Substratmycel	88		Mykorrhiza.
3.4.3	Vermehrung und Ausbreitung.	89		Arbuskuläre Endomykorrhiza.
3.4.4	Umweltsignale und Signaltransduktion. . .	90	3.8.4	Ektomykorrhiza
3.5	Asexuelle Vermehrung	92	3.8.5	Flechten
3.5.1	Mitose und Zellzyklus.	92		Endophytische Pilze
	Mitose.	92	3.9	Tier- und humanpathogene Pilze
	Zellzyklus	93	3.9.1	Mykosen des Menschen
3.5.2	Asexuelle Vermehrungsformen bei Ascomyceten	93		Candidiasis
3.5.3	Asexuelle Vermehrungsformen bei anderen Pilzen.	94		Aspergillose
3.6	Sexuelle Vermehrung	94		Cryptococcose
3.6.1	Homothallie und Heterothallie	95	3.9.2	Insektenpathogene Pilze
3.6.2	Sexuelle Entwicklung bei Basidiomyceten	95	3.10	Pilzgenetik und Molekularbiologie der Pilze
3.6.3	Sexuelle Entwicklung bei Ascomyceten. . .	96	3.10.1	Ascusanalyse
3.6.4	Sexuelle Entwicklung der Zygomyceten . .	98	3.10.2	Meiose.
			3.10.3	Molekulargenetik mit eukaryontischen Systemen
			3.10.4	Genomanalysen.
			3.10.5	Funktionelle Genanalyse

3.11 Pilze in Biotechnologie und Produktion	121	3.12 Pilzähnliche Algen und Protisten	125
3.11.1 Produktion von Antibiotika und Vitaminen	122	3.12.1 Oomyceten: pflanzen- und tierpathogene Vertreter	125
3.11.2 Weitere biotechnologisch hergestellte Produkte	122	3.12.2 Kohlhernie-Erreger	126
3.11.3 Speisepilze und Pilzgifte	124	3.12.3 Eumycetozoa: cAMP als Lockstoff	126
4 Viren	130		
<i>Susanne Modrow, frühere Bearbeitung: Börries Kemper*</i>			
4.1 Überblick	130	4.8.3 Auswirkung der Virusinfektion auf das Genom der Wirtszellen	156
4.2 Vorkommen, Entdeckung und Vielfalt	130	4.8.4 Zellimmortalisierung und Tumorbildung als Folgen einer Virusinfektion	156
4.3 Der technische Umgang mit Viren	133	Tumorinduktion durch RNA-Viren	156
4.4 Aufbau der Viren	135	Tumorinduktion durch DNA-Viren	157
4.4.1 Viren und Bakteriophagen	135	4.9 Chemotherapie von Virusinfektionen	159
4.4.2 Archaeenviren, Virusoide (Satellitenviren), Viroide, Mimiviren und Virophagen	135	4.9.1 Hemmstoffe viraler Enzyme	159
4.4.3 Prionen	138	Hemmstoffe der viralen Nukleinsäurepolymerasen	159
4.5 Klassifizierung der Viren	138	Hemmstoffe weiterer viraler Enzyme	161
4.6 Vermehrungszyklus	141	Hemmstoffe anderer viraler Proteine	161
4.6.1 Vermehrung von Phagen	141	4.9.2 Antivirale immunstimulatorische Chemotherapeutika	161
Adsorption und Rezeptorbindung	141	4.9.3 Resistenzentwicklung als Problem beim Einsatz antiviraler Chemotherapeutika	161
Lytischer und lysogener Zyklus	143	4.10 Prävention von Infektionen durch Impfstoffe	162
Morphogenese und Verpackung der Phagen Genome	143	4.10.1 Wirkungsweise von Lebendimpfstoffen	164
Die Phagenreplikation – ein streng regulierter Prozess	144	Attenuierte Viren	165
4.6.2 Vermehrung von Viren	145	Rekombinante Viren	165
Kontaktaufnahme mit der Zelle: Adsorption	145	4.10.2 Wirkungsweise von Totimpfstoffen	165
Aufnahme des Virus durch die Zelle: Penetration	146	Abgetötete Viren	165
Die Freisetzung des Virusgenoms in der Zelle: Uncoating	148	Einsatz ausgewählter Virusproteine	166
Strategien der viralen Genexpression und Genomvermehrung	149	4.10.3 Peptidimpfstoffe	166
Der geordnete Zusammenbau der Komponenten: Die Morphogenese	151	4.10.4 DNA- und RNA-Impfstoffe	166
Der letzte Schritt der Virusvermehrung: die Freisetzung der Nachkommenviren	152	4.11 Die Methoden der Reverse Genetics bei der Impfstoffentwicklung	167
4.7 Mechanismen der Verbreitung und Übertragung von Viren und Phagen	152	4.12 Markerimpfstoffe	167
4.8 Auswirkungen der Virusvermehrung auf die Wirtszellen	153	4.13 Komplexität der Viren und ihrer Bekämpfung	167
4.8.1 Zellschädigung und Zelltod	154	4.13.1 Influenzaviren	168
4.8.2 Zellschädigungen durch latente und persistierende Virusinfektionen	155	4.13.2 Coronaviren	172
		4.14 Viren und ihre Evolution, Vielfalt und Bedeutung für den Naturhaushalt und die Wirtschaft	175

5	Prokaryontische Zellbiologie	178		
	<i>Marc Bramkamp, frühere Bearbeitung: Erwin Schneider*</i>			
5.1	Überblick	178	5.9	Organellähnliche Kompartimente
5.2	Abbildung von Mikroorganismen	178	5.9.1	Von einer Lipidmembran umschlossene Kompartimente
5.2.1	Lichtmikroskopie	178	5.9.2	Proteinumhüllte Kompartimente
5.2.2	Elektronenmikroskopie	182	5.10	Speicherstoffe
5.3	Chromosom und Plasmide	183	5.10.1	Polysaccharide
5.4	Ribosomen	183	5.10.2	Fettartige Substanzen
5.5	Zellwand	184	5.10.3	Polyphosphate
5.5.1	Zellwand der Bacteria	184	5.10.4	Schwefel
5.5.2	Zellwand der Archaea	187	5.10.5	Cyanophycin
5.6	Kapseln und Schleime	188	5.10.6	Andere Zelleinschlüsse
5.7	Zellmembranen	188	5.11	Zellanhänge
5.7.1	Cytoplasmamembran der Bacteria	188	5.11.1	Flagellen und Chemotaxis
5.7.2	Cytoplasmamembran der Archaea	191	5.11.2	Fimbrien und Pili
5.7.3	Die äußere Membran gramnegativer Bakterien	191	5.11.3	Cellulosomen
	Negativcutes: phylogenetisch grampositive Zellen mit äußerer Membran	194	5.12	Spezielle Zelldifferenzierung
5.8	Das prokaryontische Cytoskelett	195	5.12.1	Endosporen und andere Dauerformen
5.8.1	Das tubulinähnliche FtsZ-Protein und die Zellteilung	196	5.12.2	Heterocysten
5.8.2	Das aktinähnliche MreB-Protein und die Zellform	198	5.13	Prokaryontische und eukaryontische Zellen im Vergleich
5.8.3	Das intermediärfilamentähnliche Crescentin-Protein	200	5.14	Angriffsorte und Wirkungsweise wichtiger Antibiotika
6	Prokaryontische Genetik und Molekularbiologie	222		
	<i>Thomas Eitinger</i>			
6.1	Einführung	222	6.3.3	Segregation von Chromosomen und Plasmiden
6.2	Organisation prokaryontischer DNA	222	6.4	Mutationen und DNA-Reparatur
6.2.1	Struktur der DNA	222	6.4.1	Arten von Mutationen
6.2.2	Gene und Operons	223	6.4.2	Entstehung von Mutationen
6.2.3	Chromosomen	223		Mutagene Verbindungen
6.2.4	Plasmide	225	6.4.3	DNA-Reparatur
6.3	Weitergabe genetischer Information: Replikation genomischer DNA	226		Reparatur von Fehlpaarungen
6.3.1	DNA-Polymerasen	226		Reparatur alkylierter Nukleotide
6.3.2	Reaktionen an der Replikationsgabel	226	6.4.4	Beseitigung oxidativer Schäden
				Reparatur von Schäden durch UV-Licht

6.5	Genetische Rekombination	237	6.9	Expression genetischer Information: Transkription und Translation	255
6.5.1	Homologe Rekombination	237	6.9.1	Transkription	255
6.5.2	Nichthomologe Rekombination	238		RNA-Polymerasen	255
6.6	Mobile genetische Elemente	240		Initiation und Elongation	255
6.6.1	Insertions-(IS-)Elemente	241		Termination	257
6.6.2	Transposons	241	6.9.2	Translation	257
6.6.3	ICEs	242		Aminoacyl-tRNA-Synthese	257
6.7	Mechanismen der Genübertragung ...	242		Der genetische Code	258
6.7.1	Transformation	243		Initiation	258
6.7.2	Konjugation	245		Elongation	259
	Hfr-Stämme	247		Termination	260
	Mobilisierbare Plasmide	248		Faltungshelfer	262
	Konjugation bei grampositiven Bakterien und zwischen Archaeen	249	6.10	DNA-Klonierung	264
6.7.3	Transduktion	249	6.10.1	Plasmide als Vektoren für kleine DNA-Fragmente	265
	Allgemeine Transduktion	250	6.10.2	Vektoren für große DNA-Abschnitte	267
	Spezifische Transduktion	250	6.11	DNA-Sequenzierung und Genomsequenzen	270
	Andere Transduktionsformen	250	6.11.1	Genomsequenzierung	270
6.8	Schutzmechanismen gegenüber Fremd-DNA	251	6.11.2	Genomgrößen und Genomorganisation ..	274
6.8.1	Restriktions-Modifikations-Systeme (R/M-Systeme)	251	6.11.3	Interpretation von Genomsequenzen – Funktionelle Genomik	276
	Typ-I-R/M-Systeme	252	6.11.4	Genomvergleiche	280
	Typ-II-R/M-Systeme	252	6.12	Postgenomik, Metagenomik und synthetische Biologie	281
	Typ-III-R/M-Systeme	253			
	Typ-IV-Restriktionsendonukleasen	253			
6.8.2	Immunsystem in Bacteria und Archaea ...	253			
7	Wachstum und Ernährung der Mikroorganismen	288			
	<i>Bernhard Schink</i>				
7.1	Überblick	288	7.4.2	Schwefel und Stickstoff	290
7.2	Chemische Zusammensetzung der Zelle und Nahrungsbedarf	288	7.4.3	Phosphor	291
7.2.1	Elementare Nährstoffansprüche	288	7.4.4	Sauerstoff	291
7.2.2	Ergänzungsstoffe	289	7.5	Anpassung an unterschiedliche Umweltbedingungen	291
7.3	Ernährungstypen und Lebensstrategien	290	7.5.1	Temperatur	291
7.3.1	Energiequellen	290	7.5.2	Wasserstoffionenkonzentration	292
7.3.2	Elektronendonatoren und Kohlenstoff- quellen	290	7.5.3	Wassergehalt und osmotischer Wert	292
7.4	Substrate für Mikroorganismen	290	7.6	Zusammensetzung von Nährmedien und Kultivierungstechniken	293
7.4.1	Kohlenstoffquellen	290	7.6.1	Nährböden	293
				Komplexe oder undefinierte Nährböden	293
				Feste Nährböden	293

7.6.2	Kultivierungstechniken	294	7.10	Hemmung des Wachstums und Abtötung	308
	Kohlendioxidversorgung	294	7.10.1	Schädigung der Zellgrenzschichten	308
	Belüftung	294	7.10.2	Hemmung des Stoffwechsels	308
	Anaerobenkultur	295	7.10.3	Einfluss von Antibiotika	309
7.7	Selektive Kulturmethoden	296	7.10.4	Absterben und Abtötung von Mikroorganismen	310
7.7.1	Anreicherungskultur	296	7.11	Sterilisation und Desinfektion	310
7.7.2	Reinkultur	298	7.11.1	Feuchte Hitze	310
7.7.3	Mischkultur	299	7.11.2	Trockene Hitze	311
7.8	Wachstum und Zellteilung	299	7.11.3	Filtration	312
7.8.1	Methoden zur Bestimmung der Zellzahl und der Bakterienmasse	299	7.11.4	Bestrahlung	312
	Bestimmung der Zellzahl	299	7.11.5	Chemische Mittel	312
	Bestimmung der Zellmasse	300	7.12	Konservierungsverfahren	313
7.8.2	Kinetik des Wachstums	301	7.12.1	Physikalische Konservierungsverfahren ..	313
7.9	Physiologie des Wachstums	302	7.12.2	Chemische Konservierungsverfahren	314
7.9.1	Bakterienwachstum in statischer Kultur ..	302	7.13	Kulturerhaltung	314
7.9.2	Parameter der Wachstumskurve	304	7.13.1	Dauerkulturen	315
7.9.3	Lineares Wachstum	305	7.13.2	Lebendkulturen	315
7.9.4	Bakterienwachstum in kontinuierlicher Kultur	305	7.14	Mikrobiologische Diagnostik	315
	Wachstum im Chemostaten	305	7.14.1	Klassische Techniken	315
	Wachstum im Turbidostaten	307	7.14.2	Molekularbiologische Techniken	316
7.9.5	Unterschiede zwischen statischer und kontinuierlicher Kultur	308			
8	Zentrale Stoffwechselwege	320			
	<i>Georg Fuchs</i>				
8.1	Überblick	320	8.5	Wege des Hexoseabbaus	330
8.2	Grundmechanismen des Stoffwechsels und der Energieumwandlung	320	8.5.1	Glykolyse	331
8.2.1	Funktion der Enzyme	321	8.5.2	Pentosephosphatweg und oxidativer Pentosephosphatzyklus	332
	Wirkungsweise der Enzyme	321	8.5.3	KDPG-(2-Keto-3-desoxy-6-phosphogluconat-)Weg	335
	Kinetik der Enzyme	323	8.5.4	Wege des Zuckerstoffwechsels in Archaea	335
	Regulation der katalytischen Aktivität	323	8.5.5	Energiebilanzen und Verbreitung der Zuckerabbauwege	337
	Coenzyme, prosthetische Gruppen, Metalle und Membranproteine	324	8.6	Oxidation von Pyruvat	337
8.2.2	Dehydrogenierung und Pyridinnukleotide	324	8.7	Citratzyklus und alternative Wege	338
8.3	Allgemeines Prinzip des Stoffwechsels	327	8.8	Elektronentransport-Phosphorylierung der Atmungskette	340
8.4	Umwandlung von Energie	328	8.8.1	Energetische Grundlagen und das Prinzip der Atmungskette	340
8.4.1	ATP und andere energiereiche Verbindungen	328		Redoxpotenzial	341
8.4.2	Regeneration von ATP	329			

8.8.2	Komponenten der Atmungskette	342	8.9.2	Toxische Wirkung des Sauerstoffs und Entgiftungsreaktionen	353
	Flavoproteine	342	8.9.3	Sauerstoff als Cosubstrat	354
	Eisen-Schwefel-Proteine	342	8.9.4	Sauerstoff und Biolumineszenz	354
	Chinone	343			
	Cytochrome	344	8.10	Verbindung zwischen Energiestoff- wechsel und Biosynthese	355
8.8.3	Atmungskette bei der Atmung mit Sauerstoff	345	8.10.1	Bereitstellung des Kohlenstoffs für die Biosynthese	355
	Oxidasepositive Bakterien	346	8.10.2	Gluconeogenese, Hilfszyklen und Sonderwege	355
	Oxidasenegative Bakterien und verzweigte Atmungsketten	348		Gluconeogenese	355
8.8.4	Elektronentransport-Phosphorylierung . .	349		Anaplerotische Reaktionen und Gluco- neogenese aus C ₃ -Verbindungen	357
	Elektrochemisches Potenzial	349		Gluconeogenese aus C ₂ -Verbindungen, Fettsäuren und anderen Substraten	357
	ATP-Synthese	350	8.10.3	Regulation von Enzymaktivität und Genexpression	358
8.8.5	Rückläufiger Elektronentransport	353			
8.8.6	Elektronentransportprozesse bei anaeroben Bakterien	353			
8.9	Eigenschaften und Funktionen von Sauerstoff	353			
8.9.1	Regulation durch Sauerstoff	353			
9	Biosynthesen	362			
	<i>Georg Fuchs</i>				
9.1	Überblick	362	9.8	Synthese von Zellmaterial aus CO₂	377
9.2	Organisation der „Zellfabrik“	362	9.8.1	Calvin-Benson-Zyklus	379
9.3	Syntheseleistung der Zelle	364	9.8.2	Alternative Wege der CO ₂ -Fixierung	381
9.4	Metabolite und ihre Konzentrationen in der Zelle	365		Reduktiver Acetyl-CoA-Weg	381
9.5	Makromoleküle und ihre Bausteine . . .	366		Reduktiver Citratzyklus	382
9.6	Assimilation der Elemente N, S, P und der Spurenelemente	366		Besondere Wege der CO ₂ -Fixierung	382
9.6.1	Stickstoff	367	9.8.3	Ökologische, ökonomische und evolutionäre Aspekte	383
	Ammoniak bzw. Nitrat als N-Quelle	367	9.9	Synthese von Zellmaterial aus Formaldehyd	383
	Molekularer Stickstoff als N-Quelle	368	9.9.1	Hexulosephosphatzyklus	384
9.6.2	Schwefel	370	9.9.2	Serinweg	384
	Sulfat als S-Quelle	371	9.9.3	Dihydroxyacetonzyklus	385
	Fixierung und Übertragung von Schwefel- wasserstoff	372	9.9.4	Anaerober Weg	386
9.6.3	Phosphor	372	9.10	Biosynthesen der Bausteine	386
9.6.4	Spurenelemente	373	9.10.1	Aminosäuren	386
9.7	Bereitstellung von C₁-Einheiten, Energie, Reduktions- und Oxidations- mitteln	375	9.10.2	Zucker	387
9.7.1	C ₁ -Einheiten	375	9.10.3	Nukleotide und Desoxynukleotide	389
9.7.2	Energie	375	9.10.4	Lipide	389
9.7.3	Reduktions- und Oxidationsmittel	376	9.10.5	Speicherstoffe	394
			9.11	Synthese von Sekundärmetaboliten . . .	395
			9.11.1	Funktion von Sekundärmetaboliten	396
			9.11.2	Beispiele für Sekundärmetabolite	396

9.12	Synthesen von komplexen Zellstrukturen	398	9.12.1	Synthese von Zellwandkomponenten an der Membran	398
			9.12.2	Zusammenbau komplexer Strukturen	400
10	Transport durch die Cytoplasmamembran	406			
	<i>Georg Fuchs, frühere Bearbeitung: Erwin Schneider*</i>				
10.1	Überblick	406	10.4	Weitere Aspekte der Transportsysteme	415
10.2	Grundlagen des Transports	406	10.4.1	Beteiligung von Transportsystemen an der Gen- und Proteinregulation	415
10.2.1	Passiver Transport durch Diffusion	407	10.4.2	Transportsysteme als chemotaktische Rezeptoren	416
10.2.2	Passiver Transport durch Kanalproteine ..	408	10.4.3	Transportsysteme als Mediatoren der Differenzierung	416
10.2.3	Aktiver Transport durch Carrier	408	10.5	Resistenz durch proteinvermittelten Export	416
10.3	Transportmechanismen und Transportsysteme	409	10.6	Translokationssysteme für den Proteinexport	418
10.3.1	Primäre Transportsysteme	410	10.6.1	Sec-Translokationssystem	418
	ABC-Transporter	410	10.6.2	Tat-Translokationssystem	422
	Na ⁺ -abhängige Decarboxylasen	412	10.6.3	Spezielle Sekretionssysteme	422
10.3.2	Sekundäre Transportsysteme	413		Sec-abhängige Systeme	422
10.3.3	Gruppentranslokation	414		Sec-unabhängige Systeme	423
10.3.4	Zusammenwirken von Exoenzymen und Transport	415	10.7	Aufnahme von DNA	424
11	Abbau organischer Verbindungen	428			
	<i>Georg Fuchs</i>				
11.1	Überblick	428	11.6	Abbau von Proteinen, Nucleinsäuren und Lipiden	439
11.2	Aerobe und anaerobe Mineralisierung	428	11.6.1	Proteine	439
11.2.1	Aerobe Mineralisierung	429	11.6.2	Nucleinsäuren	440
11.2.2	Anaerobe Mineralisierung	429	11.6.3	Lipide	440
11.3	Gemeinsame Aspekte des Polymerabbaus	430	11.7	Abbau niedermolekularer Substanzen	441
11.4	Abbau von Polysacchariden	431	11.7.1	Zucker	444
11.4.1	Cellulose	431	11.7.2	Aminosäuren	446
11.4.2	Hemicellulosen	432	11.7.3	Aromatische Verbindungen	447
11.4.3	Pectine	433		Aerober Abbau von Aromaten	448
11.4.4	Andere Polysaccharide	433		Anaerober Abbau von Aromaten	451
11.4.5	Chitin und Murein	433	11.7.4	Kohlenwasserstoffe	452
11.4.6	Stärke	435		Aerober Abbau von Kohlenwasserstoffen	452
11.4.7	Fructane	436		Anaerober Abbau von Kohlenwasserstoffen	455
11.5	Abbau von Lignin	436	11.7.5	Fettsäuren	457
			11.7.6	Purine, Pyrimidine und andere heterozyklische Verbindungen	458
			11.8	Abbau und Cometabolismus von Xenobiotika	458
			11.9	Unvollständige Oxidationen	461

12	Oxidation anorganischer Verbindungen: chemolithotrophe Lebensweise	466		
	<i>Georg Fuchs, frühere Bearbeitung: Johann Heider*</i>			
12.1	Überblick	466	12.5	Reduzierte Schwefelverbindungen als Elektronendonatoren
12.2	Habitate und Lebensweise von chemolithotrophen Bakterien	466	12.5.1	Biochemie der Sulfid- und Schwefeloxidation
12.2.1	Art und Herkunft der Substrate	466		Schwefelstoffwechsel in neutrophilen Bakterien
12.2.2	Habitate	467		Schwefelstoffwechsel in acidophilen Bakterien .
12.2.3	Lebensweise	468		Schwefelstoffwechsel in Archaea
12.2.4	Kultivierung	468		<i>(Acidianus ambivalens)</i>
12.2.5	Stoffwechseltypen und ihre Nischen	469	12.5.2	Schwefelwasserstoff oxidierende Symbionten
12.2.6	Symbiosen	470	12.6	Reduzierte Metallionen als Elektronendonatoren
12.3	Prinzipien der Lithotrophie	470	12.6.1	Biochemie der Oxidation von Metallionen
12.3.1	Stoffwechselprinzip	470	12.6.2	Erzlaugung
12.3.2	Rückläufiger Elektronentransport	471	12.7	Wasserstoff als Elektronendonator
12.4	Reduzierte Stickstoffverbindungen als Elektronendonatoren	471	12.7.1	Biochemische Grundlagen
12.4.1	Ammonium und Nitrit oxidierende Nitrifikanten	473	12.7.2	Aerobe Wasserstoff oxidierende Bakterien
12.4.2	Biochemie der Ammoniumoxidation	474	12.8	Kohlenmonoxid als Elektronendonator
12.4.3	Biochemie der Nitritoxidation	475		
12.4.4	Ökologische und praktische Bedeutung der Nitrifikation	475		
13	Mikrobielle Gärungen	492		
	<i>Georg Fuchs, frühere Bearbeitung: Johann Heider*</i>			
13.1	Überblick	492	13.4	Ethanolgärung
13.2	Prinzipien der Gärung	492	13.4.1	Biochemie der Ethanolbildung
13.2.1	Habitate von gärenden Mikroorganismen	492	13.4.2	Praktische Bedeutung der alkoholischen Gärung
13.2.2	Das Prinzip: Regeneration der Redox-Carrier ohne Sauerstoff	493		Wein
13.2.3	Gärungstypen	494		Sekt
13.2.4	Energiekonservierung durch Substrat-Phosphorylierung	494		Bier
13.3	Milchsäuregärung	496		Backhefe
13.3.1	Milchsäurebakterien	496		Ethanol
13.3.2	Homofermentative Milchsäuregärung	498	13.5	Elektronentransport-Phosphorylierung und revertierter Elektronentransport
13.3.3	Heterofermentative Milchsäuregärung	498	13.6	Elektronenbifurkation und Wasserstoffbildung
13.3.4	Bifidobacterium-Gärung	499	13.6.1	Das Prinzip der Elektronenbifurkation
13.3.5	Praktische Bedeutung der Milchsäurebakterien	500	13.6.2	Energiekonservierung durch Ferredoxin-getriebene Protonen- bzw. Na ⁺ -Pumpen
	Milchprodukte	500		Elektronenbifurkation mit anderen Zielen
	Käse	501	13.6.3	Wasserstoff als Gärungsprodukt
	Weitere Lebensmittel	502		
	Silage	502		
13.3.6	Medizinische Bedeutung von Milchsäurebakterien	502		

13.7	Gemischte Säuregärung	510	13.9.2	Biochemische Grundlagen der Propion- säuregärung	517
13.7.1	Biochemie der gemischten Säuregärung ..	511		Methylmalonyl-CoA-Weg	517
	Reduktive Teilreaktionen bei der gemischten Säuregärung	511		Acrylyl-CoA-Weg	518
13.7.2	Butandiolgärung bei <i>Enterobacter</i>	513	13.10	Vergärung von Aminosäuren und anderen Verbindungen	519
	Bedeutung der gemischten Säuregärung für Trinkwasser- und Labordiagnostik. ...	514	13.10.1	Stickland-Gärung	519
13.8	Buttersäure- und Lösungsmittelgärung	514	13.10.2	Vergärung von Glutamat	519
13.8.1	Buttersäuregärende Clostridien	515	13.11	Sekundäre Gärungen und Homoacetat- gärung	521
13.8.2	Biochemische Grundlagen der Butter- säuregärung	515	13.11.1	Sekundäre Gärungen	521
13.8.3	Lösungsmittelgärung (Aceton-Butanol- gärung)	516		Eigenschaften und Isolierung der sekundären Gärer.	522
13.9	Propionsäuregärung	517		Vergärung von Ethanol und Acetat durch <i>Clostridium kluyveri</i>	522
13.9.1	<i>Propionibacterium</i>	517	13.12	Homoacetatgärung	523
14	Anaerobe Atmung	526			
	<i>Johann Heider</i>				
14.1	Überblick	526	14.7	Schwefel als Elektronenakzeptor	539
14.2	Energetisches Prinzip	526	14.7.1	Polysulfidatmung in <i>Wolinella</i> <i>succinogenes</i>	539
14.3	Nitrat, Nitrit, N₂O als Elektronen- akzeptoren	528	14.7.2	Syntrophe Assoziation von <i>Desulfuro- monas acetoxidans</i> mit Grünen Schwefel- bakterien	540
14.3.1	Denitrifikation	528	14.8	Methanogenese: CO₂ als Elektronen- akzeptor	540
	Reduktion von Nitrat zu Nitrit	529	14.8.1	Methanogene Archaea	541
	Reduktion von Nitrit zu molekularem Stickstoff.	529		Eigenschaften	541
14.3.2	Nitratammonifikation	530		Ökologie	541
14.3.3	Anammoxreaktion	531	14.8.2	Methanbildung aus H ₂ und CO ₂	542
14.4	Fumarat als Elektronenakzeptor	532	14.8.3	Methanbildung aus Acetat	544
14.5	Oxidierete Metallionen als Elektronen- akzeptoren	533	14.9	Acetogenese: CO₂ als Elektronen- akzeptor	547
14.6	Sulfat als Elektronenakzeptor	534	14.9.1	Biochemie der Acetogenese	547
14.6.1	Biochemie der Sulfatreduktion	535	14.10	Reduktion weiterer Elektronen- akzeptoren	548
14.6.2	Energetik der Sulfatatmung	536	14.10.1	Sulfoxide und Aminoxide	548
14.6.3	Unterschiede zwischen assimilatorischer und dissimilatorischer Sulfatreduktion ...	537	14.10.2	Anorganische Oxyanionen	549
14.6.4	Rolle der sulfatreduzierenden Mikro- organismen im Naturhaushalt.	537	14.10.3	Chlororganische Verbindungen	550

15	Phototrophe Lebensweise	554		
	<i>Georg Fuchs</i>			
15.1	Überblick	554	15.6.2	Purpurbakterien und Grüne Nicht-Schwefelbakterien (Photosysteme vom Typ II) ... 570
15.2	Bedeutung und Prinzipien der Photosynthese	554		Purpurbakterien
				Die Grünen Nicht-Schwefelbakterien
15.2.1	Licht als Energiequelle und phototrophes Wachstum	554	15.6.3	Grüne Schwefelbakterien und Helio- bakterien (Photosysteme vom Typ I)
15.2.2	Prinzipien der Photosynthese	555		Grüne Schwefelbakterien
				Heliobakterien und Chloroacidobacterium ...
15.3	Photosynthetische Pigmente und Thylakoide	557	15.6.4	Aerobe anoxygene phototrophe Bakterien (Photosysteme vom Typ II oder Bakteriorhodopsin)
				573
15.3.1	Chlorophylle und Bakteriochlorophylle ...	557	15.7	Energiekonservierung bei oxygener Photosynthese
	Chlorophyll	557		573
	Bakteriochlorophylle	558	15.7.1	Die photosynthetische Redoxkette im Überblick
15.3.2	Akzessorische Pigmente	558		573
	Carotinoide	560	15.7.2	Photosystem II (Chinon-Typ) und Wasserspaltung
	Phycobiline	561		574
15.3.3	Thylakoide	561	15.7.3	Elektronentransportkette
				576
15.4	Antennenkomplexe	562		Der Cytochrom- <i>b₆f</i> -Komplex
				576
15.4.1	LH I und LH II	562	15.7.4	Photosystem I (FeS-Typ) und NADPH-Bildung
15.4.2	Chlorosomen	562		576
15.4.3	Phycobilisomen	563	15.7.5	Zyklische Photophosphorylierung
				578
15.5	Oxygene phototrophe Bakterien (Cyanobakterien)	563	15.7.6	Bilanz, Quantenbedarf und Wirkungsgrad der Lichtreaktion
				579
15.5.1	Vorkommen und Rolle von Cyanobakterien	564	15.8	Energiekonservierung bei anoxygener Photosynthese
15.5.2	Stoffwechsel und Zellstruktur	565		579
15.5.3	Morphologische Gruppen	565	15.8.1	Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei den anoxygenen Photosystemen
15.5.4	Zelldifferenzierungen	567		579
			15.8.2	Photosysteme vom Typ II (Chinon-Typ) und vom Typ I (FeS-Typ)
15.6	Anoxygene phototrophe Bakterien ...	568		580
				Photosystem II
15.6.1	Vorkommen und Rolle von anoxygenen phototrophen Bakterien	568		Photosystem I
				580
16	Regulation des Stoffwechsels und des Zellaufbaus von Bakterien	586	15.9	Bakteriorhodopsin- und proteorhodopsinabhängige Photosynthese ..
	<i>Gottfried Unden</i>			581
16.1	Überblick	586	16.3.1	Veränderung der DNA-Struktur
16.2	Aufrechterhaltung des Zellmilieus und Antwort auf Änderungen	586		587
			16.3.2	Kontrolle der Transkription und Translation
16.3	Mechanismen zur Anpassung und Änderung des Zellaufbaus	587		588
			16.3.3	Regulation der Transkription durch DNA-bindende Proteine
				589
				Negative Regulation durch Repressorproteine ..
				589
				Positive Regulation durch Aktivatorproteine ...
				590
				Verwendung komplexer Promotoren
				591

16.3.4	Alternative σ -Faktoren	592	16.7	Stringente Kontrolle und generelle Stressantwort	608
16.3.5	Funktionskontrolle durch Synthese und Proteolyse.	592	16.7.1	Stringente Kontrolle und Kopplung von Anabolismus und Katabolismus	609
16.3.6	Kontrolle der Translation: regulatorische RNA, Attenuation und RNA-bindende Proteine	592	16.7.2	Generelle Stressantwort und Regulation der stationären Phase in <i>E. coli</i>	610
	<i>Trans</i> -codierte sRNA	593		Regulation durch den alternativen σ -Faktor σ^S in <i>E. coli</i>	611
	<i>Cis</i> -codierte regulatorische RNA	594		Regulation durch den alternativen σ -Faktor σ^B in <i>Bacillus</i>	611
	Attenuation.	594	16.7.3	Toxin-Antitoxin-Systeme und bakterielle Persistenz.	612
	Translationskontrolle durch mRNA bindende Proteine	595	16.8	Spezifische Stressreaktionen.	613
16.3.7	Posttranslationale Regulation	595	16.8.1	Oxidativer Stress	613
16.4	Reizaufnahme und Reizverarbeitung	597	16.8.2	Hitze- und Kälteschockreaktion	614
16.4.1	Membranständige und cytoplasmatische Sensoren.	597		Hitzeschock	614
16.4.2	Regulons, Stimulons und Netzwerke	598		Kälteschock.	615
16.4.3	Aufbau und Funktion von Zweikomponentensystemen.	599	16.8.3	Hüllstress und Reizerkennung durch ECF- σ -Faktoren	616
16.4.4	Intrazelluläre Signalmoleküle	600	16.8.4	Osmoregulation.	616
16.5	Regulation von Katabolismus und Energiestoffwechsel.	601	16.9	Interzelluläre Kommunikation und Zelldichteregulation (Quorum Sensing)	617
16.5.1	Übergeordnete Regulation des Kohlenstoffkatabolismus	601	16.10	Chemotaxis.	619
16.5.2	Regulation des Stoffwechsels durch Elektronenakzeptoren	603	16.11	Differenzierung bei Bakterien.	621
	Regulatorsysteme	605	16.11.1	Endosporenbildung bei <i>B. subtilis</i>	621
16.6	Regulation der Stickstoffassimilierung.	606	16.11.2	Lebenszyklus von <i>Caulobacter crescentus</i>	623
			16.11.3	Fruchtkörperbildende Myxobakterien.	625
17	Mikrobielle Vielfalt, Evolution und Systematik.	630			
	<i>Jörg Overmann</i>				
17.1	Überblick.	630		Physiologische Merkmale	635
17.2	Diversität.	630		Chemotaxonomie	635
17.2.1	Diversitätsbegriff und Definition	630		Molekularbiologische Charakterisierung	636
17.2.2	Quantifizierung und Umfang mikrobieller Diversität	630		Numerische Taxonomie	637
	Beobachtungseinheit der mikrobiellen Diversitätsforschung.	630	17.3.3	Artkonzept und Artbeschreibung bei Prokaryonten.	637
	Umfang bakterieller Diversität.	632	17.4	Evolutionäre Grundlagen der prokaryontischen Vielfalt.	640
17.2.3	Relevanz der mikrobiellen Diversitätsforschung	632	17.4.1	Mechanismen prokaryontischer Evolution und Relevanz für die Systematik.	640
17.3	Systematik der Prokaryonten	633		Mutation.	640
17.3.1	Bestandteile der Systematik: Charakterisierung, Taxonomie und Phylogenie	633		Rekombination	640
17.3.2	Methoden der Charakterisierung und Systematik bei Prokaryonten.	635		Selektion.	641
	Morphologisch-cytologische Merkmale.	635		Migration	641
				Genetische Drift	642
			17.4.2	Populationsgenetische Evolutionsmodelle	642

17.5	Archaea – extremophile lebende Fossilien?	642	17.6.11	Actinobacteria: grampositiv mit hohem GC-Gehalt.	664
17.5.1	Crenarchaeota	643		Acidimicrobiia, Coriobacteriia, Rubrobacteria, Thermoleophilia	664
	Thermoproteales	643		Actinobacteria	664
	Desulfurococcales	643	17.6.12	Fusobacteria und Synergistetes	669
	Sulfolobales	645	17.6.13	Cyanobacteria – oxygen photosynthetisch, hoch divers und weit verbreitet	669
17.5.2	Euryarchaeota	646		Phylogenie und Taxonomie	670
	Thermococcales	646		Stoffwechsel und Sekundärstoffe	671
	Methanopyrales	646	17.6.14	Nitrospirae	671
	Methanobacteriales	646	17.6.15	Acidobacteria	672
	Methanococcales	647	17.6.16	Spirochaetes	673
17.5.3	Thermoplasmatota	647	17.6.17	Chrysiogenetes und Deferribacteres	675
	Thermoplasmatales	647	17.6.18	Planctomycetes, Verrucomicrobia, Chlamydiae und Elusimicrobia	675
17.5.4	Halobacterota	647		Planctomycetes	675
	Archaeoglobales	647		Verrucomicrobia	677
	Methanomicrobiales	647		Chlamydiae	678
	Methanosarcinales	647		Elusimicrobia	679
	Halobacteriales	648	17.6.19	Gemmatimonadetes	679
17.5.5	Thaumarchaeota	649	17.6.20	Chlorobi	679
17.5.6	Weitere Phyla der Archaea	650		Chlorobiales	680
17.6	Bacteria	651		Klasse Ignavibacteria	681
17.6.1	Aquificae	651		„Thermochlorobacteriaceae“	681
17.6.2	Thermotogae	651	17.6.21	Bacteroidetes	682
17.6.3	Caldiserica	651		Bacteroidia	682
17.6.4	Coprothermobacterota	652		Cytophagia	683
17.6.5	Dictyoglomi	652		Flavobacteriia	683
17.6.6	Deinococcus-Thermus	653		Sphingobacteriia	683
17.6.7	Chloroflexi	653		Saprospiria	683
	Chloroflexia	654		Chitinophagia	683
	Thermomicrobia und Thermoflexia	655	17.6.22	Proteobacteria	683
	Anaerolineae und Caldilineae	655		Alphaproteobacteria	684
	Dehalococcoidea	655		Betaproteobacteria und Gammaproteobacteria	688
	Ktedonobacteria und Ardenticatenia	655		Gammaproteobacteria	690
17.6.8	Armatimonadetes	655		Deltaproteobacteria	696
17.6.9	Abditibacteriota	656		Epsilonproteobacteria	698
17.6.10	Firmicutes: grampositiv mit niedrigem GC-Gehalt.	656		Oligoflexia	699
	Bacilli	656	17.6.23	Die „ Candidate Phyla Radiation “ (CPR) ..	700
	Clostridia	660			
	Negativicutes	662			
	Erysipelotrichia	662			
	Tenericutes	662			
18	Die Rolle von Mikroorganismen im Stoffkreislauf und in der Natur	702			
	<i>Bernhard Schink</i>				
18.1	Überblick	702	18.2.3	Ökologische Nische	703
18.2	Ökosystem, Standort und ökologische Nische	702	18.2.4	Bewohner eines Ökosystems	703
18.2.1	Ökosystem	702	18.3	Limitierung von Substraten und Energiequellen	703
18.2.2	Standort	702	18.3.1	Logistisches Wachstum	703
			18.3.2	Begrenzung der Substratverfügbarkeit ..	704

18.4	Fließsysteme, Substrataffinität und Schwellenwerte	704	18.10.2	Ozean	724
18.5	Hunger, Stress, Abweidung und Populationskontrolle durch Phagen ...	705		Primärproduktion	724
18.5.1	Hunger	705		Tiefsee	724
18.5.2	Stress	706		Marschen	725
18.5.3	Abweidung	706		Marine Sedimente	725
18.5.4	Phagen	707		Anaerobe Methanoxidation	727
18.6	Transport von Substraten und Produkten	707		Anaerobe Ammoniumoxidation	729
18.6.1	Diffusionskontrollierte Lebensräume und Gradientenorganismen	709	18.11	Boden und tiefer Untergrund	729
18.7	Methoden zur Analyse mikrobieller Populationen und ihrer Aktivitäten in der Natur	710	18.11.1	Boden als Standort für Mikroorganismen .	729
18.7.1	Färbetechniken und Mikroautoradiografie	710	18.11.2	Bodenbestandteile	730
18.7.2	Chemische Methoden	710	18.11.3	Mikroorganismen im Boden	731
18.7.3	Kultivierungsmethoden	710	18.11.4	Stickstoffhaushalt	731
18.7.4	Molekularbiologische Methoden	711	18.11.5	Methankreislauf	731
18.7.5	Analyse von Organismengemeinschaften .	713	18.11.6	Schichtung des Bodens	731
18.8	Oberflächenanheftung, Biofilme und interzelluläre Kommunikation	714	18.11.7	Tiefer Untergrund	731
18.8.1	Oberflächenanheftung	714	18.12	Extreme Standorte und ihre Bewohner	732
18.8.2	Funktionelle Differenzierung im Biofilm ..	714	18.12.1	Heiße Standorte und thermophile Organismen	733
18.9	Kooperation zwischen Mikroorganismen	716		Extrem heiße Standorte	733
18.9.1	Die anaerobe Fütterungskette	717	18.12.2	Kalte Standorte, psychrophile Organismen und Kältekonservierung	735
18.9.2	Andere Typen von Symbiosen	718	18.12.3	Saure und basische Standorte und daran angepasste Organismen	736
18.10	Seen und Ozeane	719	18.12.4	Salzreiche Standorte und halophile Organismen	737
18.10.1	Süßgewässer	719	18.13	Geomikrobiologie, Mikroorganismen als Gestalter unserer Erde	738
	Seen	719	18.13.1	Eisenablagerung	738
	Freiwasser	720	18.13.2	Ablagerung von Calciumcarbonat	739
	Seesediment	722	18.13.3	Schwefelablagerung und andere Lagerstätten	739
	Lithotrophe Oxidation	723	18.13.4	Eliminierung von toxischen Metallen und Metalloiden	739
	Fließgewässer	724	18.14	Tierische Verdauungssysteme	739
			18.14.1	Ernährungs- und Verdauungstypen	740
			18.14.2	Verdauungsapparat der Wiederkäuer	740
			18.14.3	Verdauungsapparat des Pferdes	742
			18.14.4	Verdauungsapparat von holzfressenden Termiten	742

19	Mikroorganismen als Symbionten und Antagonisten	746		
	<i>Petra Dersch, Christian Rüter, frühere Bearbeitung: Erwin Schneider*</i>			
19.1	Symbiosen	746	19.5	Mikrobielle Pathogenität: Wirkmechanismen tier- und human-pathogener Bakterien
19.1.1	Symbiose von stickstofffixierenden Bakterien mit Pflanzen	747	19.5.1	Adhäsion der Bakterien
	Knöllchenbakterien	747	19.5.2	Invasion der Bakterien
	Andere Symbiosen mit stickstofffixierenden Bakterien	750	19.5.3	Vermehrung und Ausbreitung der Bakterien
19.1.2	Lebensgemeinschaften von Mikroorganismen mit Tieren	751		Exotoxine
				Superantigene
				Endotoxine
19.2	Körperflora des Menschen	753	19.5.4	Überwindung von Abwehrmechanismen des Wirtes
19.2.1	Haut	754	19.6	Ausgewählte bakterielle Krankheitserreger bei Mensch und Tier
19.2.2	Mundhöhle	754	19.6.1	Erkrankungen der Atemwege
19.2.3	Verdauungstrakt	755	19.6.2	Erkrankungen des Verdauungstraktes
19.2.4	Atemwege	756	19.6.3	Erkrankungen des Urogenitaltrakts
19.2.5	Urogenitalbereich	756	19.6.4	Erkrankungen des Zentralnervensystems
			19.6.5	Systemische Infektionen
19.3	Infektionskrankheiten und Epidemiologie	757	19.6.6	Nosokomiale Infektionen
19.3.1	Grundbegriffe und Prinzipien der Epidemiologie	757	19.7	Virale Krankheitserreger und Prionen
19.3.2	Überwachung und medizinische Diagnostik	757	19.8	Pflanzenpathogene Bakterien
19.3.3	Kontrollmaßnahmen und Prävention	760	19.8.1	Ausgewählte pflanzenpathogene Bakterien
19.4	Mikroorganismen als Auslöser von Krankheiten	761		
19.4.1	Infektion, Pathogenität und Virulenz	761		
19.4.2	Reservoirs und Übertragungswege	761		
19.4.3	Krankheitsverlauf	763		
20	Mikroorganismen im Dienste des Menschen: Biotechnologie	808		
	<i>Bernhard Schink</i>			
20.1	Überblick	808	20.5	Produktion organischer Säuren durch Pilze und Bakterien
20.2	Die Bakterienzelle als Produzent	808	20.5.1	Physiologie und Biotechnologie
20.3	Technische Abläufe in der klassischen Biotechnologie	809		Synthese von Zitronensäure
20.4	Essigsäure	811		Optimierung der Ausbeute an Zitronensäure
20.4.1	Unvollständige Oxidationen	811	20.5.2	Biochemie der Säurebildung durch Pilze
20.4.2	Stoffwechsellieferungen von Essigsäurebakterien	811	20.5.3	Produktion organischer Säuren durch Bakterien
20.4.3	Biochemie der Essigsäurebildung	812	20.6	Aminosäuren
			20.7	Stoffumwandlungen

20.8	Antibiotika	818	20.13.5	Exoenzyme	829
20.8.1	Antibiotikabildende Mikroorganismen ...	819	20.13.6	Einschlusskörper	829
20.8.2	Nachweis der Synthese von Antibiotika ...	819	20.14	Produktion von Biomasse	829
20.8.3	Therapeutisch wichtige Antibiotika	821	20.15	Umwelttechnologie	830
	Penicilline	821	20.15.1	Abwasserreinigung	830
	Cephalosporine	821		Abwasserreinigung im Belebtschlammverfahren	831
	Streptomycin	822		Entfernung von Stickstoff- und Phosphor-	
	Chloramphenicol	823		verbindungen	833
	Tetracycline	823		Primär anaerobe Abwasserbehandlung	833
	Makrolide	823	20.15.2	Kompostierung	834
	Polypeptidantibiotika	823	20.15.3	Trinkwasserbehandlung	835
20.8.4	Mykotoxine	824	20.15.4	Abluftreinigung	835
20.9	Vitamine	825	20.15.5	Bodensanierung	835
20.10	Exopolysaccharide und Tenside	825	20.16	Metalllaugung und Renaturierung im	
20.11	Enzyme	826		Tagebau	836
20.12	Polyhydroxyalkanoate	827	20.17	Energieversorgung	836
20.13	Gentechnische Verfahren	828	20.18	Biosensoren	838
20.13.1	Klassische Verfahren versus Gentechnik ..	828	20.19	Mikrobiologische Prozesskontrolle ...	838
20.13.2	Überblick über Prozesse	828	20.20	Mikrobielle Schädlingsbekämpfung ...	839
20.13.3	Produktionsstämme	828			
20.13.4	Vektoren	829			
21	Anhang				
21.1	Thermodynamische Grundlagen des		21.2	Vocabularium	848
	Stoffwechsels	842			
	Sachverzeichnis				855