

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Biochemie	1	3.1.2	Reaktionsbeschleunigung innerhalb von Stoffwechselwegen	83
1.1	Zellen als Reaktionsraum biochemischer Prozesse	1	3.2	Thermodynamische und kinetische Grundlagen	83
1.1.1	Prokaryonten	1	3.2.1	Thermodynamische Voraussetzungen	83
1.1.2	Eukaryonten	2	3.2.2	Reaktionsgeschwindigkeit	85
1.2	Wasser als Reaktionsmedium	3	3.2.3	Aktivierung chemischer Reaktionen	86
1.2.1	Arten zwischenmolekularer Wechselwirkungen	3	3.3	Enzyme als Biokatalysatoren	88
1.2.2	Struktur und Eigenschaften des Wassers	5	3.3.1	Diffusionslimitation	88
1.2.3	Wasser als Reaktionspartner	8	3.3.2	Aktives Zentrum und Substratbindung	88
1.2.4	Saure und basische Lösungen: die pH-Skala	9	3.3.3	Substratimmobilisierung	91
1.2.5	Säure-Base-Gleichgewichte und Dissoziationskonstanten	9	3.3.4	Kompartimentierung durch Wasserausschluss	91
1.2.6	Titrationenkurven und Pufferlösungen	10	3.3.5	Katalytische Strategien	92
1.3	Biochemische Reaktionen	12	3.3.6	Eigenschaften von Enzymen	94
1.3.1	Thermodynamische Grundlagen	12	3.4	Enzymkinetik	96
1.3.2	Kinetik	14	3.4.1	Das Michaelis-Menten-Modell	96
1.4	Überblick über Elemente, Moleküle und Reaktionstypen bei biochemischen Prozessen	16	3.4.2	Enzymaktivitätsbestimmung	99
1.4.1	Die Elemente des Lebens	16	3.4.3	Enzyminhibition	100
1.4.2	Funktionelle Gruppen und Stoffklassen	16	3.5	Regulation der Enzymaktivität	104
1.4.3	Wichtige Begriffe der Stereochemie	16	3.5.1	Nichtkovalente Enzymregulation	104
1.4.4	Grundlegende Reaktionsmuster	19	3.5.2	Kovalente Enzymregulation	110
1.4.5	Vom Monomer zum Biopolymer	25	3.6	Isoenzyme	112
2	Proteine	31	3.6.1	Definition	112
2.1	Aminosäuren und Peptide	32	3.6.2	Oligomere Isoenzyme	112
2.1.1	Struktur der Aminosäuren	32	3.6.3	Organspezifität	113
2.1.2	Allgemeine Eigenschaften von Aminosäuren	33	3.7	Systematische Klassifikation von Enzymen	113
2.1.3	Peptidbindung	39	3.7.1	Enzymklassen	113
2.2	Aufbau von Proteinen	41	4	Coenzyme	117
2.2.1	Primärstruktur	42	4.1	Funktionen der Coenzyme	118
2.2.2	Stabilisierende Wechselwirkungen	45	4.1.1	Allgemeine Eigenschaften	118
2.2.3	Sekundärstrukturen	48	4.1.2	Einteilung der Coenzyme	118
2.2.4	Supersekundärstrukturen	51	4.2	Redoxcoenzyme	119
2.2.5	Tertiärstruktur	54	4.2.1	Nicotinamiddinucleotide, NAD ⁺ /NADP ⁺	119
2.2.6	Quartärstruktur	58	4.2.2	Flavinnucleotide, FMN und FAD	120
2.3	Posttranslationale Zustandsänderungen	59	4.2.3	Chinone: Ubichinon, Coenzym K und Tocopherol	121
2.3.1	Proteinmodifikationen	59	4.2.4	Liponsäure, Glutathion	123
2.3.2	Faltung von Proteinen	62	4.2.5	Ascorbinsäure	124
2.3.3	Membranproteine	65	4.2.6	Häm und Eisenporphyrinsysteme	125
2.4	Biologischer Abbau von Proteinen	68	4.3	Gruppenübertragende Coenzyme	125
2.5	Isolierung und Charakterisierung von Proteinen	69	4.3.1	Übertragung energiereicher Phosphatgruppen	125
3	Enzyme	81	4.3.2	Übertragung von Sulfatgruppen	126
3.1	Struktur und Aufgaben von Enzymen	82	4.3.3	Coenzym A	126
3.1.1	Spezialisierte Proteindomänen	82	4.3.4	Pyridoxalphosphat	127
			4.3.5	Biotin	127
			4.3.6	Thiaminpyrophosphat	128

4.3.7	Folsäure und Pteridine	128	6.3.7	Das Respirasom I, III ₂ , IV ₄	197
4.3.8	Coenzym B ₁₂	130	6.4	Struktur und Funktion der	
4.3.9	Dolicholphosphat	130		ATP-Synthase	198
4.4	Anorganische Cofaktoren	130	6.4.1	F ₀ -Teil und F ₁ -Teil der ATP-Synthase	198
4.4.1	Schwermetallionen	131	6.4.2	Die protonenmotorische Kraft	200
4.4.2	Selen	132	6.5	Entstehung und Beseitigung von	
				Sauerstoffradikalen	200
5	Kohlenhydrate	135	6.5.1	Bildung von Sauerstoffradikalen in der	
5.1	Chemie der Kohlenhydrate	136		Atmungskette	200
5.1.1	Struktur und Stereochemie der		6.5.2	Bildung von H ₂ O ₂	202
	Monosaccharide	136	6.6	Mitochondriopathien	202
5.1.2	Chemische Eigenschaften und Reaktionen		6.6.1	Mutationen in der mitochondrialen DNA	202
	der Monosaccharide	138	6.6.2	Friedreich-Ataxie	203
5.1.3	Disaccharide und Oligosaccharide	141			
5.1.4	Polysaccharide	142	7	Lipidstoffwechsel: Einführung, Acylfette	
5.1.5	Glykosaminoglykane, Proteoglykane und			und Triglyceride	207
	Glykoproteine	144	7.1	Allgemeine Strukturen und Funktionen	
5.2	Stoffwechsel der Kohlenhydrate	145		von Lipiden	208
5.2.1	Verdauung und Absorption der		7.1.1	Definitionen	208
	Kohlenhydrate	145	7.1.2	Klassifizierung der Lipide	208
5.2.2	Die Glykolyse	148	7.1.3	Hauptfunktionen der Lipide	208
5.2.3	Der Pentosephosphatweg	158	7.2	Acylfette	209
5.2.4	Gluconeogenese und aktivierte Zucker	161	7.2.1	Struktur der Fettsäuren	210
5.2.5	Der Citratzyklus	164	7.2.2	Fettsäureabbau	213
5.2.6	Glykogenstoffwechsel	169	7.2.3	Synthese der Fettsäuren	220
5.2.7	Integration, Regulation und Organverteilung		7.2.4	Desaturierung und Elongation	224
	des Kohlenhydratstoffwechsels	173	7.2.5	Eicosanoide	225
			7.3	Triglyceride	230
6	Mitochondrien und Energiegewinnung	181	7.3.1	Struktur und Funktion	230
6.1	Struktur und Ursprung der Mitochondrien	182	7.3.2	Synthese der Triglyceride	230
6.1.1	Die vier Kompartimente der Mitochondrien	182	7.3.3	Abbau der Triglyceride	232
6.1.2	Mitochondriengenetik	183	7.3.4	Regulation des Triglyceridstoffwechsels	232
6.1.3	Mitochondrien als Nachkommen				
	von Bakterien	183	8	Membranlipide	235
6.2	Das Prinzip der mitochondrialen		8.1	Glycerophospholipide	236
	ATP-Synthase	183	8.1.1	Biosynthese von Glycerophospholipiden	236
6.2.1	Kooperation von ATP-Synthase und		8.1.2	Konvertierung von Glycerophospholipiden	237
	Atmungskette	183	8.1.3	Phospholipasen	238
6.2.2	Stöchiometrie der mitochondrialen		8.1.4	Cardiolipin	239
	ATP-Synthase	186	8.1.5	Etherlipide	239
6.2.3	Entkoppler	186	8.2	Sphingolipide	240
6.2.4	Mitochondriale Metabolittranslokatoren	187	8.2.1	Biosynthese des Sphingolipidgrundgerüsts	241
6.2.5	Regulation der Atmung	188	8.2.2	Phosphosphingolipide	242
6.3	Struktur und Funktion der Atmungskette	189	8.2.3	Glykosphingolipide	243
6.3.1	Überblick, Redoxzentren, Hemmstoffe	189	8.3	Sterine und andere Isoprenderivate	246
6.3.2	Komplex I	190	8.3.1	Struktur und Funktion der Isoprenderivate	
6.3.3	Komplex II: die Succinat-Dehydrogenase			und Sterine	246
	des Citratzyklus	191	8.3.2	Cholesterinsynthese	248
6.3.4	ETF-Ubichinon-Oxidoreduktase und		8.3.3	Verstoffwechslung des Cholesterins	250
	Glycerin-3-phosphat-Dehydrogenase	192	8.4	Struktureller Aufbau von	
6.3.5	Ubichinon, Komplex III und der Q-Zyklus	193		Zellmembranen	253
6.3.6	Cytochrom c und Komplex IV		8.4.1	Die Phospholipiddoppelschicht	254
	(Cytochrom-Oxidase)	195	8.4.2	Membranproteine	259

9	Aminosäurestoffwechsel	263	11.3.2	Aufbau des Chromatins	330
9.1	Aminosäureabbau	264	11.3.3	Chromatin-Remodelling	333
9.1.1	Aminogruppenstoffwechsel	264	11.4	Organisation von Genen und Genomen	335
9.1.2	Harnstoffzyklus	266	11.4.1	Aufbau von Genen	335
9.1.3	Abbau des Kohlenstoffgerüsts	269	11.4.2	Nichtkodierende DNA	341
9.2	Aminosäuren als Ausgangspunkt von Biosynthesen	274	11.4.3	Transposons	342
9.2.1	Biogene Amine	274	11.4.4	Viren	344
9.2.2	Stoffwechsel der Monokohlenstoffeinheiten ...	276	11.4.5	Mitochondriales Genom	348
9.2.3	Stickstoffmonoxid (NO)	278	12	Transkription	353
9.2.4	Schilddrüsenhormone	280	12.1	Ablauf der Transkription	354
9.2.5	Glutathion	280	12.1.1	Initiation der Transkription am Promotor	354
9.3	Aminosäurebiosynthese	281	12.1.2	Elongation der Transkription	355
9.3.1	Herkunft des Stickstoffs der Aminosäuren	281	12.1.3	Struktur der RNA-Polymerasen	355
9.3.2	Generelle Mechanismen der Aminosäurebiosynthese	281	12.1.4	Termination der Transkription	357
9.3.3	Körpereigene Biosynthese	282	12.2	Transkriptionskontrolle bei Prokaryonten	357
10	Struktur und Stoffwechsel der Nucleotide	287	12.2.1	Das Operon: Ein Promotor reguliert mehrere Gene	357
10.1	Nomenklatur und Chemie der Nucleotide ...	288	12.2.2	Genaktivierung	358
10.2	Purinstoffwechsel	289	12.3	Transkriptionskontrolle bei Eukaryonten	358
10.2.1	Purinbiosynthese	289	12.3.1	Promotoren, Enhancer und Silencer	360
10.2.2	Purinwiederverwertung (Salvage pathway) ...	293	12.3.2	Modularer Aufbau der regulatorischen Elemente	360
10.2.3	Purinabbau	295	12.3.3	Bildung des Initiationskomplexes am basalen Promotor	362
10.3	Pyrimidinstoffwechsel	298	12.4	Transkriptionsfaktoren	364
10.3.1	Pyrimidinbiosynthese	298	12.4.1	Domänenstruktur von Transkriptionsfaktoren ..	364
10.3.2	Pyrimidinwiederverwertung	300	12.4.2	DNA-Bindungsdomänen von Transkriptionsfaktoren	364
10.3.3	Pyrimidinabbau	300	12.4.3	Transkriptionsregulierende Domänen von Transkriptionsfaktoren	370
10.4	Biosynthese der Desoxyribonucleotide	301	12.5	Regulation der Transkription durch die RNA-Polymerasen I und III	370
10.4.1	Ribonucleotid-Reduktase	301	12.5.1	Transkription der ribosomalen RNA-Gene durch RNA-Polymerase I	370
10.4.2	Regulation der Desoxyribonucleotidsynthese ..	302	12.5.2	Regulation der RNA-Polymerase-I-Transkription	371
10.4.3	Thymidinsynthese	302	12.5.3	Promotoren der RNA-Polymerase III	372
10.4.4	Inhibitoren des Nucleotidstoffwechsels	303	12.6	Regulation der Funktion und Aktivität von Transkriptionsfaktoren	373
11	Das genetische Material	307	12.6.1	Kontrolle der Synthese und des Abbaus	373
11.1	Struktur und Funktion der Nucleinsäuren ...	308	12.6.2	Kovalente Modifikation	374
11.1.1	Funktionen und Eigenschaften der Nucleinsäuren	308	12.6.3	Ligandenbindung	377
11.1.2	Struktur der Desoxyribonucleinsäure	310	12.6.4	Interaktion mit Inhibitorproteinen	378
11.1.3	Struktur von Ribonucleinsäuren	313	12.6.5	Dimerisierung	380
11.1.4	Superhelikale Struktur und Topoisomerasen ...	314	12.6.6	Partielle Proteolyse	381
11.1.5	Wechselwirkungen der DNA-Doppelhelix mit Proteinen und Nucleinsäuren	318	12.7	Kontrolle der Genexpression durch Coaktivatoren und Corepressoren	382
11.2	Replikation	320	12.7.1	Kovalente Modifikation der Histone durch Coaktivatoren	382
11.2.1	Semikonservative Replikation	320	12.7.2	Änderung der DNA-Struktur durch Coaktivatoren	383
11.2.2	Teilprozesse der Replikation	321	12.7.3	Chromatin-Remodelling	383
11.2.3	Funktion der DNA-Polymerasen	325			
11.2.4	Die DNA-Replikationsmaschine	325			
11.2.5	Regulation der Replikation	327			
11.2.6	Das Telomerproblem	328			
11.3	Verpackung der DNA	329			
11.3.1	Chromatin und Histone	329			

12.7.4	Corepressoren	383	14	Veränderung der genetischen Information	417
12.8	Kontrolle der Transkription durch DNA-Methylierung und Locus-Kontrollregionen	384	14.1	Mutation und Rekombination	417
12.8.1	DNA-Methylierung	384	14.1.1	Mutationsarten	418
12.8.2	Locus-Kontrollregionen	385	14.1.2	Rekombination	418
12.8.3	Isolatorelemente	385	14.1.3	Somatische und Keimbahnmutationen	418
12.9	Posttranskriptionelle RNA-Modifikationen	386	14.2	Ursachen und Folgen von Mutationen	419
12.9.1	Capping der mRNA am 5'-Ende	386	14.2.1	Replikationsfehler	419
12.9.2	Polyadenylierung der mRNA am 3'-Ende	387	14.2.2	Baseninstabilität und endogene Noxen	420
12.9.3	Spleißen der mRNA-Vorläufer	388	14.2.3	Chemische Mutagenese	421
12.9.4	RNA-Editierung	393	14.2.4	Physikalische Mutagenese	424
12.9.5	Ein Gen – zwei Proteine	394	14.2.5	Auswirkungen von Mutationen	426
12.9.6	Interaktion RNA-modifizierender Enzyme mit der RNA-Polymerase II	394	14.3	DNA-Reparaturmechanismen	427
12.10	Transport der mRNA in das Zytosol und mRNA-Abbau	395	14.3.1	Direkte Reparatur	427
12.10.1	Transport der reifen mRNA in das Zytoplasma	395	14.3.2	Basenexzisionsreparatur (BER)	428
12.10.2	Regulation des mRNA-Abbaus im Zytoplasma	396	14.3.3	Nucleotidexzisionsreparatur (NER)	428
12.11	Prozessierung von prä-rRNA und prä-tRNA	397	14.3.4	Mismatch-Reparatur (MMR)	429
12.11.1	Prozessierung der prä-rRNA	397	14.3.5	Toleranzreparatursysteme	430
12.11.2	Prozessierung der prä-tRNA	398	14.4	DNA-Rekombination und Rekombinationsreparatur	430
13	Translation	401	14.4.1	Homologe Rekombination	430
13.1	Der genetische Code	402	14.4.2	Sequenzspezifische Rekombination	431
13.1.1	Prinzip des genetischen Codes	402	14.4.3	Reparatur von Doppelstrangbrüchen	432
13.1.2	Folgen von Mutationen	402	14.5	DNA-Methylierung und Imprinting	434
13.2	Transfer-RNA	403	14.5.1	DNA-Methylierung	434
13.2.1	Struktur und Funktion von tRNA	403	14.5.2	Genomisches Imprinting	435
13.2.2	Wobble-Basenpaare in der dritten Codon-Position	403	15	Gentechnik, Gendiagnostik, Gentherapie	437
13.2.3	Aminoacyl-tRNA-Synthetasen	404	15.1	Grundlagen der Gentechnik	438
13.3	Ribosomen	405	15.1.1	DNA-Rekombination	438
13.3.1	Aufbau der Ribosomen	405	15.1.2	DNA-Klonierung	440
13.3.2	Biogenese der Ribosomen	406	15.1.3	Die Polymerase-Kettenreaktion	445
13.4	Proteinbiosynthese	406	15.1.4	DNA-Sequenzierung	447
13.4.1	Orte der Proteinsynthese	406	15.2	Gendiagnostik	448
13.4.2	Phasen der Proteinsynthese	407	15.2.1	Molekulare Hybridisierung	448
13.4.3	Initiation der Translation bei Prokaryonten	407	15.2.2	DNA-Chips	451
13.4.4	Initiation der Translation bei Eukaryonten	408	15.2.3	Genetischer Fingerabdruck	452
13.4.5	Elongation	409	15.3	Genetisch veränderte Organismen	453
13.4.6	Termination	410	15.3.1	Genetechnisch modifizierte Organismen (GMOs)	453
13.5	Regulation der Translation bei Eukaryonten	411	15.3.2	Einfacher Gentransfer	454
13.5.1	Hemmung der Initiation durch eIF2-Kinasen	411	15.3.3	Knock-out-Mäuse	456
13.5.2	Stimulierung der Initiation durch Protein-Kinasen	412	15.4	Gentechnische Medikamente	458
13.5.3	Regulation durch mRNA-bindende Proteine oder MicroRNA	412	15.4.1	Bedeutung rekombinanter Proteine	458
13.6	Hemmstoffe der Translation	414	15.4.2	Produktion rekombinanter Proteine	459
13.6.1	Antibiotika	414	15.5	Gentherapie	461
13.6.2	Exotoxine	414	15.5.1	Gentherapeutische Verfahren	461
			15.5.2	Anwendungen der Gentherapie	464
			15.5.3	Xenotransplantation und therapeutisches Klonen	465

16	Intrazelluläre Kompartimente	469	18	Lipidtransport und Regulation des Lipidstoffwechsels	517
16.1	Aufbau eukaryontischer Zellen	470	18.1	Intrazellulärer Lipidtransport	518
16.2	Zellkern	471	18.1.1	Ausgangssituationen	518
16.2.1	Nucleoplasma	471	18.1.2	Mechanismen	518
16.2.2	Kernhülle und Kernporenkomplexe	474	18.2	Interzellulärer Lipidtransport	523
16.2.3	Kernlamina	475	18.2.1	Struktur der Lipoproteine	524
16.3	Endoplasmatisches Retikulum	476	18.2.2	Stoffwechsel der Lipoproteine	529
16.3.1	Raues endoplasmatisches Retikulum	476	18.3	Regulation des Lipidstoffwechsels	538
16.3.2	Glattes endoplasmatisches Retikulum	478	18.3.1	Cholesterinstoffwechsel	538
16.4	Prä-Golgi-Transportintermediate	479	18.3.2	Fettsäure- und Triglyceridstoffwechsel	541
16.5	Golgi-Apparat	481	19	Zellarchitektur und Motilität	547
16.6	Sekretgranula	481	19.1	Zytoskelett	548
16.7	Endozytose, Lysosomen und Autophagolysosomen	484	19.1.1	Intermediärfilamente	548
16.8	Mitochondrien	486	19.1.2	Actinfilamente	550
16.9	Peroxisomen	487	19.1.3	Zellwanderung	554
16.10	Zytoplasma	488	19.1.4	Mikrotubuli	556
17	Zielsteuerung und intrazellulärer Transport von Proteinen	491	19.2	Molekulare Motoren	561
17.1	Prinzipien des intrazellulären Proteintransports	492	19.2.1	Muskelkontraktion	561
17.2	Kerntransport	492	19.2.2	Mikrotubuliabhängige Motorproteine	568
17.2.1	Kernporen	492	20	Extrazelluläre Matrix und Zellkontakte ..	575
17.2.2	Transportproteine der Importin- β -Familie	494	20.1	Zellkontakte	575
17.2.3	Import in den Zellkern	494	20.1.1	Zell-Zell-Kontakte	575
17.2.4	Export aus dem Zellkern	495	20.1.2	Zell-Matrix-Kontakte	580
17.3	Mitochondrialer Proteintransport	496	20.2	Extrazelluläre Matrix	584
17.3.1	Zielerkennungssequenzen mitochondrialer Proteine	496	20.2.1	Kollagen	584
17.3.2	Der TOM-Komplex der Außenmembran	496	20.2.2	Elastische Fasern	588
17.3.3	Die beiden TIM-Komplexe der Innenmembran ..	497	20.2.3	Glykosaminoglykane und Proteoglykane	589
17.3.4	Mechanismen des mitochondrialen Proteintransports	498	20.2.4	Knochen und Knorpel	591
17.4	Die Biogenese der Peroxisomen	500	20.2.5	Basallamina	592
17.4.1	PEX-Gene und Peroxine	500	21	Kanäle und Transporter	597
17.4.2	Peroxisomaler Proteintransport	500	21.1	Grundlagen des transmembranären Transports	598
17.5	Proteintransport in das endoplasmatische Retikulum	501	21.1.1	Passive Permeabilität der Lipiddoppelmembran	598
17.5.1	Das Ribonucleoprotein SRP	501	21.1.2	Elektrische Eigenschaften der Lipiddoppelmembran	599
17.5.2	Die Importpore des ER	502	21.1.3	Poren, Kanäle, Transporter und Carrier	601
17.5.3	Proteinfaltung und Proteinmodifikationen im ER	503	21.2	Eigenschaften einzelner Kanäle und Poren ..	604
17.5.4	Kontrolle der Proteinfaltung im ER	505	21.2.1	Spannungsabhängige Kationenkanäle	604
17.6	Sekretion	507	21.2.2	Einwärts gleichrichtende Kaliumkanäle	607
17.6.1	Transport durch COP-I- und COP-II-Vesikel	507	21.2.3	Amiloridhemmbare Natriumkanäle	608
17.6.2	Proteinreifung im Golgi-Apparat	508	21.2.4	Ligandengesteuerte Kationenkanäle	608
17.6.3	Transport zu Endosomen, Lysosomen und zur Plasmamembran	509	21.2.5	Kationenkanäle der TRP- und KCNK-Gruppen	609
17.6.4	Sekretion von Neurotransmittern	511	21.2.6	Chloridkanäle	609
17.7	Endozytose	512	21.2.7	Gap-junction-Kanäle	611
17.7.1	Clathrinabhängige Endozytose	512	21.2.8	Aquaporine	611
17.7.2	Endozytose über Lipid rafts und Caveolae	513	21.2.9	Porenbildung durch extrazelluläre Proteine ..	613
			21.3	Transporter	614

XX Inhaltsverzeichnis

21.3.1	V-Typ- und P-Typ-ATPasen in Plasmamembranen	615	23.1.3	Cyclinabhängige Kinasen	672
21.3.2	ABC-Transporter	617	23.2	Kontrollmechanismen des Zellzyklus	674
21.3.3	Transporter für Monosaccharide und Lactat	619	23.2.1	Aktivierung cyclinabhängiger Kinasen	674
21.3.4	Transporter für Aminosäuren und Neurotransmitter	621	23.2.2	Checkpoint-Mechanismen	676
21.3.5	Transporter für Nucleoside, Vitamine, Fettsäuren und Gallensäuren	623	23.2.3	Telomere	678
21.3.6	Transporter für Protonen und anorganische Ionen	624	23.3	Zelltod	678
21.3.7	Transporter für Bicarbonat, Phosphat und Sulfat	625	23.3.1	Apoptose und Nekrose	678
21.3.8	Passive und sekundär aktive Arzneimitteltransporter	628	23.3.2	Caspasen	680
22	Zelluläre Signalprozesse	631	23.3.3	Proteine der Bcl2-Familie	682
22.1	Mechanismen der Signalübertragung	632	23.3.4	Apoptose und Seneszenz als Schutz vor Tumorentstehung	683
22.1.1	Signalauslösung durch Rezeptor-Liganden-Wechselwirkung	633	24	Hormone	687
22.1.2	Molekulare Prinzipien der Signalweiterleitung	634	24.1	Grundlagen	688
22.1.3	Rezeptorklassen	637	24.1.1	Klassifikation, Struktur und Stoffwechsel	688
22.2	G-Protein-gekoppelte Rezeptoren	639	24.1.2	Vermittlung der Hormonwirkung	690
22.2.1	Überblick	639	24.1.3	Regulation von Hormonen	693
22.2.2	Struktur	639	24.2	Biogene Amine	695
22.2.3	Heterotrimere G-Proteine	640	24.2.1	Catecholamine	695
22.2.4	Regulation GPCR-gesteuerter Signale	641	24.2.2	Serotonin	697
22.2.5	Adrenerge Rezeptoren	642	24.2.3	Histamin	700
22.3	Second messenger	644	24.3	Hypothalamus und Hypophyse	702
22.3.1	Zyklische Nucleotide	644	24.3.1	Hypothalamus und Neurohypophyse	702
22.3.2	Phospholipidderivate	647	24.3.2	Adenohypophyse	704
22.3.3	Ca ²⁺ -Signale	648	24.4	Schilddrüsenhormone	709
22.4	Rezeptor-Tyrosin-Kinasen	650	24.4.1	Synthese und Sekretion	709
22.4.1	Struktur und Aktivität	650	24.4.2	Regulation der Schilddrüsenhormone	711
22.4.2	Signalübertragung über den MAP-Kinase-Weg	654	24.5	Steroidhormone der Nebennierenrinde	713
22.4.3	Der Insulinrezeptor	657	24.5.1	Grundlagen	713
22.5	Serin/Threonin-Kinasen	659	24.5.2	Regulation der Steroidhormonsynthese	716
22.5.1	Rezeptoren mit Serin/Threonin-Kinase-Aktivität	659	24.5.3	Wirkungen von Cortisol	717
22.5.2	Zytoplasmatische Serin/Threonin-Kinasen	660	24.5.4	Transport und Metabolismus	718
22.6	Rezeptoren ohne intrinsische Enzymaktivität	662	24.6	Sexualhormone	719
22.6.1	Zytokinrezeptoren	662	24.6.1	Grundlagen	719
22.6.2	Zytoplasmatische Tyrosin-Kinasen	663	24.6.2	Sexualhormone der Frau	721
22.6.3	Weitere Signalwege mit Bedeutung für Entwicklung, Tumorgenese und Immunregulation	665	24.6.3	Sexualhormone des Mannes	726
23	Zellzyklus und Zelltod	671	24.7	Hormone des Elektrolyt- und Wasserhaushalts	728
23.1	Zellproliferation und Cycline	671	24.7.1	Renin-Angiotensin-Aldosteron-System (RAAS)	728
23.1.1	Die Phasen des Zellzyklus	671	24.7.2	Vasopressin	730
23.1.2	Innere und äußere Kontrolle des Zellzyklus	672	24.7.3	Natriuretische Peptide	731
			24.8	Hormone des Calcium- und Phosphatstoffwechsels	733
			24.8.1	Calcium- und Phosphathomöostase	733
			24.8.2	Parathormon	734
			24.8.3	Vitamin D	735
			24.8.4	Calcitonin	737
			24.9	Hormone des Energiestoffwechsels und -haushalts	738
			24.9.1	Insulin	738
			24.9.2	Glucagon und Glucagon-like peptides	743
			24.9.3	Leptin	745

25	Blut	749	26.6.3	Präsentation zellfremder Peptide durch HLA-Klasse-II-Moleküle	817
25.1	Plasma	751	26.6.4	Gene des HLA-Komplexes	819
25.1.1	Volumenregulation der Körperflüssigkeiten	751	26.6.5	HLA-Polymorphismus und Antigenerkennung ..	819
25.1.2	Plasmaproteine	752	26.7	Reifung des immunologischen Repertoires und Selbsttoleranz	820
25.2	Blutzellbildung und -reifung	755	26.8	Die adaptive Immunantwort	821
25.2.1	Hämatopoetische Stammzellen	755	26.8.1	Aktivierung von B- und T-Lymphozyten durch Antigenrezeptoren	821
25.2.2	Hämatopoetische Wachstumsfaktoren	756	26.8.2	Kommunikation zwischen Leukozyten über Zellinteraktionsmoleküle	823
25.2.3	Koloniebildende Einheiten	757	26.8.3	Kommunikation zwischen Leukozyten über Zytokine	826
25.3	Erythrozyten und Hämoglobin	758	26.9	Effektormechanismen	830
25.3.1	Aufbau und Funktion der Erythrozyten	758	26.9.1	Effektorfunktionen von Antikörpern	830
25.3.2	Bildung und Alterung von Erythrozyten	760	26.9.2	Das Komplementsystem	831
25.3.3	Hämoglobin	761	26.9.3	Zellvermittelte Zytotoxizität	835
25.3.4	Hämstoffwechsel	763	26.10	Störungen des Immunsystems	837
25.3.5	Eisenstoffwechsel	766	26.10.1	Überempfindlichkeitsreaktionen	837
25.3.6	O ₂ - und CO ₂ -Transport	768	26.10.2	Autoimmunreaktionen	838
25.3.7	Glucosestoffwechsel im Erythrozyten	771	26.10.3	Immundefekte	838
25.3.8	Blutgruppen	774	26.11	Immunologische Methoden und Labortests ..	839
25.4	Leukozyten und Entzündung	777	26.11.1	Polyklonale und monoklonale Antikörper	839
25.4.1	Leukozyten	777	26.11.2	Immunpräzipitation	839
25.4.2	Leukozytenevasation	781	26.11.3	ELISA und RIA	840
25.4.3	Phagozytose und oxidativer Burst	783	26.11.4	Western-Blot	841
25.4.4	Akute-Phase-Reaktion	784	26.11.5	Immunfluoreszenz und Immunhistologie	841
25.5	Hämostase: Thrombozyten, Blutgerinnung, Fibrinolyse	786	27	Biotransformation und Detoxifizierung in der Leber	845
25.5.1	Thrombozyten und Thrombozytenaktivierung ..	786	27.1	Aufbau und Funktion der Leber	846
25.5.2	Gerinnung und Fibrinolyse	788	27.2	Biotransformation in der Leber	847
26	Immunologie	795	27.2.1	Transportsysteme für Substanzaufnahme	847
26.1	Das Immunsystem	796	27.2.2	Funktionalisierung	848
26.1.1	Angeborene und adaptive Immunität	796	27.2.3	Konjugierung	851
26.1.2	Die Zellen des Immunsystems	798	27.2.4	Export von Metaboliten	853
26.1.3	Organe des Immunsystems	798	27.2.5	Regulatoren der Detoxifizierung	855
26.2	Das immunologische Erkennungsrepertoire ..	800	27.3	Bilirubin	855
26.2.1	Rezeptoren des angeborenen Immunsystems ..	800	27.4	Cholesterin und Gallensäuren	857
26.2.2	Rezeptoren des adaptiven Immunsystems	802	28	Verdauung und Ernährung	861
26.3	Struktur und Funktion von Antikörpern	802	28.1	Organe des Verdauungstrakts	862
26.3.1	Aufbau der Immunglobuline	802	28.1.1	Verdauungsorgane und Verdauungssekrete ..	862
26.3.2	Antikörperklassen	804	28.1.2	Die Mikrobiota des Gastrointestinaltrakts	867
26.4	Entstehung der Vielfalt von Antikörpern	806	28.1.3	Hormone des Magen-Darm-Trakts	870
26.4.1	Umlagerung der Immunglobulin-Gene	806	28.2	Verdauung und Resorption der Makronährstoffe	872
26.4.2	Produktion von B-Zell-Antigenrezeptoren und Antikörpern gleicher Spezifität	809	28.2.1	Kohlenhydrate	872
26.4.3	Klassenwechsel	810	28.2.2	Proteine	872
26.4.4	Affinitätsreifung: somatische Mutation und Selektion	811	28.2.3	Lipide	874
26.4.5	Monoklonale Antikörper	813	28.2.4	Wasser und Elektrolyte	876
26.5	T-Zell-Rezeptoren	814	28.3	Stoffwechsel der Mikronährstoffe	877
26.5.1	Aufbau	814	28.3.1	Vitamine	877
26.5.2	Entstehung der Vielfalt von T-Zell-Rezeptoren ..	815			
26.6	HLA-Moleküle	815			
26.6.1	Zwei Klassen von HLA-Molekülen	815			
26.6.2	Präsentation zelleigener Peptide durch HLA-Klasse-I-Moleküle	817			

28.3.2	Mineralien	888	30	Entwicklung und Altern	931
28.4	Regulation von Nahrungsaufnahme und Körpergewicht	892	30.1	Grundlegende Prozesse der Entwicklung	932
28.4.1	Energiestoffwechsel	892	30.1.1	Von der Zygote zum Embryo	932
28.4.2	Hormonelle Regulation des Appetits	895	30.2	Zelluläre Grundlagen der Entwicklung	934
28.4.3	Körpergewicht und Körperzusammensetzung	897	30.2.1	Hierarchie der Zellen	934
28.5	Formen der Ernährung	899	30.2.2	Symmetrische und asymmetrische Zellteilung	934
28.5.1	Grundlagen einer gesunden Ernährung	899	30.2.3	Stammzellen und Reprogrammierung	935
28.5.2	Diäten	900	30.3	Signalmoleküle der Embryonalentwicklung	936
29	Nervensystem	903	30.3.1	Zell-Zell- und Zell-Matrix-Kommunikation	936
29.1	Die Zellen des Nervensystems	904	30.3.2	Musterbildung durch Morphogengradienten	937
29.1.1	Nervenzellen	904	30.3.3	Achsen und Rechts-links-Asymmetrie	938
29.1.2	Gliazellen	904	30.4	Organogenese	938
29.2	Stoffwechsel des Nervensystems	904	30.4.1	Segmentierung	938
29.2.1	Energiestoffwechsel	904	30.4.2	Musterbildung entlang den Körperachsen	939
29.2.2	Blut-Hirn-Schranke	904	30.4.3	Musterbildung im ZNS	941
29.2.3	Liquor cerebrospinalis	905	30.4.4	Muskelentwicklung	942
29.3	Neuronale Erregung	905	30.4.5	Hypoxie und Angiogenese	943
29.3.1	Aufbau der Membranspannung	905	30.5	Reaktivierung embryonaler Prozesse	944
29.3.2	Spannungsaktivierte Ionenkanäle	906	30.5.1	Regeneration	945
29.3.3	Das Aktionspotenzial	910	30.5.2	EMT und MET	945
29.4	Synaptische Übertragung	912	30.6	Alterung	946
29.4.1	Synapsen	912	30.6.1	Molekulare Phänomene des Alterns	947
29.4.2	Synaptische Transmission	913	30.6.2	Strategien für ein langes Leben?	948
29.4.3	Neurotransmitter und ihre Rezeptoren	914		Themen des IMPP-Gegenstandskatalogs	951
29.5	Sinneswahrnehmung	921		Quellen	955
29.5.1	Sehen	921		Register	957
29.5.2	Geschmack	925			
29.5.3	Geruch	927			