

Springer-Lehrbuch

## Lehninger Biochemie

Bearbeitet von

David Nelson, Michael Cox, Gerhard Heldmaier, Bärbel Häcker, Andreas Held, Gudrun Maxam, Claudia Schön, Nina Zellerhoff

4. Aufl. 2009, 3., korr. Nachdruck 2010 2010. Buch. XLIV, 1668 S. Hardcover

ISBN 978 3 540 68637 8

Format (B x L): 21 x 27,9 cm

[Weitere Fachgebiete > Chemie, Biowissenschaften, Agrarwissenschaften > Biochemie](#)

Zu [Leseprobe](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Die Grundlagen der Biochemie</b> . . . . .	1
<b>1.1 Zelluläre Grundlagen</b> . . . . .	3
1.1.1 Zellen sind die Bau- und Funktionseinheiten aller Lebewesen . . . . .	4
1.1.2 Die Zellgröße ist durch Diffusion begrenzt . . . . .	4
1.1.3 Es gibt drei verschiedene Domänen des Lebens . . . . .	5
1.1.4 <i>Escherichia coli</i> ist das am häufigsten untersuchte Bakterium . . . . .	6
1.1.5 Eukaryotische Zellen besitzen eine Vielzahl von Organellen, die von Membranen umgeben sind und die sich für Untersuchungen isolieren lassen . . . . .	7
1.1.6 Das Cytoplasma wird durch das Cytoskelett organisiert und ist sehr dynamisch . . . . .	10
1.1.7 Zellen bilden supramolekulare Strukturen . . . . .	11
1.1.8 <i>In vitro</i> -Untersuchungen können dazu führen, dass wichtige Wechselwirkungen zwischen Molekülen übersehen werden . . . . .	11
<b>1.2 Chemische Grundlagen</b> . . . . .	14
1.2.1 Biomoleküle sind Kohlenstoffverbindungen mit einer Vielzahl funktioneller Gruppen . . . . .	15
1.2.2 Zellen enthalten einen universellen Satz kleiner Moleküle . . . . .	16
1.2.3 Die Hauptbestandteile von Zellen sind Makromoleküle . . . . .	17
<b>EXKURS 1-1 Molekulargewicht, Molekülmasse und deren korrekte Einheiten</b> . . . . .	18
1.2.4 Konfiguration und Konformation definieren die dreidimensionale Struktur . . . . .	19
<b>EXKURS 1-2 Louis Pasteur und die optische Aktivität: In vino veritas</b> . . . . .	22
1.2.5 Die Wechselwirkungen zwischen Biomolekülen sind stereospezifisch . . . . .	23
<b>1.3 Physikalische Grundlagen</b> . . . . .	25
1.3.1 Lebewesen befinden sich in einem Fließgleichgewicht und stehen niemals mit ihrer Umgebung im Gleichgewicht . . . . .	25
1.3.2 Organismen wandeln Energie und Materie aus ihrer Umgebung um . . . . .	26
1.3.3 Organismen erhalten Energie aus einem Elektronenfluss . . . . .	26
<b>EXKURS 1-3 Entropie: Die Vorteile von Unordnung</b> . . . . .	27
1.3.4 Das Schaffen von Ordnung und ihre Erhaltung erfordern Arbeit und Energie . . . . .	28
1.3.5 Die Energiekopplung verknüpft biologische Reaktionen . . . . .	30
1.3.6 $K_{eq}$ und $\Delta G^\circ$ sind Maße dafür, wie leicht eine Reaktion spontan abläuft . . . . .	31
1.3.7 Enzyme ermöglichen eine Abfolge chemischer Reaktionen . . . . .	32
1.3.8 Die Regulation des Stoffwechsels sorgt für Balance und Ökonomie . . . . .	34
<b>1.4 Genetische Grundlagen</b> . . . . .	35
1.4.1 Die genetische Kontinuität wird in einzelnen DNA-Molekülen bewahrt . . . . .	36
1.4.2 Die DNA-Struktur ermöglicht ihre Replikation und Reparatur mit nahezu perfekter Genauigkeit . . . . .	37
1.4.3 In der linearen DNA-Sequenz ist die Information für dreidimensionale Proteinstrukturen gespeichert . . . . .	37
<b>1.5 Grundlagen der Evolution</b> . . . . .	38
1.5.1 Veränderungen in der Erbinformation ermöglichen die Evolution . . . . .	38



<b>3.2</b>	<b>Peptide und Proteine</b> . . . . .	108	4.2.1	Die $\alpha$ -Helix ist eine häufige Sekundärstruktur in Proteinen . . . . .	155
3.2.1	Peptide sind Ketten aus Aminosäuren . . . . .	108	<b>EXKURS 4-1 Die Unterscheidung der rechten von der linken Hand</b> . . . . .		157
3.2.2	Peptide lassen sich anhand ihres Dissoziationsverhaltens unterscheiden . . . . .	110	4.2.2	Die Aminosäuresequenz beeinflusst die Stabilität der $\alpha$ -Helix . . . . .	157
3.2.3	Biologische aktive Peptide und Polypeptide kommen in unterschiedlichen Größen und Zusammensetzungen vor . . . . .	110	4.2.3	Die $\beta$ -Konformation ordnet Polypeptide zu Schichten . . . . .	158
3.2.4	Einige Proteine enthalten neben Aminosäuren noch andere chemische Gruppen . . . . .	112	4.2.4	$\beta$ -Schleifen kommen in Proteinen häufig vor . . . . .	159
<b>3.3</b>	<b>Arbeiten mit Proteinen</b> . . . . .	113	4.2.5	Häufig auftretende Sekundärstrukturen besitzen charakteristische Diederwinkel . . . . .	160
3.3.1	Proteine können isoliert und gereinigt werden . . . . .	113	4.2.6	Häufig auftretende Sekundärstrukturen lassen sich durch Zirkulardichroismus bestimmen . . . . .	160
3.3.2	Proteine können durch Elektrophorese getrennt und charakterisiert werden . . . . .	117	<b>4.3 Tertiär- und Quartärstrukturen von Proteinen</b> . . . . .		162
3.3.3	Nichtgetrennte Proteine lassen sich quantitativ bestimmen . . . . .	120	4.3.1	Faserproteine sind an ihre Strukturfunktion angepasst . . . . .	162
<b>3.4</b>	<b>Die Struktur von Proteinen: Primärstruktur</b> . . . . .	122	<b>EXKURS 4-2 Dauerwellen sind das Ergebnis eines biochemischen Vorgangs</b> . . . . .		164
3.4.1	Die Funktion eines Proteins wird durch seine Aminosäuresequenz bestimmt . . . . .	123	<b>EXKURS 4-3 Medizin Warum Seeleute, Forscher und College-Studenten frisches Obst und Gemüse essen sollten</b> . . . . .		166
3.4.2	Die Aminosäuresequenzen von Millionen von Proteinen sind bekannt . . . . .	123	4.3.2	Die strukturelle Vielfalt spiegelt die funktionelle Vielfalt globulärer Proteine wider . . . . .	168
3.4.3	Kurze Polypeptide werden mit automatisierten Verfahren sequenziert . . . . .	124	<b>EXKURS 4-4 Die Proteindatenbank</b> . . . . .		169
3.4.4	Große Proteine müssen in kleinen Abschnitten sequenziert werden . . . . .	126	4.3.3	Myoglobin lieferte frühe Hinweise auf die komplexe Struktur globulärer Proteine . . . . .	170
3.4.5	Aminosäuresequenzen können auch mit anderen Methoden abgeleitet werden . . . . .	129	<b>EXKURS 4-5 Methoden zur Bestimmung der dreidimensionalen Struktur eines Proteins</b> . . . . .		172
3.4.6	Kleine Peptide und Proteine können chemisch synthetisiert werden . . . . .	130	4.3.4	Globuläre Proteine besitzen vielfältige Tertiärstrukturen . . . . .	176
<b>EXKURS 3-2 Massenspektrometrische Untersuchung von Proteinen</b> . . . . .		131	4.3.5	Proteinmotive bilden die Grundlage für die Klassifizierung der Proteinstruktur . . . . .	178
3.4.7	Aminosäuresequenzen liefern wichtige biochemische Informationen . . . . .	133	4.3.6	Quartärstrukturen von Proteinen reichen von einfachen Dimeren bis zu großen Komplexen . . . . .	181
3.4.8	Proteinsequenzen können zur Aufklärung der Evolution des Lebens auf der Erde beitragen . . . . .	135	<b>4.4 Denaturierung und Faltung von Proteinen</b> . . . . .		184
<b>EXKURS 3-3 Consensussequenzen und Sequenzlogos</b> . . . . .		136	4.4.1	Der Verlust der Proteinstruktur führt zum Funktionsverlust . . . . .	184
<b>4 Die dreidimensionale Struktur von Proteinen</b> . . . . .		149	4.4.2	Die Aminosäuresequenz bestimmt die Tertiärstruktur . . . . .	184
<b>4.1 Übersicht über die Proteinstruktur</b> . . . . .		150			
4.1.1	Die Proteinkonformation wird hauptsächlich durch schwache Wechselwirkungen stabilisiert . . . . .	150			
4.1.2	Die Peptidbindung ist starr und planar . . . . .	153			
<b>4.2 Sekundärstruktur von Proteinen</b> . . . . .		155			

4.4.3	Polypeptide falten sich rasch in einem mehrstufigen Prozess . . . . .	185	5.2.3	Antikörper binden fest und spezifisch an Antigene . . . . .	228
4.4.4	Bei einigen Proteinen wird die Faltung unterstützt . . . . .	188	5.2.4	Die Antikörper-Antigen-Wechsel- wirkung ist die Grundlage für eine Vielzahl wichtiger analytischer Verfahren . . . . .	229
4.4.5	Defekte in der Proteinfaltung können die molekulare Ursache für ein breites Spektrum genetischer Erkrankungen des Menschen sein . . . .	190	<b>5.3 Die Modulation von Proteinwechsel- wirkungen durch chemische Energie: Actin, Myosin und molekulare Motoren . . . . .</b>	<b>231</b>	
	<b>EXKURS 4-6 Medizin Tod durch Fehl- faltung: die Prionenerkrankungen . . . .</b>	<b>193</b>	5.3.1	Actin und Myosin sind die wichtigsten Proteine des Muskels . . . . .	232
<b>5</b>	<b>Proteinfunktion . . . . .</b>	<b>201</b>	5.3.2	Zusätzliche Proteine lassen aus dünnen und dicken Filamenten geordnete Strukturen entstehen . . . .	234
<b>5.1</b>	<b>Die reversible Bindung eines Proteins an einen Liganden: sauerstoffbindende Proteine . . . . .</b>	<b>202</b>	5.3.3	Dicke Myosinfilamente gleiten entlang dünner Actinfilamente . . . . .	235
5.1.1	Sauerstoff kann an eine prothetische Hämgruppe binden . . . .	203	<b>6 Enzyme . . . . .</b>	<b>243</b>	
5.1.2	Myoglobin hat eine einzige Bindungsstelle für Sauerstoff . . . . .	204	<b>6.1 Einführung . . . . .</b>	<b>244</b>	
5.1.3	Wechselwirkungen zwischen Protein und Ligand lassen sich quantitativ beschreiben . . . . .	205	6.1.1	Die meisten Enzyme sind Proteine . . . .	245
5.1.4	Die Proteinstruktur beeinflusst die Ligandenbindung . . . . .	208	6.1.2	Die Klassifizierung der Enzyme erfolgt nach den Reaktionen, die sie katalysieren . . . . .	246
5.1.5	Hämoglobin transportiert den Sauerstoff im Blut . . . . .	209	<b>6.2 Die Funktionsweise von Enzymen . . . .</b>	<b>247</b>	
5.1.6	Untereinheiten des Hämoglobins ähneln in ihrer Struktur dem Myoglobin	210	6.2.1	Enzyme beeinflussen die Geschwindigkeit, aber nicht das Gleichgewicht einer Reaktion . . . .	247
5.1.7	Bei der Sauerstoffbindung erfährt Hämoglobin eine Strukturänderung . .	212	6.2.2	Reaktionsgeschwindigkeiten und -gleichgewichte sind thermodynamisch genau definiert . . . .	250
5.1.8	Hämoglobin bindet Sauerstoff kooperativ . . . . .	214	6.2.3	Wenige Prinzipien genügen, um die katalytische Leistung und Spezifität von Enzymen zu erklären . . . .	251
5.1.9	Die kooperative Ligandenbindung lässt sich quantitativ beschreiben . . . .	215	6.2.4	Schwache Wechselwirkungen zwischen Enzym und Substrat werden im Übergangszustand optimiert . . . . .	252
	<b>EXKURS 5-1 Medizin Kohlenmonoxid: ein schleicher Mörder . . . . .</b>	<b>216</b>	6.2.5	Bindungsenergie leistet einen Beitrag zur Spezifität der Reaktion und ihrer Katalyse . . . . .	254
5.1.10	Zwei Modelle zeigen mögliche Mecha- nismen der kooperativen Bindung . . . .	218	6.2.6	Spezifische katalytische Gruppen beteiligen sich an der Katalyse . . . . .	256
5.1.11	Hämoglobin transportiert auch H <sup>+</sup> und CO <sub>2</sub> . . . . .	219	<b>6.3 Durch Enzymkinetik zum Verständnis der Reaktionsmechanismen . . . . .</b>	<b>259</b>	
5.1.12	Die Bindung von Sauerstoff an Hämoglobin wird durch 2,3-Bisphosphoglycerat reguliert . . . .	221	6.3.1	Die Substratkonzentration beeinflusst die Geschwindigkeit enzymkatalysierter Reaktionen . . . . .	260
5.1.13	Sichelzellanämie ist eine molekulare Erkrankung des Hämoglobins . . . . .	222	6.3.2	Die Beziehung zwischen Substratkonzentration und Reaktionsgeschwindigkeit kann quantitativ ausgedrückt werden . . . . .	261
<b>5.2</b>	<b>Komplementäre Wechselwirkungen zwischen Proteinen: Immunsystem und Immunglobuline . . . . .</b>	<b>224</b>			
5.2.1	Die Immunantwort zeichnet sich durch ein ganzes Heer spezialisierter Zellen und Proteine aus . . . . .	225			
5.2.2	Antikörper besitzen 2 identische Antigenbindungsstellen . .	226			

6.3.3	Zum Vergleich enzymatischer Aktivitäten werden kinetische Parameter herangezogen . . . . .	263
	<b>EXKURS 6-1 Transformationen der Michaelis-Menten-Gleichung: die doppelt-reziproke Auftragung</b> . .	264
6.3.4	Viele Enzyme katalysieren Reaktionen mit 2 oder mehr Substraten . . . . .	268
6.3.5	Die Kinetik der prästationären Phase kann Hinweise auf spezifische Reaktionsschritte liefern . . . . .	269
6.3.6	Enzyme können reversibel oder irreversibel gehemmt werden . . .	269
	<b>EXKURS 6-2 Kinetische Bestimmung der verschiedenen Hemmungsmechanismen</b> . . . . .	271
6.3.7	Die Enzymaktivität ist vom pH-Wert abhängig . . . . .	274
<b>6.4</b>	<b>Beispiele enzymatischer Reaktionen</b>	275
6.4.1	Der Wirkungsmechanismus von Chymotrypsin erfolgt über Acylierung und Deacylierung eines Ser-Restes . . .	275
	<b>EXKURS 6-3 Hinweise auf die Komplementarität von Enzym und Übergangszustand</b> . . . . .	281
6.4.2	Die Substratbindung von Hexokinase erfolgt über <i>induced fit</i> . . . . .	283
6.4.3	Für den Reaktionsmechanismus der Enolase sind Metall-Ionen erforderlich .	284
6.4.4	Lysozym nutzt 2 aufeinander folgende nucleophile Verdrängungsreaktionen .	285
6.4.5	Das Verständnis enzymatischer Mechanismen ermöglicht wichtige Fortschritte in der Medizin . . . . .	288
<b>6.5</b>	<b>Regulatorische Enzyme</b> . . . . .	293
6.5.1	Allosterische Enzyme reagieren auf die Bindung eines Modulators mit einer Konformationsänderung . . .	294
6.5.2	In vielen Stoffwechselwegen werden die regulatorischen Schritte von allosterischen Enzymen katalysiert	295
6.5.3	Die kinetischen Eigenschaften allosterischer Enzyme weichen vom „Michaelis-Menten-Verhalten“ ab .	295
6.5.4	Einige Enzyme werden durch reversible kovalente Modifikation reguliert . . . . .	296
6.5.5	Phosphorylgruppen beeinflussen die Struktur und katalytische Aktivität von Proteinen . . . . .	298
6.5.6	Multiple Phosphorylierungen erlauben eine hervorragende regulatorische Kontrolle . . . . .	300

6.5.7	Einige Enzyme und andere Proteine werden durch proteolytische Spaltung einer Enzymvorstufe reguliert . . . . .	301
6.5.8	Einige regulatorische Enzyme verwenden mehrere regulatorische Mechanismen . . . . .	303
<b>7</b>	<b>Kohlenhydrate und Glycobiologie</b> . . . . .	311
<b>7.1</b>	<b>Monosaccharide und Disaccharide</b> . .	312
7.1.1	Die beiden Monosaccharidfamilien sind Aldosen und Ketosen . . . . .	312
7.1.2	Monosaccharide haben asymmetrische Zentren . . . . .	313
7.1.3	Die häufigen Monosaccharide haben eine ringförmige Struktur . . . .	316
7.1.4	Lebewesen enthalten eine Vielzahl von Hexosederivaten . . . . .	318
7.1.5	Monosaccharide sind Reduktionsmittel	319
7.1.6	Disaccharide enthalten eine glycosidische Bindung . . . . .	320
	<b>EXKURS 7-1 Medizin Messung des Blutglucosespiegels zur Diagnose und Behandlung von Diabetes</b> . . . .	321
<b>7.2</b>	<b>Polysaccharide</b> . . . . .	324
7.2.1	Einige Homopolysaccharide sind Formen gespeicherter Brennstoffe	325
7.2.2	Einige Homopolysaccharide bilden Strukturen . . . . .	326
7.2.3	Die Faltung von Homopolysacchariden wird durch sterische Faktoren und Wasserstoffbrücken beeinflusst . .	327
7.2.4	Die Zellwände von Bakterien und Algen enthalten Struktur-Heteropolysaccharide . . . . .	330
7.2.5	Glycosaminoglycane sind Heteropolysaccharide der extrazellulären Matrix .	331
<b>7.3</b>	<b>Glykokonjugate: Proteoglycane, Glycoproteine und Glycolipide</b> . . . .	334
7.3.1	Proteoglycane sind glycosaminoglycanhaltige Makromoleküle der Zelloberfläche und der extrazellulären Matrix . . . . .	335
7.3.2	An Glycoproteine sind kovalent Oligosaccharide gebunden . . . . .	338
7.3.3	Glycolipide und Lipopolysaccharide sind Bestandteile von Membranen . . .	340
<b>7.4</b>	<b>Kohlenhydrate als informationsreiche Moleküle: der Zuckercode</b> . . .	342
7.4.1	Lectine sind Proteine, die den Zuckercode lesen und zahlreiche biologische Prozesse vermitteln . . . . .	343

7.4.2	Wechselwirkungen zwischen Lectinen und Kohlenhydraten sind höchst spezifisch und oft multivalent . . . . .	348	9.1.2	Klonierungsvektoren erlauben die Vermehrung eingefügter DNA-Abschnitte . . . . .	406
<b>7.5</b>	<b>Arbeiten mit Kohlenhydraten . . . . .</b>	<b>350</b>	9.1.3	Spezifische DNA-Sequenzen können durch Hybridisierung nachgewiesen werden . . . . .	411
<b>8</b>	<b>Nucleotide und Nucleinsäuren . . . . .</b>	<b>361</b>	9.1.4	Die Expression klonierter Gene liefert große Mengen an Protein . . . . .	412
<b>8.1</b>	<b>Einige Grundlagen . . . . .</b>	<b>361</b>	9.1.5	Veränderungen in klonierten Genen erzeugen modifizierte Proteine . . . . .	413
8.1.1	Nucleotide und Nucleinsäuren enthalten charakteristische Basen und Pentosen . . . . .	362	9.1.6	Terminale <i>tags</i> liefern Bindungsstellen für die Affinitätsreinigung . . . . .	415
8.1.2	In Nucleinsäuren sind die aufeinander folgenden Nucleotide über Phosphodiesterbindungen verknüpft . . . . .	365	<b>9.2</b>	<b>Vom Gen zum Genom . . . . .</b>	<b>417</b>
8.1.3	Die Eigenschaften der Nucleotidbasen beeinflussen die dreidimensionale Struktur von Nucleinsäuren . . . . .	366	9.2.1	DNA-Bibliotheken liefern spezielle Kataloge für genetische Informationen . . . . .	418
<b>8.2</b>	<b>Die Struktur der Nucleinsäuren . . . . .</b>	<b>368</b>	9.2.2	Die Polymerasekettenreaktion vermehrt spezifische DNA-Sequenzen . . . . .	420
8.2.1	Die DNA ist eine Doppelhelix, in der die genetische Information gespeichert wird . . . . .	369	 <b>EXKURS 9-1 Eine mächtige Waffe in der Gerichtsmedizin . . . . .</b>	<b>422</b>	
8.2.2	Die DNA kann unterschiedliche dreidimensionale Formen annehmen . . . . .	372	9.2.3	Genomsequenzen liefern die endgültigen genetischen Bibliotheken . . . . .	426
8.2.3	Bestimmte DNA-Sequenzen nehmen ungewöhnliche Strukturen an . . . . .	374	<b>9.3</b>	<b>Vom Genom zum Proteom . . . . .</b>	<b>429</b>
8.2.4	Messenger-RNAs codieren für Polypeptidketten . . . . .	376	9.3.1	Sequenz- oder Strukturverwandtschaften liefern Informationen über die Proteinfunktion . . . . .	430
8.2.5	Viele RNAs haben kompliziertere dreidimensionale Strukturen . . . . .	377	9.3.2	Zelluläre Expressionsmuster können die zelluläre Funktion eines Gens aufdecken . . . . .	431
<b>8.3</b>	<b>Die Chemie der Nucleinsäuren . . . . .</b>	<b>381</b>	9.3.3	Die Ermittlung von Protein-Protein-Wechselwirkungen unterstützt die Bestimmung der zellulären und molekularen Funktion . . . . .	434
8.3.1	Doppelhelikale DNA und RNA kann denaturiert werden . . . . .	381	<b>9.4</b>	<b>Genomveränderungen und neue biotechnologische Produkte . . . . .</b>	<b>437</b>
8.3.2	Nucleinsäuren aus verschiedenen Spezies können miteinander hybridisieren . . . . .	383	9.4.1	Ein parasitisch lebendes Bakterium ermöglicht die Klonierung in Pflanzen . . . . .	437
8.3.3	Nichtenzymatische Veränderungen von Nucleotiden und Nucleinsäuren . . . . .	384	9.4.2	Die Manipulation von Tierzellgenomen liefert Informationen über Chromosomenstruktur und Genexpression . . . . .	441
8.3.4	Einige DNA-Basen sind methyliert . . . . .	387	 <b>EXKURS 9-2 Medizin Das Genom des Menschen und die Gentherapie . . . . .</b>	<b>445</b>	
8.3.5	Sequenzierung langer DNA-Stränge . . . . .	387	9.4.3	Neue Technologien beschleunigen die Entdeckung neuer pharmazeutischer Wirkstoffe . . . . .	447
8.3.6	Die chemische DNA-Synthese wurde automatisiert . . . . .	391	9.4.4	Die DNA-Rekombinationstechnik schafft neue Produkte und Herausforderungen . . . . .	448
<b>8.4</b>	<b>Andere Funktionen der Nucleotide . . . . .</b>	<b>391</b>	<b>10</b>	<b>Lipide . . . . .</b>	<b>457</b>
8.4.1	Nucleotide sind in Zellen die Träger der chemischen Energie . . . . .	391	<b>10.1</b>	<b>Speicherlipide . . . . .</b>	<b>457</b>
8.4.2	Viele Cofaktoren von Enzymen enthalten Adeninnucleotide . . . . .	392			
8.4.3	Manche Nucleotide haben regulatorische Funktionen . . . . .	393			
<b>9</b>	<b>DNA-Rekombinationstechnik . . . . .</b>	<b>401</b>			
<b>9.1</b>	<b>DNA-Klonierung – die Grundlagen . . . . .</b>	<b>402</b>			
9.1.1	Mit Restriktionsendonucleasen und DNA-Ligase kann man rekombinante DNA herstellen . . . . .	403			

10.1.1	Fettsäuren sind Kohlenwasserstoffderivate . . . . .	458
10.1.2	Triacylglycerine sind Fettsäureester des Glycerins . . . . .	461
10.1.3	Triacylglycerine speichern Energie und sorgen für eine Isolierung . . . . .	461
10.1.4	Die Teilhydrierung von Speiseölen erzeugt <i>trans</i> -Fettsäuren . . . . .	462
	<b>EXKURS 10-1 Pottwale: mit Köpfen voller Fett in die Tiefe . . . . .</b>	<b>463</b>
10.1.5	Wachse speichern Energie und sind wasserabweisend . . . . .	464
<b>10.2</b>	<b>Struktur lipide in Membranen . . . . .</b>	<b>465</b>
10.2.1	Glycerophospholipide leiten sich von Phosphatidsäure ab . . . . .	466
10.2.2	Bei manchen Glycerophospholipiden sind die Fettsäuren mit dem Molekül verethert . . . . .	467
10.2.3	Chloroplasten enthalten Galactolipide und Sulfolipide . . . . .	468
10.2.4	Archaeobakterien enthalten einzigartige Membranlipide . . . . .	468
10.2.5	Sphingolipide stammen vom Sphingosin ab . . . . .	470
10.2.6	Sphingolipide auf Zelloberflächen sind Stellen für die biologische Erkennung . . . . .	472
10.2.7	Phospholipide und Sphingolipide werden in Lysosomen abgebaut . . . . .	472
10.2.8	Sterine besitzen 4 fusionierte Kohlenstoffringe . . . . .	473
	<b>EXKURS 10-2 Medizin Anormale Anhäufungen von Membranlipiden: Einige menschliche Erbkrankheiten . . . . .</b>	<b>474</b>
<b>10.3</b>	<b>Lipide als Signalmoleküle, Cofaktoren und Pigmente . . . . .</b>	<b>475</b>
10.3.1	Phosphatidylinositole und Sphingosinderivate dienen als intrazelluläre Signale . . . . .	476
10.3.2	Eicosanoide übermitteln Signale an benachbarte Zellen . . . . .	476
10.3.3	Steroidhormone übermitteln Signale zwischen den Geweben . . . . .	477
10.3.4	Gefäßpflanzen erzeugen Tausende flüchtiger Signale . . . . .	478
10.3.5	Die Vitamine A und D sind Hormonvorstufen . . . . .	479
10.3.6	Die Vitamine E und K sowie die Lipidchinone sind Cofaktoren für Redoxreaktionen . . . . .	481
10.3.7	Dolichole aktivieren Zuckervorstufen für die Biosynthese . . . . .	482
10.3.8	Viele natürliche Pigmente sind konjugierte Lipiddiene . . . . .	482

<b>10.4</b>	<b>Isolierung und Untersuchung von Lipiden . . . . .</b>	<b>483</b>
10.4.1	Zur Lipidextraktion benötigt man organische Lösungsmittel . . . . .	484
10.4.2	Mithilfe der Adsorptionschromatographie trennt man unterschiedlich polare Lipide . . . . .	484
10.4.3	Mithilfe der Gasflüssigkeitschromatographie trennt man Gemische flüchtiger Lipidderivate . . . . .	485
10.4.4	Eine spezifische Hydrolyse ist ein erster Schritt bei der Bestimmung der Lipidstruktur . . . . .	485
10.4.5	Mithilfe der Massenspektrometrie lässt sich die gesamte Lipidstruktur entschlüsseln . . . . .	486
10.4.6	Die Lipidomik strebt danach, alle Lipide und ihre Funktionen zu katalogisieren . . . . .	486
<b>11</b>	<b>Biologische Membranen und Transport . . . . .</b>	<b>493</b>
<b>11.1</b>	<b>Zusammensetzung und Aufbau von Membranen . . . . .</b>	<b>494</b>
11.1.1	Jeder Membrantyp besitzt charakteristische Lipide und Proteine . . . . .	494
11.1.2	Alle biologischen Membranen haben wichtige gemeinsame Eigenschaften . . . . .	496
11.1.3	Eine Lipiddoppelschicht ist das grundlegende Strukturelement von Membranen . . . . .	497
11.1.4	Drei Typen von Membranproteinen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Verknüpfung mit der Membran . . . . .	498
11.1.5	Viele Membranproteine durchspannen die Lipiddoppelschicht . . . . .	499
11.1.6	Integrale Proteine sind durch hydrophobe Wechselwirkungen mit Lipiden in der Membran verankert . . . . .	500
11.1.7	Manchmal lässt sich die Topologie eines integralen Membranproteins aufgrund seiner Sequenz vorhersagen . . . . .	500
11.1.8	Kovalent verknüpfte Lipide verankern manche Membranproteine . . . . .	503
<b>11.2</b>	<b>Die Membrandynamik . . . . .</b>	<b>505</b>
11.2.1	Acylgruppen im Inneren der Doppelschicht sind in unterschiedlichem Maß geordnet . . . . .	505
11.2.2	Der Wechsel von Lipiden von einer Schicht der Membran in die andere erfordert eine Katalyse . . . . .	506
11.2.3	Lipide und Proteine diffundieren in der Doppelschicht seitwärts . . . . .	507

11.2.4	Sphingolipide und Cholesterin gruppieren sich in „Membranflößen“ . . .	508	11.3.12	Die Wirkungsweise der Ionenkanäle lässt sich elektrisch messen . . . . .	538
<p><b>EXKURS 11-1 Rasterkraftmikroskopie zur Visualisierung der Membranproteine . . . . . 510</b></p>			11.3.13	Anhand der Struktur eines K <sup>+</sup> -Kanals lässt sich erkennen, worauf seine Spezifität beruht . . . . .	539
11.2.5	Die Wölbung und Verschmelzung der Membran spielen bei vielen biologischen Vorgängen eine zentrale Rolle . . . . .	511	11.3.14	Gesteuerte Ionenkanäle sind für die Nervenfunktion von zentraler Bedeutung . . . . .	542
11.2.6	Integrale Proteine der Plasmamembran sind an der Oberflächenadhäsion, der Signalübertragung und an anderen zellulären Vorgängen beteiligt . . . . .	513	11.3.15	Defekte Ionenkanäle können erhebliche physiologische Auswirkungen haben . . . . .	544
<p><b>11.3 Transport gelöster Stoffe durch Membranen . . . . . 514</b></p>			<p><b>12 Biologische Signale . . . . . 553</b></p>		
11.3.1	Membranproteine erleichtern den passiven Transport . . . . .	514	<p><b>12.1 Allgemeine Merkmale der Signalübertragung . . . . . 553</b></p>		
11.3.2	Transporter lassen sich anhand ihrer Struktur in Superfamilien einteilen . . .	516	<p><b>EXKURS 12-1 Die Scatchard-Analyse misst die Wechselwirkungen zwischen Ligand und Rezeptor . . . . . 555</b></p>		
11.3.3	Der Glucosetransporter der Erythrocyten vermittelt einen passiven Transport	517	<p><b>12.2 G-Protein-gekoppelte Rezeptoren und Second Messenger . . . . . 559</b></p>		
<p><b>EXKURS 11-2 Medizin Gestörter Glucose- und Wassertransport bei 2 Formen von Diabetes . . . . . 520</b></p>			12.2.1	Das $\beta$ -adrenerge Rezeptorsystem wirkt über den Second Messenger cAMP . . .	559
11.3.4	Der Chlorid-Hydrogencarbonat-Austauscher katalysiert den elektroneutralen Cotransport von Anionen durch die Plasmamembran . .	521	<p><b>EXKURS 12-2 Medizin G-Proteine: Binäre Schalter von Gesundheit und Krankheit . . . . . 561</b></p>		
11.3.5	Durch aktiven Transport werden gelöste Stoffe gegen einen Konzentrations- oder elektrochemischen Gradienten bewegt . . . . .	521	12.2.2	Mehrere Mechanismen beenden die $\beta$ -adrenerge Reaktion . . . . .	566
11.3.6	ATPasen von P-Typ werden während ihrer katalytischen Zyklen phosphoryliert . . . . .	523	12.2.3	Der $\beta$ -adrenerge Rezeptor wird durch Phosphorylierung und durch die Assoziation mit Arrestin desensibilisiert . . . . .	566
11.3.7	ATPasen vom F-Typ sind reversible, durch ATP angetriebene Protonenpumpen . . . . .	527	12.2.4	Zyklisches AMP dient einer Reihe von regulatorischen Molekülen als Second Messenger . . . . .	568
11.3.8	ABC-Transporter verwenden ATP, um den aktiven Transport eines breiten Spektrums an Substraten anzutreiben .	528	12.2.5	Diacylglycerin, Inositoltrisphosphat und Ca <sup>2+</sup> haben als Second Messenger ähnliche Aufgaben . . . . .	569
<p><b>EXKURS 11-3 Medizin Cystische Fibrose entsteht aufgrund eines defekten Ionenkanals . . . . . 529</b></p>			<p><b>EXKURS 12-3 FRET: Biochemie, in lebenden Zellen sichtbar gemacht . . . . . 570</b></p>		
11.3.9	Ionengradienten liefern die Energie für den sekundär aktiven Transport . .	530	12.2.6	Calcium ist ein Second Messenger, der sich räumlich und zeitlich lokalisieren lässt . . . . .	574
11.3.10	Aquaporine bilden hydrophile Kanäle für den Wasserdurchtritt durch die Membran . . . . .	534	<p><b>12.3 Rezeptor-Tyrosin-Kinasen . . . . . 577</b></p>		
11.3.11	Ionenselektive Kanäle erlauben schnelle Ionenbewegungen durch die Membran . . . . .	537	12.3.1	Die Stimulation des Insulinrezeptors setzt eine Kaskade von Proteinphosphorylierungsreaktionen in Gang .	577
			12.3.2	Das Membranphospholipid PIP <sub>3</sub> wirkt auf einen Zweig im Insulinsignalweg . .	580
			12.3.3	Das JAK-STAT-Signalsystem umfasst auch die Aktivität einer Tyrosin-Kinase .	583

12.3.4	Zwischen Signalsystemen ist ein Austausch üblich und komplex . . .	584
<b>12.4</b>	<b>Rezeptor-Guanylat-Cyclase, cGMP und Proteinkinase G . . . . .</b>	<b>585</b>
<b>12.5</b>	<b>Multivalente Adaptorproteine und Membranflöße . . . . .</b>	<b>588</b>
12.5.1	Proteinmodule binden phosphorylierte Tyr-, Ser- oder Thr-Reste in Partnerproteinen . . .	588
12.5.2	Membranflöße und Caveolen trennen Signalproteine ab . . . . .	591
<b>12.6</b>	<b>Gesteuerte Ionenkanäle . . . . .</b>	<b>592</b>
12.6.1	Erregbare Zellen nutzen Ionenkanäle für die Übertragung elektrischer Signale . . . . .	592
12.6.2	Spannungsgesteuerte Ionenkanäle erzeugen neuronale Aktionspotenziale	594
12.6.3	Der Acetylcholinrezeptor ist ein ligandengesteuerter Ionenkanal . .	597
12.6.4	Neuronen besitzen Rezeptorkanäle, die auf unterschiedliche Neurotransmitter reagieren . . . . .	599
12.6.5	Toxine haben Ionenkanäle zum Ziel . .	599
<b>12.7</b>	<b>Integrine: Bidirektionale Zelladhäsionsrezeptoren . . . . .</b>	<b>600</b>
<b>12.8</b>	<b>Regulation der Transkription durch Steroidhormone . . . . .</b>	<b>602</b>
<b>12.9</b>	<b>Signalübertragung bei Mikroorganismen und Pflanzen . . . .</b>	<b>604</b>
12.9.1	Die Signalübertragung bei Bakterien umfasst die Phosphorylierung eines Zwei-Komponenten-Systems . . .	604
12.9.2	Pflanzliche Signalsysteme besitzen einige der Komponenten, die auch in Mikroorganismen und Säugetieren vorkommen . . . . .	605
12.9.3	Pflanzen erkennen Ethylen über ein Zwei-Komponenten-System und eine MAPK-Kaskade . . . . .	607
12.9.4	Rezeptorähnliche Proteinkinasen übermitteln Signale von Peptiden und Brassinosteroiden . . . . .	607
<b>12.10</b>	<b>Übertragung sensorischer Reize beim Sehen, Riechen und Schmecken . . . .</b>	<b>609</b>
12.10.1	Das Sehsystem verwendet den klassischen GPCR-Mechanismus . . . .	609
12.10.2	Angeregtes Rhodopsin senkt mithilfe des G-Proteins Transducin die cGMP-Konzentration . . . . .	611
12.10.3	Das visuelle Signal wird rasch abgeschaltet . . . . .	612

12.10.4	Zapfenzellen sind auf das Farbsehen spezialisiert . . . . .	613
	<b>EXKURS 12-4 Medizin Farblindheit: Wie ein Experiment von John Dalton nach seinem Tod erfolgreich abgeschlossen wurde . .</b>	<b>614</b>
12.10.5	Beim Riechen und Schmecken nutzen Wirbeltiere ähnliche Mechanismen wie beim Sehen . . . . .	614
12.10.6	GPCRs der sensorischen und der hormonellen Signalsysteme haben einige gemeinsame Merkmale .	616
<b>12.11</b>	<b>Regulation des Zellzyklus durch Proteinkinasen . . . . .</b>	<b>618</b>
12.11.1	Der Zellzyklus besteht aus 4 Phasen . .	618
12.11.2	Die Konzentration der cyclin-abhängigen Proteinkinasen oszilliert . .	619
12.11.3	CDKs regulieren die Zellteilung durch Phosphorylierung entscheidender Proteine . . . . .	622
<b>12.12</b>	<b>Onkogene, Tumorsuppressorgene und der programmierte Zelltod . . . .</b>	<b>624</b>
12.12.1	Onkogene sind mutierte Formen von Genen für Proteine, die den Zellzyklus regulieren . . . . .	624
12.12.2	Fehler in bestimmten Genen heben die normale Beschränkung der Zellteilung auf . . . . .	625
	<b>EXKURS 12-5 Medizin Entwicklung von Proteinkinaseinhibitoren zur Krebsbehandlung . . . . .</b>	<b>626</b>
12.12.3	Apoptose ist programmierter Zelltod . .	629

## Teil II Bioenergetik und Stoffwechsel

<b>13</b>	<b>Bioenergetik und chemische Reaktionstypen . . . . .</b>	<b>645</b>
<b>13.1</b>	<b>Bioenergetik und Thermodynamik . .</b>	<b>646</b>
13.1.1	Biologische Energieumwandlungen gehorchen den Gesetzen der Thermodynamik . . . . .	646
13.1.2	Zellen benötigen Quellen von Freier Enthalpie . . . . .	648
13.1.3	Die Änderung der Freien Standardenthalpie steht in direkter Beziehung zur Gleichgewichtskonstante . . . . .	648
13.1.4	Die tatsächliche Änderung der Freien Enthalpie hängt von den Konzentrationen der Reaktanden und Produkte ab . . . . .	650
13.1.5	Änderungen der Freien Standardenthalpie sind additiv . . . . .	653

<b>13.2 Die Logik der Chemie und allgemeine biochemische Reaktionen</b> . . . . .	655	13.4.10 Flavinnucleotide sind fest an Flavoproteine gebunden . . . . .	688
13.2.1 Biochemische und chemische Reaktionen sind nicht identisch . . . . .	661	<b>14 Glycolyse, Gluconeogenese und der Pentosephosphatweg</b> . . . . .	697
<b>13.3 Phosphorylgruppenübertragungen und ATP</b> . . . . .	662	<b>14.1 Glycolyse</b> . . . . .	698
13.3.1 Die Änderung der Freien Enthalpie bei der Hydrolyse von ATP ist groß und negativ . . . . .	662	14.1.1 Ein Überblick: Die Glycolyse verläuft in 2 Phasen . . . . .	699
13.3.2 Die Freie Enthalpie der Hydrolyse von anderen phosphorylierten Verbindungen und Thioestern ist ebenfalls groß . . . . .	665	14.1.2 Die Vorbereitungsphase der Glycolyse erfordert ATP . . . . .	703
13.3.3 ATP liefert Energie durch Gruppenübertragungen, nicht durch einfache Hydrolyse . . . . .	667	14.1.3 In der zweiten Phase der Glycolyse – der Ertragsphase – werden ATP und NADH gebildet . . . . .	708
13.3.4 ATP ist ein Donator von Phosphoryl-, Pyrophosphoryl- und Adenylylgruppen . . . . .	669	14.1.4 Die Gesamtbilanz weist einen Nettogewinn an ATP auf . . . . .	713
<b>EXKURS 13-1 Leuchtkäferlicht macht ATP sichtbar</b> . . . . .	671	14.1.5 Die Glycolyse ist streng reguliert . . . . .	714
13.3.5 Der Aufbau von informationsreichen Makromolekülen erfordert Energie . . . . .	672	14.1.6 Bei Diabetes mellitus Typ 1 ist die Glucoseaufnahme defekt . . . . .	715
13.3.6 ATP liefert die Energie für den aktiven Transport und die Muskelkontraktion . . . . .	672	<b>EXKURS 14-1 Medizin Die hohe Geschwindigkeit der Glycolyse in Tumoren bietet Angriffspunkte für die Chemotherapie und erleichtert die Diagnose</b> . . . . .	716
13.3.7 Phosphorylgruppenübertragungen zwischen Nucleotiden kommen in allen Zelltypen vor . . . . .	673	<b>14.2 Stoffwechselwege, die die Glycolyse mit Zwischenprodukten speisen</b> . . . . .	719
13.3.8 Anorganisches Polyphosphat ist ein potenzieller Phosphorylgruppendonator . . . . .	674	14.2.1 Poly- und Disacccharide aus der Nahrung werden hydrolytisch zu Monosaccchariden abgebaut . . . . .	719
<b>13.4 Biologische Redoxreaktionen</b> . . . . .	676	14.2.2 Endogenes Glycogen und Stärke werden durch Phosphorolyse abgebaut . . . . .	719
13.4.1 Der Elektronenfluss kann biologische Arbeit verrichten . . . . .	676	14.2.3 Andere Monosaccharide treten an verschiedenen Stellen in die Glycolyse ein . . . . .	722
13.4.2 Redoxreaktionen können als Halbreaktionen formuliert werden . . . . .	677	<b>14.3 Gärung: die Wege des Pyruvats unter anaeroben Bedingungen</b> . . . . .	724
13.4.3 Bei biologischen Oxidationen kommt es häufig zu Dehydrierung . . . . .	678	14.3.1 Pyruvat ist der terminale Elektronenakzeptor bei der Milchsäuregärung . . . . .	724
13.4.4 Reduktionspotenziale sind ein Maß für die Elektronenaffinität . . . . .	680	14.3.2 Ethanol ist das reduzierte Produkt der alkoholischen Gärung . . . . .	725
13.4.5 Standardreduktionspotenziale lassen sich für die Berechnung der Änderung der Freien Enthalpie nutzen . . . . .	682	<b>EXKURS 14-2 Glycolyse bei begrenzter Sauerstoffzufuhr: Athleten, Alligatoren und Quastenflosser</b> . . . . .	726
13.4.6 Für die zelluläre Oxidation von Glucose zu Kohlendioxid sind spezialisierte Elektronencarrier nötig . . . . .	683	14.3.3 Thiaminpyrophosphat trägt „aktivierte Acetaldehydgruppen“ . . . . .	727
13.4.7 Einige Arten von Coenzymen und Proteinen sind universelle Elektronencarrier . . . . .	684	<b>EXKURS 14-3 Ethanolische Gärung: Bierbrauerei und die Herstellung von biologischen Brennstoffen</b> . . . . .	728
13.4.8 NADH und NADPH wirken zusammen mit Dehydrogenasen als lösliche Elektronencarrier . . . . .	685	14.3.4 Mikrobielle Gärungen liefern einige alltägliche Nahrungsmittel und Industriechemikalien . . . . .	730
13.4.9 Mangel an Niacin, der Vitaminform von NAD und NADP, in der Nahrung verursacht Pellagra . . . . .	687		

<b>14.4 Gluconeogenese</b> . . . . .	731	15.2.1 Der Beitrag jedes Enzyms zum Fluss durch einen Stoffwechselweg ist experimentell messbar . . . . .	767
14.4.1 Für die Umsetzung von Pyruvat in Phosphoenolpyruvat sind 2 exergone Reaktionen erforderlich . . . . .	734	<b>EXKURS 15-1 Metabolische Kontrollanalyse: Quantitative Aspekte</b> . . . . .	768
14.4.2 Die Umsetzung von Fructose-1,6-bisphosphat zu Fructose-6-phosphat ist die zweite Umgehungsreaktion . . . . .	737	15.2.2 Der Kontrollkoeffizient quantifiziert die Auswirkung einer Veränderung der Enzymaktivität auf den metabolischen Fluss durch einen Stoffwechselweg . . . . .	770
14.4.3 Die Umsetzung von Glucose-6-phosphat zu Glucose ist die dritte Umgehungsreaktion . . . . .	738	15.2.3 Der Elastizitätskoeffizient hängt mit der Empfindlichkeit eines Enzyms für Veränderungen der Metabolit- oder Regulatorkonzentration zusammen . . . . .	770
14.4.4 Die Gluconeogenese erfordert viel Energie, ist jedoch essenziell . . . . .	738	15.2.4 Der Reaktionskoeffizient ist ein Maß für den Einfluss eines äußeren Kontrollfaktors auf den Fluss durch einen Stoffwechselweg . . . . .	770
14.4.5 Die Zwischenprodukte des Citratzyklus und viele Aminosäuren sind glucogen . . . . .	739	15.2.5 Die metabolische Kontrollanalyse wurde auf den Kohlenhydratstoffwechsel angewendet – mit überraschenden Ergebnissen . . . . .	771
14.4.6 Säugetiere können Fettsäuren nicht zu Glucose umsetzen . . . . .	740	15.2.6 Die metabolische Kontrollanalyse ist ein allgemeines Verfahren, um den Fluss durch einen Weg zu erhöhen . . . . .	772
14.4.7 Glycolyse und Gluconeogenese werden reziprok reguliert . . . . .	740	<b>15.3 Koordinierte Regulation von Glycolyse und Gluconeogenese</b> . . . . .	773
<b>14.5 Der Pentosephosphatweg zur Oxidation von Glucose</b> . . . . .	741	15.3.1 Isoenzyme der Hexokinase in Muskel und Leber werden von ihrem Substrat Glucose-6-phosphat unterschiedlich beeinflusst . . . . .	775
14.5.1 Die oxidative Phase liefert Pentosephosphate und NADPH . . . . .	742	<b>EXKURS 15-2 Isoenzyme: Verschiedene Proteine katalysieren die gleiche Reaktion</b> . . . . .	776
14.5.2 Die nichtoxidative Phase verwandelt Pentosephosphate wieder zurück in Glucose-6-phosphat . . . . .	742	15.3.2 Hexokinase IV (Glucokinase) und Glucose-6-phosphatase werden auf der Ebene der Transkription reguliert . . . . .	777
<b>EXKURS 14-4 Medizin Warum Pythagoras keinen Falafel essen wollte: Mangel an Glucose-6-phosphat-Dehydrogenase</b> . . . . .	743	15.3.3 Phosphofruktokinase-1 und Fructose-1,6-bisphosphatase werden reziprok reguliert . . . . .	777
14.5.3 Das Wernicke-Korsakoff-Syndrom wird durch einen Defekt in der Transketolase verschlimmert . . . . .	746	15.3.4 Fructose-2,6-bisphosphat ist ein leistungsfähiger allosterischer Regulator von PFK-1 und FBPase-1 . . . . .	779
14.5.4 Glucose-6-phosphat wird zwischen Glycolyse und Pentosephosphatweg aufgeteilt . . . . .	746	15.3.5 Xylulose-5-phosphat ist ein wichtiger Regulator des Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsels . . . . .	781
<b>15 Grundlagen der Stoffwechselregulation</b> . . . . .	755	15.3.6 Das glycolytische Enzym Pyruvat-Kinase wird allosterisch durch ATP inhibiert . . . . .	782
<b>15.1 Regulation von Stoffwechselwegen</b> . . . . .	757	15.3.7 Die Umwandlung von Pyruvat zu Phosphoenolpyruvat in der Gluconeogenese wird auf verschiedene Arten reguliert . . . . .	783
15.1.1 Zellen und Organismen halten ein dynamisches Fließgleichgewicht aufrecht . . . . .	757		
15.1.2 Sowohl die Menge als auch die katalytische Aktivität eines Enzyms kann reguliert werden . . . . .	758		
15.1.3 Reaktionen, die in einer Zelle weit vom Gleichgewicht entfernt ablaufen, sind allgemeine Stellen für die Regulation . . . . .	762		
15.1.4 Adeninnucleotide spielen eine wichtige Rolle bei der Regulation des Stoffwechsels . . . . .	764		
<b>15.2 Metabolische Kontrollanalyse</b> . . . . .	766		

15.3.8	Die Regulation von Glycolyse und Gluconeogenese auf transkriptioneller Ebene verändert die Anzahl einer Reihe von Enzymmolekülen . . . .	783
	<b>EXKURS 15-3 Medizin Genetische Mutationen, die zu seltenen Diabetes-Erkrankungen führen . . . .</b>	<b>787</b>
<b>15.4</b>	<b>Glycogenstoffwechsel bei Tieren . . .</b>	<b>788</b>
15.4.1	Der Abbau von Glycogen wird durch Glycogen-Phosphorylase katalysiert . .	789
15.4.2	Glucose-1-phosphat kann in die Glycolyse eintreten oder, in der Leber, die Blutglucose wieder auffüllen . . . .	791
	<b>EXKURS 15-4 Carl und Gerty Cori: Pioniere bei der Erforschung des Glycogenmetabolismus und der Störungen dieses Stoffwechsels .</b>	<b>792</b>
15.4.3	Das Zuckernucleotid UDP-Glucose liefert Glucose für die Glycogensynthese .	793
15.4.4	Glycogenin dient als Primer für den Aufbau neuer Glycogenketten . . .	797
<b>15.5</b>	<b>Koordinierte Regulation von Glycogensynthese und -abbau . . . .</b>	<b>798</b>
15.5.1	Glycogen-Phosphorylase wird allosterisch und durch Hormone reguliert . . .	799
15.5.2	Glycogen-Synthase wird ebenfalls durch Phosphorylierung und Dephosphorylierung reguliert . . . . .	801
15.5.3	Glycogen-Synthase-Kinase 3 vermittelt einige der Wirkungen von Insulin . . . .	802
15.5.4	Phosphoprotein-Phosphatase 1 ist für den Glycogenstoffwechsel von zentraler Bedeutung . . . . .	803
15.5.5	Allosterische und hormonelle Signale koordinieren den gesamten Kohlenhydratstoffwechsel . . . . .	804
15.5.6	Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel werden durch hormonelle und allosterische Mechanismen integriert .	806
<b>16</b>	<b>Der Citratzyklus . . . . .</b>	<b>813</b>
<b>16.1</b>	<b>Bildung von Acetyl-CoA (aktiviertem Acetat) . . . . .</b>	<b>814</b>
16.1.1	Pyruvat wird zu Acetyl-CoA und CO <sub>2</sub> oxidiert . . . . .	814
16.1.2	Der Pyruvat-Dehydrogenase-Komplex benötigt 5 Coenzyme . . . . .	815
16.1.3	Der Pyruvat-Dehydrogenase-Komplex besteht aus 3 unterschiedlichen Enzymen . . . . .	816
16.1.4	Bei der Substratkanalisierung bleiben Zwischenprodukte an die Enzymoberfläche gebunden . . . .	817
<b>16.2</b>	<b>Reaktionen des Citratzyklus . . . . .</b>	<b>819</b>
16.2.1	Der Citratzyklus umfasst 8 Schritte . . .	821
	<b>EXKURS 16-1 Enzyme mit „Nebenjob“: Proteine mit mehr als einer Funktion . . . . .</b>	<b>824</b>
	<b>EXKURS 16-2 Zur verwirrenden Nomenklatur von Synthasen und Synthetasen; Ligasen und Lyasen; Kinasen, Phosphatasen und Phosphorylasen . . . . .</b>	<b>827</b>
	<b>EXKURS 16-3 Citrat: Ein symmetrisches Molekül, das asymmetrisch reagiert . . . . .</b>	<b>831</b>
16.2.2	Die Energie aus den Oxidationen im Zyklus wird effizient konserviert . . .	832
16.2.3	Warum ist die Oxidation von Acetat so kompliziert? . . . . .	833
16.2.4	Die Komponenten des Citratzyklus sind wichtige Zwischenprodukte der Biosynthese . . . . .	834
	<b>EXKURS 16-4 Citrat-Synthase, Limonaden und die Ernährung der Weltbevölkerung . . . . .</b>	<b>835</b>
16.2.5	Anaplerotische Reaktionen füllen die Zwischenprodukte des Citratzyklus wieder auf . . . . .	835
16.2.6	Biotin in Pyruvat-Carboxylase ist ein CO <sub>2</sub> -Carrier . . . . .	836
<b>16.3</b>	<b>Regulation des Citratzyklus . . . . .</b>	<b>839</b>
16.3.1	Die Produktion von Acetyl-CoA durch den Pyruvat-Dehydrogenase-Komplex wird durch allosterische und kovalente Mechanismen reguliert . . .	839
16.3.2	Der Citratzyklus wird auf Ebene seiner 3 exergonen Schritte reguliert . . . . .	840
16.3.3	Substratkanalisierung durch Multienzymkomplexe kann im Citratzyklus vorkommen . . . .	841
16.3.4	Einige Mutationen in Enzymen des Citratzyklus führen zu Krebs . . . .	842
<b>16.4</b>	<b>Der Glyoxylatzyklus . . . . .</b>	<b>842</b>
16.4.1	Der Glyoxylatzyklus erzeugt aus Acetat C <sub>4</sub> -Verbindungen . . . . .	843
16.4.2	Der Citrat- und der Glyoxylatzyklus werden gemeinsam reguliert . . . . .	844
<b>17</b>	<b>Abbau von Fettsäuren . . . . .</b>	<b>855</b>
<b>17.1</b>	<b>Verdauung, Mobilisierung und Transport von Fetten . . . . .</b>	<b>856</b>
17.1.1	Nahrungsfette werden im Dünndarm absorbiert . . . . .	857

17.1.2	Hormone lösen die Mobilisierung gespeicherter Triacylglycerine aus . . .	859
17.1.3	Fettsäuren werden aktiviert und in die Mitochondrien transportiert . . .	860
<b>17.2</b>	<b>Oxidation von Fettsäuren</b> . . . . .	<b>863</b>
17.2.1	Die $\beta$ -Oxidation von gesättigten Fettsäuren verläuft in 4 Schritten . . . .	864
17.2.2	Zur Bildung von Acetyl-CoA und ATP werden die 4 Schritte der $\beta$ -Oxidation wiederholt . . . . .	866
17.2.3	Acetyl-CoA kann im Citratzyklus weiter oxidiert werden . . . . .	866
	<b>EXKURS 17-1 <math>\beta</math>-Oxidation bei Bären im Winterschlaf</b> . . . . .	<b>867</b>
17.2.4	Die Oxidation ungesättigter Fettsäuren erfordert 2 zusätzliche Reaktionen . . . . .	868
17.2.5	Die vollständige Oxidation von Fettsäuren mit ungerader Kohlenstoffzahl erfordert 3 zusätzliche Reaktionen . . .	870
17.2.6	Die Fettsäureoxidation ist streng reguliert . . . . .	871
	<b>EXKURS 17-2 Coenzym B<sub>12</sub>: eine radikale Lösung für ein kompliziertes Problem</b> . . . . .	<b>872</b>
17.2.7	Transkriptionsfaktoren aktivieren die Synthese von Proteinen des Lipidkatabolismus . . . . .	874
17.2.8	Genetische Defekte in Fettsäureacyl-CoA-Dehydrogenasen verursachen schwere Erkrankungen . .	875
17.2.9	Peroxisomen führen ebenfalls $\beta$ -Oxidation durch . . . . .	876
17.2.10	Peroxisomen und Glyoxysomen in Pflanzen verwenden Acetyl-CoA aus der $\beta$ -Oxidation als Biosynthesestufe . . . . .	878
17.2.11	Die Enzyme für die $\beta$ -Oxidation in unterschiedlichen Organellen haben sich im Lauf der Evolution auseinander entwickelt . . . . .	878
17.2.12	Die $\omega$ -Oxidation läuft im endoplasmatischen Reticulum ab . .	879
17.2.13	Phytansäure durchläuft eine $\alpha$ -Oxidation in den Peroxisomen .	881
<b>17.3</b>	<b>Ketonkörper</b> . . . . .	<b>881</b>
17.3.1	In der Leber gebildete Ketonkörper werden als Brennstoff in andere Organe exportiert . . . . .	882
17.3.2	Überproduktion von Ketonkörpern bei Diabetes und längerem Fasten . . .	883
<b>18</b>	<b>Aminosäureoxidation und die Produktion von Harnstoff</b> . . .	<b>891</b>

<b>18.1</b>	<b>Stoffwechselwege von Aminogruppen</b> . . . . .	<b>892</b>
18.1.1	Nahrungsproteine werden enzymatisch zu Aminosäuren abgebaut . . . . .	894
18.1.2	Pyridoxalphosphat wirkt bei der Übertragung von $\alpha$ -Aminogruppen auf $\alpha$ -Ketoglutarat mit . . . . .	896
	<b>EXKURS 18-1 Medizin Untersuchungen auf Gewebeschäden</b> . . . . .	<b>899</b>
18.1.3	Glutamat setzt seine Aminogruppe in der Leber als Ammoniak frei . . . . .	899
18.1.4	Glutamin transportiert Ammoniak im Blutkreislauf . . . . .	900
18.1.5	Alanin transportiert Ammoniak von den Skelettmuskeln zur Leber . . .	901
18.1.6	Ammoniak ist für Tiere toxisch . . . . .	902
<b>18.2</b>	<b>Stickstoffausscheidung und der Harnstoffzyklus</b> . . . . .	<b>903</b>
18.2.1	Harnstoff entsteht in 5 enzymatischen Schritten aus Ammoniak . . . . .	903
18.2.2	Citrat- und Harnstoffzyklus sind miteinander verbunden . . . . .	906
18.2.3	Die Aktivität des Harnstoffzyklus wird auf 2 Ebenen reguliert . . . . .	907
18.2.4	Verknüpfungen von Reaktionswegen reduzieren den Energieaufwand für die Harnstoffsynthese . . . . .	908
18.2.5	Genetische Defekte im Harnstoffzyklus können lebensbedrohlich sein . . . . .	908
<b>18.3</b>	<b>Wege des Aminosäureabbaus</b> . . . . .	<b>910</b>
18.3.1	Einige Aminosäuren werden zu Glucose, andere zu Ketonkörpern umgesetzt . . . . .	911
18.3.2	Beim Aminosäurekatabolismus sind mehrere Enzymcofaktoren wichtig . . .	912
18.3.3	Sechs Aminosäuren werden zu Pyruvat abgebaut . . . . .	916
18.3.4	Sieben Aminosäuren werden zu Acetyl-CoA abgebaut . . . . .	919
18.3.5	Bei manchen Menschen weist der Phenylalaninkatabolismus genetische Defekte auf . . . . .	920
18.3.6	Fünf Aminosäuren werden zu $\alpha$ -Ketoglutarat umgesetzt . . . . .	924
18.3.7	Vier Aminosäuren werden zu Succinyl-CoA umgesetzt . . . . .	925
18.3.8	Verzweigte Aminosäuren werden nicht in der Leber abgebaut . . . . .	925
	<b>EXKURS 18-2 Medizin Wissenschaftliche Detektive klären einen rätselhaften Mordfall</b> . . . . .	<b>927</b>

18.3.9	Asparagin und Aspartat werden zu Oxalacetat abgebaut . . . . .	928	19.3.1	Die oxidative Phosphorylierung wird durch den Energiebedarf der Zelle reguliert . . . . .	969
<b>19</b>	<b>Oxidative Phosphorylierung und Photophosphorylierung . . . . .</b>	<b>935</b>	19.3.2	Ein Inhibitorprotein verhindert die ATP-Hydrolyse bei Hypoxie . . . . .	969
	<b>OXIDATIVE PHOSPHORYLIERUNG . . . . .</b>	<b>936</b>	19.3.3	Sauerstoffmangel führt zur Bildung von ROS und einigen adaptiven Reaktionen . . . . .	970
<b>19.1</b>	<b>Elektronenübertragungen in Mitochondrien . . . . .</b>	<b>936</b>	19.3.4	ATP-erzeugende Reaktionswege werden koordiniert reguliert . . . . .	971
19.1.1	Elektronen werden zu universellen Elektronenakzeptoren gelenkt . . . . .	937	<b>19.4</b>	<b>Mitochondrien bei Wärmeerzeugung, Steroidsynthese und Apoptose . . . . .</b>	<b>972</b>
19.1.2	Elektronen passieren eine Reihe von membrangebundenen Carriern . . . . .	938	19.4.1	Entkoppelte Mitochondrien in braunem Fettgewebe erzeugen Wärme . . . . .	972
19.1.3	Elektronencarrier wirken in Multienzymkomplexen . . . . .	941	19.4.2	P450-Oxygenasen der Mitochondrien katalysieren Hydroxylierungen von Steroiden . . . . .	973
19.1.4	Mitochondriale Komplexe können sich zu Respirasomen zusammenlagern . . . . .	949	19.4.3	Mitochondrien sind für die Auslösung des programmierten Zelltods entscheidend . . . . .	975
19.1.5	Die Energie der Elektronenübertragung wird in einem Protonengradienten effizient gespeichert . . . . .	949	<b>19.5</b>	<b>Mitochondriale Gene: ihr Ursprung und die Auswirkungen von Mutationen . . . . .</b>	<b>975</b>
19.1.6	Während der oxidativen Phosphorylierung entstehen reaktive Sauerstoffspezies . . . . .	951	19.5.1	Mitochondrien entwickelten sich aus endosymbiotischen Bakterien . . . . .	977
19.1.7	Bei pflanzlichen Mitochondrien folgt die Oxidation von NADH anderen Mechanismen . . . . .	952	19.5.2	Mutationen in der Mitochondrien-DNA häufen sich im Laufe des Lebens eines Organismus an . . . . .	977
	<b>EXKURS 19-1 Heiße, stinkende Pflanzen und alternative Wege der Atmungskette . . . . .</b>	<b>953</b>	19.5.3	Einige Mutationen im mitochondrialen Genom verursachen Krankheiten . . . . .	979
<b>19.2</b>	<b>ATP-Synthese . . . . .</b>	<b>954</b>	19.5.4	Diabetes kann auf Mitochondrienschäden in $\beta$ -Zellen der Bauchspeicheldrüse beruhen . . . . .	980
19.2.1	Die ATP-Synthase hat 2 funktionelle Bereiche: $F_0$ und $F_1$ . . . . .	957	<b>PHOTOSYNTHESE: EINFANGEN VON LICHTENERGIE . . . . .</b>	<b>981</b>	
19.2.2	ATP wird gegenüber ADP an der Oberfläche von $F_1$ stabilisiert . . . . .	958	<b>19.6</b>	<b>Allgemeine Merkmale der Photophosphorylierung . . . . .</b>	<b>982</b>
19.2.3	Der Protonengradient treibt die Freisetzung von ATP von der Enzymoberfläche an . . . . .	959	19.6.1	Die Photosynthese der Pflanzen erfolgt in Chloroplasten . . . . .	982
19.2.4	Jede $\beta$ -Untereinheit der ATP-Synthase kann 3 verschiedene Konformationen annehmen . . . . .	959	19.6.2	Licht treibt den Elektronenfluss in Chloroplasten an . . . . .	983
19.2.5	Die Rotationskatalyse ist für den Mechanismus des Bindungswechsels bei der ATP-Synthese entscheidend . . . . .	962	<b>19.7</b>	<b>Lichtabsorption . . . . .</b>	<b>984</b>
19.2.6	Die chemiosmotische Kopplung erlaubt nichtganzzahlige Stöchiometrien des $O_2$ -Verbrauchs und der ATP-Synthese . . . . .	964	19.7.1	Chlorophylle absorbieren Lichtenergie für die Photosynthese . . . . .	985
19.2.7	Die protonenmotorische Kraft liefert Energie für den aktiven Transport . . . . .	965	19.7.2	Akzessorische Pigmente erweitern den Spektralbereich der Lichtabsorption . . . . .	987
19.2.8	Shuttle-Systeme befördern indirekt cytosolisches NADH zur Oxidation in die Mitochondrien . . . . .	966	19.7.3	Chlorophyll leitet die absorbierte Energie durch Excitonentransfer zum Reaktionszentrum . . . . .	990
<b>19.3</b>	<b>Regulation der oxidativen Phosphorylierung . . . . .</b>	<b>968</b>	<b>19.8</b>	<b>Das zentrale photochemische Ereignis: der lichtgetriebene Elektronenfluss . . . . .</b>	<b>991</b>

19.8.1	Bakterien besitzen einen von 2 Typen einzelner photochemischer Reaktionszentren . . . . .	991	<b>20.2 Photorespiration, der C<sub>4</sub>- und der CAM-Stoffwechselweg . . . . .</b>	<b>1039</b>
19.8.2	Kinetische und thermodynamische Faktoren verhindern einen Energieverlust durch innere Konversion . . . . .	994	20.2.1 Photorespiration resultiert aus der Oxygenaseaktivität von Rubisco . . .	1039
19.8.3	In Pflanzen wirken 2 Reaktionszentren hintereinander . . . . .	995	20.2.2 Die Rückgewinnung des Phosphoglycolats ist kostspielig . . . . .	1040
19.8.4	Antennenchlorophylle sind eng mit Elektronencarriern verbunden . . . . .	998	20.2.3 Bei C <sub>4</sub> -Pflanzen sind CO <sub>2</sub> -Fixierung und Aktivität der Rubisco räumlich voneinander getrennt . . . . .	1043
19.8.5	Der Cytochrom- <i>b<sub>6</sub>f</i> -Komplex verknüpft die Photosysteme I und II miteinander .	998	20.2.4 Bei CAM-Pflanzen sind CO <sub>2</sub> -Aufnahme und Aktivität der Rubisco zeitlich voneinander getrennt . . . . .	1045
19.8.6	Der zyklische Elektronentransport zwischen PSI und dem Cytochrom- <i>b<sub>6</sub>f</i> -Komplex erhöht die ATP-Bildung im Verhältnis zu NADPH . . . . .	1000	<b>20.3 Biosynthese von Stärke und Saccharose . . . . .</b>	<b>1045</b>
19.8.7	Zustandsübergänge verändern die Verteilung des LHCII zwischen den beiden Photosystemen . . . . .	1001	20.3.1 ADP-Glucose ist das Substrat für die Stärkesynthese in pflanzlichen Plastiden und für die Glycogensynthese bei Bakterien . . . . .	1046
19.8.8	Wasser wird durch den sauerstoffbildenden Komplex gespalten . . . . .	1003	20.3.2 UDP-Glucose ist das Substrat für die Synthese von Saccharose im Cytosol von Blattzellen . . . . .	1047
<b>19.9 ATP-Synthese durch Photophosphorylierung . . . . .</b>		<b>1005</b>	20.3.3 Die Umsetzung von Triosephosphaten zu Saccharose und Stärke wird fein reguliert . . . . .	1048
19.9.1	Ein Protonengradient verknüpft den Elektronenfluss und die Phosphorylierung . . . . .	1005	<b>20.4 Synthese von Zellwandpolysacchariden: Cellulose und Peptidoglycan . . . . .</b>	<b>1050</b>
19.9.2	Die ungefähre Stöchiometrie der Photophosphorylierung wurde ermittelt . .	1006	20.4.1 Cellulose wird von supramolekularen Strukturen in der Plasmamembran gebildet . . . . .	1051
19.9.3	Die ATP-Synthese in Chloroplasten ähnelt der in den Mitochondrien . . . . .	1007	20.4.2 Lipidgebundene Oligosaccharide sind Vorstufen beim Aufbau der Bakterienzellwand . . . . .	1053
<b>19.10 Die Evolution der oxygenen Photosynthese . . . . .</b>		<b>1008</b>	<b>20.5 Integration des Kohlenhydratstoffwechsels in der Pflanzenzelle . . . . .</b>	<b>1055</b>
19.10.1	Chloroplasten entwickelten sich aus ehemaligen photosynthetisierenden Bakterien . . . . .	1009	20.5.1 Die Gluconeogenese setzt Fette und Proteine in keimenden Samen zu Glucose um . . . . .	1055
19.10.2	In <i>Halobacterium</i> nimmt ein einzelnes Protein Licht auf und pumpt Protonen, um die ATP-Synthese anzutreiben	1010	20.5.2 Pools von zentralen Zwischenprodukten verbinden die Reaktionswege in verschiedenen Organellen . . . . .	1058
<b>20 Biosynthese von Kohlenhydraten in Pflanzen und Bakterien . . . . .</b>		<b>1023</b>	<b>21 Biosynthese von Lipiden . . . . .</b>	<b>1065</b>
<b>20.1 Synthese von Kohlenhydraten bei der Photosynthese . . . . .</b>		<b>1024</b>	<b>21.1 Biosynthese von Fettsäuren und Eicosanoiden . . . . .</b>	<b>1065</b>
20.1.1	Plastiden sind Organellen, einzigartig in pflanzlichen Zellen und Algen . . . .	1025	21.1.1 Malonyl-CoA wird aus Acetyl-CoA und Hydrogencarbonat gebildet . . . .	1066
20.1.2	Die CO <sub>2</sub> -Fixierung läuft in 3 Phasen ab .	1026	21.1.2 Fettsäuren werden in einer repetitiven Reaktionsfolge synthetisiert . . . . .	1066
20.1.3	Pro Molekül Triosephosphat, das aus CO <sub>2</sub> synthetisiert wird, sind 6 NADPH- und 9 ATP-Moleküle erforderlich . . . .	1034	21.1.3 Die Fettsäure-Synthase von Säugetieren hat viele aktive Zentren . .	1068
20.1.4	Ein Transportsystem schleust Triosephosphate aus dem Chloroplasten heraus und Phosphat hinein . . . . .	1036	21.1.4 Die Fettsäure-Synthase nimmt die Acetyl- und Malonylgruppen auf . .	1069
20.1.5	Vier Enzyme des Calvin-Zyklus werden indirekt durch Licht aktiviert . . . . .	1037		

21.1.5	Die Reaktionen der Fettsäure-Synthase werden zur Bildung von Palmitat wiederholt . . . . .	1072	21.3.7	Polare Lipide werden zu spezifischen Zellmembranen gesteuert . . . . .	1097
21.1.6	Die Fettsäuresynthese erfolgt bei vielen Organismen im Cytosol, aber bei Pflanzen in den Chloroplasten	1073	<b>21.4 Biosynthese von Cholesterin, Steroiden und Isoprenoiden</b>	. . . . .	1098
21.1.7	Acetat wird als Citrat aus den Mitochondrien heraustransportiert	1074	21.4.1	Cholesterin wird in 4 Stufen aus Acetyl-CoA gebildet . . . . .	1099
21.1.8	Die Biosynthese von Fettsäuren wird streng reguliert . . . . .	1076	21.4.2	Cholesterin schlägt verschiedene Wege ein . . . . .	1102
21.1.9	Langkettige gesättigte Fettsäuren werden aus Palmitat synthetisiert . . . . .	1077	21.4.3	Cholesterin und andere Lipide werden in Form von Plasmalipoproteinen befördert . . . . .	1104
21.1.10	Eine mischfunktionelle Oxidase wird benötigt, um gesättigte Fettsäuren in ungesättigte umzuwandeln . . . . .	1077	<b>EXKURS 21-2 Medizin ApoE-Allele geben Hinweise für das Auftreten einer Alzheimer-Erkrankung</b>	. . . . .	1107
<b>EXKURS 21-1 Mischfunktionelle Oxidasen, Oxygenasen und Cytochrom P450</b>	. . . . .	1078	21.4.4	Cholesterinester gelangen durch rezeptorvermittelte Endocytose in die Zellen . . . . .	1109
21.1.11	Eicosanoide werden aus mehrfach ungesättigten C <sub>20</sub> -Fettsäuren synthetisiert . . . . .	1079	21.4.5	Die Cholesterinbiosynthese wird auf verschiedenen Ebenen reguliert . . . . .	1110
<b>21.2 Biosynthese von Triacylglycerinen</b>	. . . . .	1083	<b>EXKURS 21-3 Die Lipidhypothese und die Entwicklung von Statinen</b>	. . . . .	1112
21.2.1	Triacylglycerine und Glycerophospholipide werden aus den gleichen Vorstufen gebildet . . . . .	1083	21.4.6	Steroidhormone werden durch Spaltung von Seitenketten und Oxidation von Cholesterin gebildet . . . . .	1114
21.2.2	Die Biosynthese von Triacylglycerinen in Tieren wird durch Hormone reguliert . . . . .	1085	21.4.7	Zwischenprodukte der Biosynthese von Cholesterin können unterschiedliche Wege einschlagen . . . . .	1116
21.2.3	Durch Glyceroneogenese wird im Fettgewebe Glycerin-3-phosphat hergestellt . . . . .	1087	<b>22 Biosynthese von Aminosäuren, Nucleotiden und verwandten Molekülen</b>	. . . . .	1123
21.2.4	Thiazolidindione behandeln Typ-2-Diabetes durch Aktivierung der Glyceroneogenese . . . . .	1089	<b>22.1 Der Stickstoffmetabolismus im Überblick</b>	. . . . .	1124
<b>21.3 Biosynthese von Membranphospholipiden</b>	. . . . .	1089	22.1.1	Der Stickstoffkreislauf erhält ein Reservoir biologisch verfügbaren Stickstoffs aufrecht . . . . .	1124
21.3.1	Es gibt 2 Strategien zur Befestigung von Phospholipidkopfgruppen . . . . .	1090	22.1.2	Stickstoff wird durch Enzyme des Nitrogenasekomplexes fixiert . . . . .	1125
21.3.2	Die Phospholipidsynthese bei <i>E. coli</i> verwendet CDP-Diacylglycerin . . . . .	1092	<b>EXKURS 22-1 Die ungewöhnliche Lebensweise eigenartiger, aber sehr häufiger Organismen</b>	. . . . .	1126
21.3.3	Eukaryoten synthetisieren anionische Phospholipide aus CDP-Diacylglycerin . . . . .	1093	22.1.3	Ammoniak wird über Glutamat und Glutamin in Biomoleküle eingebaut . . . . .	1130
21.3.4	Eukaryotische Reaktionswege zu Phosphatidylserin, Phosphatidylethanolamin und Phosphatidylcholin hängen miteinander zusammen . . . . .	1093	22.1.4	Glutamin-Synthetase ist ein wichtiger Regulationspunkt im Stickstoffmetabolismus . . . . .	1132
21.3.5	Plasmalogensynthese erfordert die Bildung eines etherverknüpften Fettalkohols . . . . .	1094	22.1.5	Mehrere Klassen von Reaktionen spielen eine besondere Rolle bei der Biosynthese von Aminosäuren und Nucleotiden . . . . .	1134
21.3.6	Sphingolipid- und Glycerophospholipidsynthese haben Vorstufen und einige Mechanismen gemeinsam . . . . .	1095	<b>22.2 Biosynthese von Aminosäuren</b>	. . . . .	1135
			22.2.1	Aus $\alpha$ -Ketoglutarat entstehen Glutamat, Glutamin, Prolin und Arginin . . . . .	1137

22.2.2	Serin, Glycin und Cystein entstehen aus 3-Phosphoglycerat . . . . .	1137
22.2.3	Drei nichtessenzielle und sechs essenzielle Aminosäuren werden aus Oxalacetat und Pyruvat synthetisiert . . . . .	1141
22.2.4	Chorismat ist ein entscheidendes Zwischenprodukt bei der Synthese von Tryptophan, Phenylalanin und Tyrosin . . . . .	1144
22.2.5	Die Biosynthese von Histidin erfolgt mithilfe von Vorstufen aus der Purinbiosynthese . . . . .	1149
22.2.6	Die Biosynthese von Aminosäuren unterliegt einer allosterischen Regulation . . . . .	1149
<b>22.3</b>	<b>Von Aminosäuren abgeleitete Moleküle . . . . .</b>	<b>1152</b>
22.3.1	Glycin ist eine Vorstufe von Porphyrinen . . . . .	1153
22.3.2	Häm ist die Quelle für Gallenfarbstoffe . . . . .	1154
	<b>EXKURS 22-2 Medizin Über Könige und Vampire . . . . .</b>	<b>1155</b>
22.3.3	Aminosäuren sind Vorstufen von Creatin und Glutathion . . . . .	1157
22.3.4	D-Aminosäuren kommen hauptsächlich bei Bakterien vor . . . . .	1158
22.3.5	Aromatische Aminosäuren sind Vorstufen vieler pflanzlicher Substanzen . . . . .	1158
22.3.6	Biologische Amine sind Produkte der Aminosäuredecarboxylierung . . . . .	1159
	<b>EXKURS 22-3 Medizin Die Heilung der Afrikanischen Schlafkrankheit mithilfe eines biochemischen trojanischen Pferdes . . . . .</b>	<b>1161</b>
22.3.7	Arginin ist die Vorstufe für die biologische Synthese von Stickstoffmonoxid . . . . .	1162
<b>22.4</b>	<b>Biosynthese und Abbau von Nucleotiden . . . . .</b>	<b>1163</b>
22.4.1	Die <i>de novo</i> -Synthese von Purin beginnt mit PRPP . . . . .	1164
22.4.2	Die Purinnucleotidbiosynthese wird durch Feedback-Hemmung reguliert . . . . .	1167
22.4.3	Pyrimidinnucleotide entstehen aus Aspartat, PRPP und Carbamoylphosphat . . . . .	1168
22.4.4	Die Biosynthese von Pyrimidinnucleotiden wird durch Feedback-Hemmung reguliert . . . . .	1170
22.4.5	Nucleosidmonophosphate werden in Nucleosidtriphosphate umgewandelt . . . . .	1171
22.4.6	Ribonucleotide sind Vorstufen der Desoxyribonucleotide . . . . .	1171

22.4.7	Thymidylat entsteht aus dCDP und dUMP . . . . .	1174
22.4.8	Beim Abbau von Purinen und Pyrimidinen entsteht Harnsäure oder Harnstoff . . . . .	1176
22.4.9	Purin- und Pyrimidinbasen werden durch Wiederverwendungswege zurückgewonnen . . . . .	1178
22.4.10	Überschüssige Harnsäure verursacht Gicht . . . . .	1179
22.4.11	Viele Chemotherapeutika wirken auf Enzyme der Nucleotidbiosynthese . . . . .	1179

## **23 Hormonelle Regulation und Integration des Stoffwechsels von Säugetieren . . . . .**

### **23.1 Hormone: unterschiedliche Strukturen für unterschiedliche Funktionen . . . . .**

23.1.1	Zum Nachweis und zur Reinigung von Hormonen ist ein Bioassay nötig . . . . .	1188
--------	--	------

### **EXKURS 23-1 Medizin Wie wird ein Hormon entdeckt? Der beschwerliche Weg zu gereinigtem Insulin . . . . .**

23.1.2	Hormone wirken über spezifische zelluläre Rezeptoren mit hoher Affinität . . . . .	1191
23.1.3	Hormone sind chemisch vielfältig . . . . .	1193
23.1.4	Die Ausschüttung von Hormonen wird durch eine Hierarchie von neuronalen und hormonellen Signalen reguliert . . . . .	1199

### **23.2 Gewebespezifischer Stoffwechsel: Arbeitsteilung . . . . .**

23.2.1	Die Leber verarbeitet und verteilt Nährstoffe . . . . .	1203
23.2.2	Fettgewebe speichert und liefert Fettsäuren . . . . .	1208
23.2.3	Braunes Fettgewebe erzeugt Wärme . . . . .	1209
23.2.4	Muskeln verbrauchen ATP für mechanische Arbeit . . . . .	1210
23.2.5	Das Gehirn verbraucht Energie zur Übertragung elektrischer Impulse . . . . .	1213
23.2.6	Das Blut transportiert Sauerstoff, Stoffwechselprodukte und Hormone . . . . .	1214

### **23.3 Hormonelle Steuerung des Brennstoffhaushalts . . . . .**

23.3.1	Insulin wirkt einem hohen Blutglucosespiegel entgegen . . . . .	1217
23.3.2	Als Reaktion auf Veränderungen des Blutglucosespiegels geben die $\beta$ -Zellen des Pankreas Insulin ab . . . . .	1217
23.3.3	Glucagon wirkt einem niedrigen Blutglucosespiegel entgegen . . . . .	1220

23.3.4	Beim Fasten und Hungern verändert sich der Stoffwechsel, damit das Gehirn weiterhin mit Brennstoff versorgt wird . . . . .	1222
23.3.5	Adrenalin signalisiert bevorstehende Aktivität . . . . .	1224
23.3.6	Cortisol signalisiert Stress, einschließlich eines niedrigen Blutglucosespiegels . . . . .	1225
23.3.7	Diabetes mellitus entsteht durch Defekte der Produktion oder Wirkung von Insulin . . . . .	1225
<b>23.4</b>	<b>Fettleibigkeit und Regulation der Körpermasse . . . . .</b>	<b>1227</b>
23.4.1	Fettgewebe hat wichtige endokrine Funktionen . . . . .	1228
23.4.2	Leptin stimuliert die Produktion von anorexigenen Peptidhormonen . . . . .	1229
23.4.3	Leptin löst eine Signalkaskade aus, die die Genexpression reguliert . . . . .	1231
23.4.4	Das Leptinsystem könnte sich entwickelt haben, um die Reaktion auf Hunger zu regulieren . . . . .	1232
23.4.5	Insulin wirkt im Nucleus arcuatus regulierend auf die Nahrungsaufnahme und die Speicherung von Energie . . . . .	1233
23.4.6	Adiponectin wirkt über AMPK und erhöht die Sensitivität für Insulin . . . . .	1234
23.4.7	Die Ernährung reguliert die Expression von Genen mit zentraler Funktion für die Erhaltung der Körpermasse . . . . .	1235
23.4.8	Das kurzzeitige Essverhalten wird durch Ghrelin und PYY <sub>3-36</sub> beeinflusst . . . . .	1237
<b>23.5</b>	<b>Fettleibigkeit, metabolisches Syndrom und Typ-2-Diabetes . . . . .</b>	<b>1238</b>
23.5.1	Bei Typ-2-Diabetes wird das Gewebe insensitive für Insulin . . . . .	1239
23.5.2	Durch entsprechende Ernährung, Bewegung und Medikation lässt sich Typ-2-Diabetes kontrollieren . . . . .	1240

## Teil III Wege der Informationsübertragung

<b>24</b>	<b>Gene und Chromosomen . . . . .</b>	<b>1251</b>
<b>24.1</b>	<b>Grundbestandteile der Chromosomen . . . . .</b>	<b>1251</b>
24.1.1	Gene sind DNA-Abschnitte, die Polypeptidketten und RNA codieren . . . . .	1251
24.1.2	DNA-Moleküle sind sehr viel länger als die zellulären oder viralen Verpackungen, in denen sie enthalten sind . . . . .	1253

24.1.3	Gene und Chromosomen von Eukaryoten sind sehr komplex . . . . .	1257
<b>24.2</b>	<b>Superspiralisierung der DNA . . . . .</b>	<b>1260</b>
24.2.1	Die zelluläre DNA ist zum großen Teil unterspiralisiert . . . . .	1261
24.2.2	Die DNA-Unterwindung ist durch die topologische Verwindungszahl definiert . . . . .	1263
24.2.3	Topoisomerasen katalysieren Veränderungen der Verwindungszahl in der DNA . . . . .	1266
<b>EXKURS 24-1</b>	<b>Medizin Behandlung von Krankheiten durch Hemmung der Topoisomerasen . . . . .</b>	<b>1268</b>
24.2.4	Die Verdichtung der DNA erfordert eine spezielle Form der Superspiralisierung . . . . .	1269
<b>24.3</b>	<b>Die Chromosomenstruktur . . . . .</b>	<b>1271</b>
24.3.1	Chromatin besteht aus DNA und Proteinen . . . . .	1271
24.3.2	Histone sind kleine basische Proteine . . . . .	1272
24.3.3	Nucleosomen sind die grundlegenden Organisationseinheiten des Chromatins . . . . .	1273
24.3.4	Die Nucleosomen sind zu Strukturen immer höherer Ordnung gepackt . . . . .	1275
<b>EXKURS 24-2</b>	<b>Medizin Epigenetik, Nucleosomenstruktur und Histonvarianten . . . . .</b>	<b>1276</b>
24.3.5	Die kondensierten Chromosomenstrukturen werden durch SMC-Proteine aufrechterhalten . . . . .	1279
24.3.6	Auch Bakterien-DNA ist hoch organisiert . . . . .	1280
<b>25</b>	<b>DNA-Stoffwechsel . . . . .</b>	<b>1287</b>
<b>25.1</b>	<b>DNA-Replikation . . . . .</b>	<b>1289</b>
25.1.1	DNA-Replikation erfolgt nach einer Reihe grundsätzlicher Regeln . . . . .	1290
25.1.2	DNA wird von Nucleasen abgebaut . . . . .	1292
25.1.3	DNA wird von DNA-Polymerasen synthetisiert . . . . .	1293
25.1.4	Die Replikation ist sehr genau . . . . .	1294
25.1.5	<i>E. coli</i> besitzt mindestens 5 DNA-Polymerasen . . . . .	1295
25.1.6	Die DNA-Replikation erfordert viele Enzyme und Proteinfaktoren . . . . .	1299
25.1.7	Die Replikation des <i>E. coli</i> -Chromosoms verläuft in Phasen . . . . .	1299
25.1.8	Bei Eukaryotenzellen ist die Replikation ähnlich aber doch komplexer . . . . .	1307

25.1.9	Virale DNA-Polymerasen sind Zielmoleküle für antivirale Therapien . . . . .	1309	26.1.7	Die DNA-abhängige RNA-Polymerase lässt sich selektiv hemmen . . . . .	1365
<b>25.2</b>	<b>DNA-Reparatur . . . . .</b>	<b>1310</b>	<b>26.2</b>	<b>RNA-Prozessierung . . . . .</b>	<b>1366</b>
25.2.1	Zwischen Mutationen und Krebs besteht ein Zusammenhang . . . . .	1310	26.2.1	Eukaryotische mRNAs werden an ihrem 5'-Ende mit einem Cap versehen . . . . .	1367
25.2.2	Alle Zellen besitzen mehrere DNA-Reparatursysteme . . . . .	1311	26.2.2	Sowohl Introns als auch Exons werden von DNA in RNA transkribiert . . . . .	1368
	<b>EXKURS 25-1 Medizin</b>		26.2.3	RNA katalysiert das Spleißen von Introns aus der RNA . . . . .	1369
	<b>DNA-Reparatur und Krebs . . . . .</b>	<b>1315</b>	26.2.4	Eukaryotische mRNAs besitzen charakteristische Strukturen an den 3'-Enden . . . . .	1374
25.2.3	Die Wechselwirkungen zwischen Replikationsgabeln und Schadstellen in der DNA können zu einer fehleranfälligen Transläsions-DNA-Synthese führen . . . . .	1321	26.2.5	Durch differenzielles Prozessieren der RNA entstehen an einem Gen mehrere Produkte . . . . .	1375
<b>25.3</b>	<b>DNA-Rekombination . . . . .</b>	<b>1324</b>	26.2.6	Auch rRNAs und tRNAs werden prozessiert . . . . .	1376
25.3.1	Homologe genetische Rekombination hat mehrere Funktionen . . . . .	1325	26.2.7	RNAs mit spezifischer Funktion durchlaufen verschiedenen Formen der Prozessierung . . . . .	1382
25.3.2	Die Rekombination während der Meiose wird durch Doppelstrangbrüche eingeleitet . . . . .	1326	26.2.8	Manche Vorgänge im RNA-Stoffwechsel werden von RNA-Enzymen katalysiert . . . . .	1383
25.3.3	Für die Rekombination sind besondere Enzyme und andere Proteine erforderlich . . . . .	1328	26.2.9	Zelluläre mRNAs werden mit unterschiedlicher Geschwindigkeit abgebaut . . . . .	1386
25.3.4	Bei der Reparatur stillstehender Replikationsgabeln wirken alle Teile des DNA-Stoffwechsels zusammen . . . . .	1331	26.2.10	Die Polynucleotid-Phosphorylase stellt RNA-ähnliche Polymere mit zufälliger Sequenz her . . . . .	1387
25.3.5	Ortsspezifische Rekombination führt zu präziser Umordnung der DNA . . . . .	1334	<b>26.3</b>	<b>RNA-abhängige Synthese von RNA und DNA . . . . .</b>	<b>1388</b>
25.3.6	Die Replikation ganzer Chromosomen erfordert manchmal ortsspezifische Rekombination . . . . .	1336	26.3.1	Die Reverse Transkriptase stellt DNA ausgehend von viraler RNA her . . . . .	1388
25.3.7	Transponierbare genetische Elemente wandern von einer Stelle zur anderen . . . . .	1336	26.3.2	Retroviren verursachen Krebs und AIDS . . . . .	1391
25.3.8	Immunglobulingene werden durch Rekombination zusammengesetzt . . . . .	1339		<b>EXKURS 26-2 Medizin</b>	
<b>26</b>	<b>RNA-Stoffwechsel . . . . .</b>	<b>1349</b>		<b>AIDS-Bekämpfung mit Hemmstoffen für die Reverse Transkriptase . . . . .</b>	<b>1392</b>
<b>26.1</b>	<b>DNA-abhängige RNA-Synthese . . . . .</b>	<b>1350</b>	26.3.3	Viele Transposons, Retroviren und Introns dürften in der Evolution einen gemeinsamen Ursprung haben . . . . .	1392
26.1.1	RNA wird von der RNA-Polymerase synthetisiert . . . . .	1351	26.3.4	Die Telomerase ist eine spezialisierte Reverse Transkriptase . . . . .	1394
26.1.2	Die RNA-Synthese beginnt an Promotoren . . . . .	1354	26.3.5	Manche Virus-RNAs werden durch RNA-abhängige RNA-Polymerasen repliziert . . . . .	1396
	<b>EXKURS 26-1 Die RNA-Polymerase hinterlässt am Promotor einen Fußabdruck . . . . .</b>	<b>1357</b>	26.3.6	Die RNA-Synthese liefert wichtige Anhaltspunkte für die biochemische Evolution . . . . .	1397
26.1.3	Die Transkription wird auf verschiedenen Ebenen reguliert . . . . .	1360		<b>EXKURS 26-3 Das SELEX-Verfahren zur Herstellung von RNA-Polymeren mit neuen Funktionen . . . . .</b>	<b>1399</b>
26.1.4	Für die Termination der RNA-Synthese sorgen besondere Signalsequenzen . . . . .	1360			
26.1.5	Im Kern der Eukaryotenzellen gibt es dreierlei RNA-Polymerasen . . . . .	1361			
26.1.6	Die RNA-Polymerase II braucht für ihre Aktivität viele andere Proteine . . . . .	1362			

■	<b>EXKURS 26-4 Ein sich ausdehnendes RNA-Universum, angefüllt mit TUF-RNAs</b> . . . . .	1401
<b>27</b>	<b>Proteinstoffwechsel</b> . . . . .	1409
<b>27.1</b>	<b>Der genetische Code</b> . . . . .	1410
27.1.1	Der genetische Code wurde mithilfe synthetischer mRNA-Matrizen entschlüsselt . . . . .	1411
27.1.2	Durch „Wobble“ können manche tRNAs mehrere Codons erkennen . . . . .	1415
■	<b>EXKURS 27-1 Ausnahmen, die die Regel bestätigen: Natürliche Varianten im genetischen Code</b> . . . . .	1416
27.1.3	Verschiebung des Leserasters bei der Translation und das RNA-Editing haben Einfluss darauf, wie der Code gelesen wird . . . . .	1418
<b>27.2</b>	<b>Proteinsynthese</b> . . . . .	1421
27.2.1	Die Proteinbiosynthese läuft in 5 Phasen ab . . . . .	1422
27.2.2	Das Ribosom ist eine komplizierte supramolekulare Maschine . . . . .	1423
■	<b>EXKURS 27-2 Von einer RNA-zu einer Protein-Welt</b> . . . . .	1426
27.2.3	Transfer-RNAs haben charakteristische Strukturmerkmale . . . . .	1427
27.2.4	Phase 1: Aminoacyl-tRNA-Synthetasen verknüpfen die richtigen Aminosäuren mit ihren tRNAs . . . . .	1429
27.2.5	Phase 2: Eine spezifische Aminosäure initiiert die Proteinsynthese . . . . .	1434
■	<b>EXKURS 27-3 Natürliche und unnatürliche Erweiterung des genetischen Codes</b> . . . . .	1435
27.2.6	Phase 3: In der Elongationsphase werden Peptidbindungen geknüpft . . . . .	1442
27.2.7	Phase 4: Die Termination der Polypeptidsynthese erfordert ein besonderes Signal . . . . .	1446
■	<b>EXKURS 27-4 Induzierte Abweichungen vom genetischen Code: Suppression von nonsense-Codons</b> . . . . .	1447
27.2.8	Phase 5: Neu synthetisierte Polypeptidketten falten sich und werden prozessiert . . . . .	1450
27.2.9	Die Proteinsynthese wird durch viele Antibiotika und Toxine gehemmt . . . . .	1453
<b>27.3</b>	<b>Protein-Targeting und Proteinabbau</b> 1455	
27.3.1	Die posttranslationale Modifikation vieler eukaryotischer Proteine beginnt im endoplasmatischen Reticulum . . . . .	1456
27.3.2	Die Glycosylierung spielt eine Schlüsselrolle beim Protein-Targeting . . . . .	1457
27.3.3	Signalsequenzen für den Transport in den Zellkern werden nicht abgespalten . . . . .	1460
27.3.4	Auch Bakterien verwenden Signalsequenzen zum zielgerichteten Proteintransport . . . . .	1462
27.3.5	Zellen importieren Proteine mithilfe der rezeptorvermittelten Endocytose . . . . .	1463
27.3.6	Der Proteinabbau wird in allen Zellen durch ein spezialisiertes System vermittelt . . . . .	1464
<b>28</b>	<b>Regulation der Genexpression</b> . . . . .	1473
<b>28.1</b>	<b>Grundlagen der Genregulation</b> . . . . .	1475
28.1.1	Die RNA-Polymerase bindet an Promotoren in der DNA . . . . .	1475
28.1.2	Die Transkriptionsinitiation wird von Proteinen reguliert, die am Promotor oder in seiner Nähe binden . . . . .	1476
28.1.3	Viele Bakteriengene werden in Gruppen reguliert, die man als Operons bezeichnet . . . . .	1478
28.1.4	Das <i>lac</i> -Operon unterliegt der negativen Regulation . . . . .	1480
28.1.5	Regulatorische Proteine haben separate DNA-bindende Domänen . . . . .	1482
28.1.6	Regulatorische Proteine enthalten auch Domänen für Protein-Protein-Wechselwirkungen . . . . .	1486
<b>28.2</b>	<b>Regulation der Genexpression bei Prokaryoten</b> . . . . .	1488
28.2.1	Das <i>lac</i> -Operon unterliegt einer positiven Regulation . . . . .	1489
28.2.2	Viele Gene für Enzyme zur Biosynthese von Aminosäuren werden durch Abschwächung der Transkription reguliert . . . . .	1490
28.2.3	Zur Induktion der SOS-Reaktion müssen Repressorproteine zerstört werden . . . . .	1493
28.2.4	Die Synthese der ribosomalen Proteine wird mit der rRNA-Synthese koordiniert . . . . .	1495
28.2.5	Die Funktion mancher mRNA-Moleküle wird von kleinen RNA-Molekülen <i>in cis</i> oder <i>in trans</i> reguliert . . . . .	1497
28.2.6	Manche Gene werden durch genetische Rekombination reguliert . . . . .	1499
<b>28.3</b>	<b>Regulation der Genexpression bei Eukaryoten</b> . . . . .	1501

28.3.1	Aktiv transkribiertes Chromatin unterscheidet sich in seiner Struktur von inaktivem Chromatin . . . . .	1502	28.3.9	Viele eukaryotische mRNA-Moleküle unterliegen der Translationsrepression	1514
28.3.2	Chromatin-Remodeling erfolgt durch Acetylierung und Nucleosomenverschiebung bzw. -umlagerung . . . . .	1503	28.3.10	Das Gen-Silencing nach der Transkription wird durch RNA-Interferenz vermittelt . . . . .	1515
28.3.3	Viele eukaryotische Promotoren werden positiv reguliert . . . . .	1504	28.3.11	In Eukaryoten nimmt die RNA-vermittelte Regulation der Genexpression viele Formen an . . .	1516
28.3.4	DNA-bindende Aktivatoren und Coaktivatoren erleichtern die Zusammenlagerung der allgemeinen Transkriptionsfaktoren . . . . .	1505	28.3.12	Die Entwicklung wird durch Kaskaden von regulatorischen Proteinen gesteuert . . . . .	1517
28.3.5	Die Gene für den Galactosestoffwechsel in Hefe unterliegen sowohl positiver als auch negativer Regulation . . . . .	1509	 <b>EXKURS 28-1 Von Flossen, Flügeln, Schnäbeln und den „Siebensachen“</b>	. 1525	
28.3.6	Transkriptionsaktivatoren sind modular aufgebaut . . . . .	1510	<b>Anhang A</b>		
28.3.7	Die Genexpression kann bei Eukaryoten durch inter- und intrazelluläre Signale reguliert werden . . . . .	1512	<b>Biochemische Abkürzungen</b>	. . . . .	1531
28.3.8	Regulation kann durch Phosphorylierung von Transkriptionsfaktoren im Zellkern erfolgen . . . . .	1513	<b>Anhang B</b>		
			<b>Lösungen der Aufgaben</b>	. . . . .	1537
			<b>Quellenverzeichnis</b>	. . . . .	1587
			<b>Glossar</b>	. . . . .	1601
			<b>Sachverzeichnis</b>	. . . . .	1629
			<b>Danksagung</b>	. . . . .	1665



<http://www.springer.com/978-3-540-68637-8>

Lehninger Biochemie

Nelson, D.; Cox, M.

2009, XLIV, 1668 S. 1318 Abb., 1083 in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-540-68637-8