

Biochemie des Menschen

Das Lehrbuch für das Medizinstudium

Florian Horn

unter Mitarbeit von

Franziska Blaeschke

Katharina Trugenberger

Matthias Gröll

Carina Polzer

Katharina Lechner

Jacqueline Moltzau Anderson

Mitarbeiter früherer Auflagen

Isabelle Nath

Nadine Schneider

Bettina Otte

Paul Ziegler

Marco Armbruster

Daniel Koch

Michael Pritsch

Simone Harrasser

Christian Grillhösl

Silke Berghold

Jan Nassrallah

Laura Nassrallah

8., überarbeitete und erweiterte Auflage

1213 Abbildungen

Georg Thieme Verlag

Stuttgart • New York

Auf einen Blick

I Grundlagen der Chemie

24

1	Allgemeine Chemie	26
2	Kohlenhydrate	42
3	Lipide	52
4	Aminosäuren und Proteine	61
5	Nukleotide und Nucleinsäuren	74

II Energie

84

6	Enzyme	86
7	Stoffwechsel der Kohlenhydrate	107
8	Stoffwechsel der Lipide	157
9	Stoffwechsel der Proteine und Aminosäuren	207
10	Herkunft des ATP	238

III Molekularbiologie

280

11	Genom – Transkriptom – Proteom	282
12	Evolution und Medizin	301
13	Zellzyklus und Apoptose	320
14	Stoffwechsel der Nukleotide	338
15	Expression proteinogener Gene	352
16	Regulation der Genexpression	371
17	Replikation, Schäden und Reparatur	377
18	Genetik der Bakterien und Viren	389

IV Hormone

414

19	Die Grundlagen	416
20	Molekulare Hormonwirkung	426
21	Energieversorgung	435
22	Gastrointestinale Hormone	473
23	Wasser, Elektrolyte und Mineralstoffe	477
24	Wachstum und Fortpflanzung	499
25	Mediatoren	517
26	Neurotransmitter	531

V Von der Zelle zum Organismus

552

27	Zellbiologie	554
28	Extrazellulärsubstanz – was zwischen den Zellen ist	576
29	Die Stoffaufnahme	584
30	Das Blut	606
31	Die Nieren	677
32	Der Säure-Basen-Haushalt	691
33	Das Immunsystem	700
34	Die Leber	728
35	Die Muskulatur	754

Inhaltsverzeichnis

I Grundlagen der Chemie

1	Allgemeine Chemie	26			
	<i>Florian Horn</i>				
1.1	Die chemische Bindung	26	1.2.2	Wichtige schwefelhaltige funktionelle Gruppen	35
1.1.1	Freie Elektronen und freie Elektronen-paare	26	1.2.3	Wichtige stickstoffhaltige funktionelle Gruppen	35
1.1.2	Die Oktettregel	27	1.3	Reaktionen einer menschlichen Zelle ..	36
1.1.3	Die Elektronegativität	29	1.3.1	Die Grundreaktionstypen	36
1.1.4	Starke Bindungen – Hauptvalenzen	29	1.3.2	Die Rolle der Säure-Basen-Reaktionen ...	38
1.1.5	Koordinative Bindungen	30	1.4	Isomeren – einmal ganz in Ruhe	38
1.1.6	Schwache Bindungen – Nebervalenzen ...	31	1.4.1	Konstitutionsisomerie	38
1.2	Funktionelle Gruppen und ihre Reaktionen	32	1.4.2	Stereoisomerie	38
1.2.1	Wichtige sauerstoffhaltige funktionelle Gruppen	33	1.5	Mesomerie	41
2	Kohlenhydrate	42			
	<i>Florian Horn</i>				
2.1	Was sind Kohlenhydrate?	42	2.3	Disaccharide	48
2.2	Monosaccharide	43	2.3.1	Maltose und Isomaltose – Malzzucker ...	49
2.2.1	Hexosen – die 6er-Zucker	43	2.3.2	Laktose – Milchzucker	50
2.2.2	Pentosen – die 5er-Zucker	46	2.3.3	Saccharose – Haushaltszucker	50
2.2.3	Reaktionen der Monosaccharide	46	2.4	Oligosaccharide	50
2.2.4	Nachweismethoden	47	2.5	Polysaccharide	50
			2.5.1	Homoglykane	50
			2.5.2	Heteroglykane	51
3	Lipide	52			
	<i>Florian Horn</i>				
3.1	Chemie und Systematik der Lipide	52	3.3	Glycerin-Derivate	55
3.1.1	Amphiphile Lipide	52	3.3.1	Triacylglycerine (TAG) – das klassische Fett	55
3.1.2	Systematik der Lipide	53	3.3.2	Glycerophosphatide – Membranfett	56
3.2	Fettsäuren	53	3.4	Sphingosin-Derivate	57
3.2.1	Gesättigte und ungesättigte Fettsäuren ...	54	3.4.1	Sphingosinphosphatide	58
3.2.2	Geradzahlige und ungeradzahlige Fettsäuren	55	3.4.2	Glykolipide	58
3.2.3	Essenzielle Fettsäuren	55	3.5	Isopren-Derivate	58
			3.5.1	Was ist eigentlich Isopren?	59

4	Aminosäuren und Proteine				61
	<i>Isabelle Nath* und Florian Horn</i>				
4.1	Aminosäuren	61	4.2	Peptide und Proteine	68
4.1.1	Die 21 proteinogenen Aminosäuren.	61	4.2.1	Die Peptidbindung	68
4.1.2	Nicht proteinogene Aminosäuren.	65	4.2.2	Auf- und Abbau der Proteine	69
4.1.3	Eigenschaften der Aminosäuren	65	4.2.3	Benennung der Peptide	69
4.1.4	Reaktionen der Aminosäuren	67	4.2.4	Räumliche Anordnung von Proteinen	69
			4.2.5	Denaturieren und Fällern	71
			4.2.6	Auftrennung von Proteinen – die Elektrophorese	72
			4.2.7	Funktionen der Proteine im Körper	72
			4.2.8	Prionen	73
5	Nukleotide und Nucleinsäuren				74
	<i>Florian Horn</i>				
5.1	Chemie der Nucleotide	74	5.2	Nucleinsäuren	77
5.1.1	Die Basen	74	5.2.1	Ribose und Phosphat – für den Zusammenhalt	77
5.1.2	Nucleoside (Base + Zucker)	75	5.2.2	Die Basen – Träger der Information	78
5.1.3	Nucleotide (Nucleosid + Phosphat)	76	5.2.3	Die DNA-Doppelhelix	79
5.1.4	Weitere Funktionen der Nucleotide	76			
II Energie					
6	Enzyme				86
	<i>Marco Armbruster*</i>				
6.1	Energetik einer chemischen Reaktion .	86	6.3	Kinetik einer chemischen Reaktion	93
6.1.1	Thermodynamische Systeme und Zustände	86	6.3.1	Reaktionsordnungen	94
6.1.2	Thermodynamische Potentiale	87	6.3.2	Michaelis-Menten-Kinetik	95
6.1.3	Entropie S	87	6.4	Enzymklassen	96
6.1.4	Enthalpie H	87	6.4.1	Die Grundtypen von Reaktionen	96
6.1.5	Freie Enthalpie G	88	6.4.2	Oxidoreduktasen (Klasse I)	96
6.1.6	Theorie des Übergangszustandes	89	6.4.3	Transferasen (Klasse II)	97
6.1.7	Reaktionsmodell	90	6.4.4	Hydrolasen (Klasse III)	97
6.2	Funktionsweise und Aufbau von Enzymen	90	6.4.5	Lyasen (Klasse IV)	98
6.2.1	Funktionsprinzip	90	6.4.6	Isomerasen (Klasse V)	98
6.2.2	Aktives Zentrum	91	6.4.7	Ligasen (Klasse VI)	98
6.2.3	Kovalente Katalyse	91	6.5	Enzymregulation	99
6.2.4	Allgemeine Säure-Base-Katalyse	92	6.5.1	Enzymhemmung und Enzymaktivierung .	99
6.2.5	Räumliche Annäherung	92	6.5.2	Kovalente Modifikation und Interkonvertierung	101
6.2.6	Cofaktoren	92	6.5.3	Zymogene	102
6.2.7	Multifunktionale Enzyme	93	6.5.4	Isoenzyme	102
			6.5.5	Katalytische Potenz	103

*Mitarbeiter früherer Auflagen, von deren ursprünglichen Beiträgen in der Neuauflage noch wesentliche Bestandteile enthalten sind.

6.6	Evolution der Enzyme	104	6.6.3	Wie evolvieren Enzyme?	104
	<i>Florian Horn</i>		6.6.4	Was kann sich verändern?	105
6.6.1	Ursprung der nicht enzymatischen Katalyse	104	6.6.5	Promiskuitive Enzyme	105
6.6.2	Enzyme ‚erobern‘ die Welt	104	6.6.6	Gerichtete Evolution	106
7	Stoffwechsel der Kohlenhydrate				
	<i>Florian Horn</i>				
7.1	Überblick	107	7.5.3	Substrate des Zuckeraufbaus	133
7.1.1	Reaktionswege der Kohlenhydrate	107	7.5.4	Die Glukoneogenese und ihre 3 Kompartimente in der Zelle	135
7.1.2	Die Wege des Glukose-6-Phosphats	108	7.5.5	Energiebilanz – oder was kostet Glukose?	136
7.1.3	Versorgung unserer Zellen mit Glukose	109	7.5.6	Regulation der Glukoneogenese	136
7.2	Die Glykolyse	110	7.6	Das Vitamin Biotin	137
7.2.1	Vorbereitungsphase – von Glukose zu Glycerol-3-Phosphat	112	7.6.1	Chemie des Biotins	137
7.2.2	Die Phase der Energieerzeugung – von Glycerol-3-Phosphat zu Pyruvat	114	7.6.2	Die Aufnahme von Biotin	137
7.2.3	Wie NADH/H ⁺ zur Atmungskette gelangt	116	7.6.3	Molekularer Mechanismus	137
7.2.4	Regulation der Glykolyse oder die Frage nach der Geschwindigkeit	116	7.6.4	Aufgaben von Biotin	138
			7.6.5	Biotin und Avidin	138
7.3	Schicksal des Pyruvats: PDH oder LDH	119	7.7	Der Glykogen-Stoffwechsel	138
7.3.1	Aerober Abbau – Pyruvat-Dehydrogenase	120	7.7.1	Welche Organe besitzen Glykogen-Vorräte?	140
7.3.2	Vitamin B ₁ (Thiamin)	122	7.7.2	Glykogen-Struktur	140
7.3.3	Anaerober Abbau – Laktat-Dehydrogenase	122	7.7.3	Glykogen-Biosynthese	140
7.3.4	Energiegewinn mit und ohne Sauerstoff – ein Ausblick	124	7.7.4	Glykogen-Abbau	143
			7.7.5	Regulation des Glykogen-Stoffwechsels	144
7.4	Der Pentosephosphatweg	125	7.8	Andere Monosaccharide	146
7.4.1	Teil 1 – oxidativ und irreversibel	126	7.8.1	Fruktose	146
7.4.2	Teil 2 – nicht-oxidativ und reversibel	127	7.8.2	Galaktose	148
7.4.3	Aufgaben des NADPH/H ⁺	127	7.8.3	Mannose	149
7.4.4	Aufgaben der Ribose	128	7.8.4	Aminozucker	150
7.4.5	Regulation des Pentosephosphatweges	128	7.9	Das Disaccharid Laktose und die Evolution der Brustdrüse	151
7.5	Die Glukoneogenese	129	7.9.1	Die Evolution der Brustdrüse	152
7.5.1	Welche Organe betreiben Glukoneogenese?	131	7.9.2	Biosynthese von Milchzucker (Laktose)	153
7.5.2	Umgehung der 3 irreversiblen Reaktionen der Glykolyse	131	7.9.3	Wasser	154
			7.9.4	Milchproteine und Milchfett-Kügelchen	154
			7.9.5	Laktose nach der Säuglingsphase	155

8	Stoffwechsel der Lipide	157			
	<i>Florian Horn</i>				
8.1	Einleitung	157	8.6	Cholesterin	185
8.1.1	Überblick über die stoffwechselrelevanten Lipide	157	8.6.1	Cholesterin-Biosynthese	187
8.1.2	Was können unsere Zellen mit Lipiden anfangen?	158	8.6.2	Veresterung von Cholesterin	188
8.1.3	Vom Teller bis in unsere Zellen	160	8.6.3	Verwendung von Cholesterin	189
8.1.4	Regulation des Lipidstoffwechsels	161	8.7	Der Lipoproteinstoffwechsel	190
8.2	Fettsäureabbau	161		<i>Simone Harrasser*</i>	
8.2.1	Aktivierung der Fettsäuren	163	8.7.1	Überblick	190
8.2.2	Transport der Fettsäuren ins Mitochondrium	163	8.7.2	Was transportieren Lipoproteine?	192
8.2.3	Die β -Oxidation	164	8.7.3	Die Apoproteine	192
8.2.4	Abbau anderer Fettsäuren	166	8.7.4	Weg der Nahrungsfette – die Chylomikronen	193
8.2.5	Regulation der β -Oxidation	168	8.7.5	Die Verteilung der Fette – die VLDL	194
8.2.6	Fettsäure-Oxidation in den Peroxisomen	168	8.7.6	Das Cholesterinreservoir LDL	194
8.3	Fettsäure-Biosynthese	168	8.7.7	Der reverse Cholesterintransport – das HDL	195
8.3.1	Biosynthese der Palmitinsäure	170	8.8	Noch ein paar andere Lipide	197
8.3.2	Biosynthese längerer Fettsäuren	175	8.8.1	Phospholipide	197
8.3.3	Biosynthese ungesättigter Fettsäuren	175	8.8.2	Glykolipide	200
8.3.4	Regulation der Fettsäure-Biosynthese	175	8.9	Vitamin A	201
8.4	Triacylglycerine (TAGs)	176	8.9.1	Was ist Vitamin A?	201
8.4.1	Lipogenese – die TAG-Biosynthese	178	8.9.2	Stoffwechsel des Vitamins A	202
8.4.2	Lipolyse – der TAG-Abbau	180	8.9.3	Direkte Wirkungen des β -Carotins	202
8.4.3	Regulation des TAG-Stoffwechsels	181	8.9.4	Retinsäure und Zellwachstum	203
8.5	Ketonkörper	181	8.9.5	Retinal und der Sehvorgang	203
8.5.1	Biosynthese der Ketonkörper	183	8.9.6	Zu viel und zu wenig Vitamin A	205
8.5.2	Abbau der Ketonkörper	184	8.10	Das Melatonin	205
8.5.3	Zu viele Ketonkörper sind gar nicht gut	185	8.10.1	Biosynthese des Melatonins	205
			8.10.2	Molekulare und physiologische Wirkungen	205
			8.10.3	Wege des Melatonins im Körper und dessen Abbau	206
9	Stoffwechsel der Proteine und Aminosäuren	207			
	<i>Florian Horn</i>				
9.1	Die Proteinbiosynthese	207	9.2.2	Glykosylierungen	209
9.1.1	Translation	207	9.2.3	Weitere posttranslationale Modifikationsmöglichkeiten	212
9.1.2	Sortierung von Proteinen	207	9.3	Der Proteinabbau	212
9.2	Posttranslationale Prozessierung	209	9.3.1	Proteasomen und Ubiquitin	213
9.2.1	Herstellung der nativen Proteinform (Proteinfaltung)	209	9.3.2	Lysosomaler Abbau	213

9.4	Strategien des Aminosäurestoffwechsels	214	9.8.4	Abbau von Phenylalanin und Tyrosin.....	224
9.4.1	Die wichtigsten Aminosäuren und deren Verwandte	214	9.8.5	Sammelbecken Pyruvat	225
9.4.2	Wie reagieren Aminosäuren?	214	9.8.6	Der Rest und der große Überblick.....	225
9.5	Vitamin B₆	217	9.9	Tetrahydrobiopterin (BH₄)	226
9.6	Die Rolle der verschiedenen Organe ...	218	9.10	Der Harnstoffzyklus	227
9.6.1	Die Zelle am kleinen Zeh	218	9.10.1	Die Stickstoffentsorgung	228
9.6.2	Die Muskulatur und Aminosäuren	218	9.10.2	Herkunft der beiden Stickstoffe	229
9.6.3	Die Leber und Aminosäuren	219	9.10.3	Die Schrittmacherreaktion	229
9.7	Biosynthese der Aminosäuren	220	9.10.4	Die Harnstoffbildung	230
9.7.1	Einfache Biosynthese aus den α -Ketosäuren.....	220	9.10.5	Bilanz der Harnstoff-Biosynthese	231
9.7.2	Biosynthese der 2 Amide Glutamin und Asparagin	221	9.10.6	Regulation der Harnstoff-Biosynthese	231
9.7.3	Biosynthese von Prolin, Serin und Glycin .	222	9.10.7	Glutamin-Biosynthese in der Leber	231
9.7.4	Biosynthese der nicht ganz essenziellen Aminosäuren	222	9.10.8	Weitere Stoffwechsellleistungen des Harnstoffzyklus	231
9.7.5	Essenzielle Aminosäuren	223	9.11	Aminosäuren als Gruppenspender	233
9.8	Abbau von Aminosäuren	223	9.11.1	Glutamin und Aspartat als Amino-Spender.....	233
9.8.1	Sammelbecken Oxalacetat	224	9.11.2	Cystein und PAPS.....	233
9.8.2	Sammelbecken α -Ketosäure	224	9.11.3	Methionin und SAM	233
9.8.3	Sammelbecken Succinyl-CoA.....	224	9.11.4	Homocystein	234
10	Herkunft des ATP	238	9.12	Biogene Amine	236
	<i>Florian Horn</i>		9.12.1	Synthese und Abbau biogener Amine	236
10.1	Evolution des Stoffwechsels	238	9.12.2	Einzelne biogene Amine.....	237
10.1.1	Chemie (noch ohne Leben)	239	10.3.5	Regulation des Citratzyklus	255
10.1.2	Anfänge ohne Sauerstoff	240	10.3.6	Zwischenbilanz	255
10.1.3	Sauerstoff erscheint auf der Weltbühne..	243	10.4	Die Reduktionsäquivalente – NADH und seine Kollegen	256
10.1.4	Leben mit Sauerstoff.....	244	10.4.1	NAD ⁺ und FAD für den katabolen Stoffwechsel.....	257
10.2	Was ist denn jetzt Acetyl-CoA?	245	10.4.2	Das Vitamin Niacin und NADH	257
10.2.1	Wie sieht Acetyl-CoA aus?	245	10.4.3	Das Vitamin Riboflavin und FADH	259
10.2.2	Wobei entsteht Acetyl-CoA?	245	10.4.4	NADPH – für den anabolen Stoffwechsel..	260
10.2.3	Was kann man mit Acetyl-CoA anfangen?	246	10.4.5	Wo wir schon dabei sind – die 3 restlichen Redox-Coenzyme	261
10.2.4	Das Vitamin Pantothersäure.....	247	10.4.6	Wo entstehen die Reduktionsäquivalente in der Zelle?	261
10.3	Der Citratzyklus	248	10.5	Die Atmungskette	262
10.3.1	Worum geht es beim Citratzyklus?.....	249	10.5.1	Prinzip der Atmungskette	262
10.3.2	Reaktionen des Citratzyklus	249	10.5.2	Chemie und Physik der Atmungskette....	264
10.3.3	Anabole Funktionen – was der Citratzyklus noch alles kann	252	10.5.3	Elektronen, Protonen und der Wasserstoff	266
10.3.4	Anaplerotische Reaktionen – wie der Citratzyklus wieder aufgefüllt wird	254	10.5.4	Arbeitsweise der Atmungskette	267

10.5.5	Die ATP-Produktion	271	10.6	Was ist eigentlich ATP?	276
10.5.6	Transporte durch die Mitochondrien- membran	272	10.6.1	Wie sieht ATP aus?	276
10.5.7	Regulation der Atmungskette	273	10.6.2	ATP-Hydrolyse.....	276
10.5.8	Bilanz des gesamten aeroben Abbaus	273	10.6.3	Andere Phosphatspender.....	278
10.5.9	AMP und die anderen Nukleotide.....	274	10.6.4	ΔG^0 und das wahre ΔG	278
10.5.10	Entkoppler und Hemmstoffe der Atmungskette.....	274	10.6.5	Aufgaben von ATP	278
			10.6.6	Die 4 anderen Nukleotide	279

III Molekularbiologie

11 Genom – Transkriptom – Proteom

Florian Horn

11.1	Das menschliche Genom	282	11.3	Gene und Allele	289
11.1.1	Was steht alles auf der DNA?.....	282	11.3.1	Was sind Gene?	289
11.1.2	Proteincodierende Gene.....	283	11.3.2	Grundstruktur eines Gens	290
11.1.3	Nicht proteincodierende RNA-Gene.....	283	11.3.3	Allele und Polymorphismen	290
11.1.4	„Springende Gene“ (Transposons).....	283	11.3.4	Mitochondrien-Gene	290
11.2	Chromatin und Chromosomen	287	11.4	RNA	291
11.2.1	Das Chromatin.....	287	11.4.1	Das menschliche Transkriptom.....	291
11.2.2	Histone und Nukleosomen – die erste Stufe	287	11.4.2	Die direkt proteinrelevanten RNAs: mRNA, rRNA, tRNA.....	292
11.2.3	30-nm-Chromatinfaser – die zweite Stufe.	288	11.4.3	Kleine Zellkern- und zytoplasmatische RNAs	292
11.2.4	Chromosomen – die dritte Stufe.....	288	11.4.4	Regulatorische RNAs.....	293
11.2.5	Organisation des Chromosomensatzes ...	289	11.4.5	RNA-Interferenz in Forschung und Klinik .	300

12 Evolution und Medizin.....

Florian Horn

12.1	Was ist Evolution?	301	12.3	Die Anfänge des Lebens	307
	<i>Jacqueline Moltzau Anderson und Florian Horn</i>		12.3.1	Erdinneres oder die Sonne.....	307
12.1.1	Die Rolle der Umwelt	302	12.3.2	Erstes Leben	307
12.1.2	Variation und Selektion	302	12.3.3	Bedeutung des Sauerstoffs.....	307
12.1.3	Sex.....	302	12.3.4	... und embryonal.....	308
12.1.4	Energiestoffwechsel und Ressourcen- optimierung.....	302	12.4	Die Entwicklung des Menschen	308
12.2	Wie funktioniert Evolution?	303	12.4.1	Einführung eines Zeitstrahls in die Medizin.....	309
12.2.1	Evolutionsfaktoren	303	12.4.2	Das Ediacarium	311
12.2.2	Punktuelle Veränderungen	304	12.4.3	Kiefernfünder und Landgang.....	313
12.2.3	Genduplikationen	304	12.4.4	Amnioten und ihre Aufspaltung.....	314
12.2.4	Entstehung neuer Arten.....	307	12.4.5	Entwicklung der Säugetiere.....	315
			12.4.6	Der Mensch	317
			12.5	„Evolutionäre Medizin“	318
			12.5.1	Der gesunde Mensch (Vorklinik).....	319
			12.5.2	Krankheiten evolutionär betrachtet.....	319

13	Zellzyklus und Apoptose	320		
	<i>Florian Horn</i>			
13.1	Interphase des Zellzyklus	320	13.3.3	Ablauf eines kontrollierten Zellzyklus 328
13.1.1	Die G ₁ -Phase	321	13.3.4	Inhibitoren der CDKs
13.1.2	Die S-Phase	321	13.3.5	Das RB-Protein – Zentrum der Zellzykluskontrolle
13.1.3	Die G ₂ -Phase	322	13.3.6	Das P53-Protein – Wächter des Genoms ..
13.2	Mitose und Zellteilung	322	13.3.7	Was hat der Zellzyklus mit Tumoren zu tun?
13.2.1	Die Mitose	322	13.4	Apoptose – der programmierte Zelltod 334
13.2.2	Die Zellteilung – Zytokinese	323	13.4.1	Induktion der Apoptose
13.3	Regulation des Zellwachstums	324	13.4.2	Am Apoptosevorgang Beteiligte
13.3.1	Wachstumsfaktoren	324	13.4.3	Zellveränderungen in der Apoptose
13.3.2	Von den Wachstumsfaktoren zur Zellteilung	327		
14	Stoffwechsel der Nukleotide	338		
	<i>Florian Horn</i>			
14.1	Biosynthese der Nukleotide	338	14.2.5	Regeneration der THF in den Zellen
14.1.1	PRPP-Biosynthese	338	14.2.6	Aufgaben der Folsäure
14.1.2	Purinnukleotid-Biosynthese	339	14.2.7	Bedarf an Folsäure
14.1.3	Pyrimidinnukleotid-Biosynthese	342	14.2.8	Weitere C ₁ -Gruppen-Überträger
14.1.4	Desoxyribonukleotid-Biosynthese	344	14.3	Abbau der Nukleotide
14.2	Das Vitamin Folsäure	344	14.3.1	DNasen und RNasen
14.2.1	Chemie der Folsäure	344	14.3.2	Abbau der Purinnukleotide
14.2.2	Der Hydrierungsstatus der Folsäure	345	14.3.3	Harnsäure in der Evolution
14.2.3	Aufnahme und Transport im Blut	345	14.3.4	Abbau der Pyrimidinnukleotide
14.2.4	Der C ₁ -Status der Folsäure	346		
15	Expression proteinogener Gene	352		
15.1	Transkription der proteinrelevanten RNAs	353	15.3	Nukleozytoplasmatischer Transport ... 363
	<i>Florian Horn und Silke Berghold*</i>			<i>Florian Horn</i>
15.1.1	Ablauf der Transkription	353	15.3.1	Der Zellkern und das Zytoplasma
15.1.2	Eigenschaften der proteinrelevanten RNAs	355	15.3.2	Kernimport
15.2	mRNA-Prozessierung	359	15.3.3	Kernexport
	<i>Florian Horn und Silke Berghold*</i>		15.3.4	Transport der mRNA über weitere Strecken
15.2.1	Was bei jeder mRNA prozessiert wird	359	15.4	Translation und die Proteinbiosynthese 365
15.2.2	Besondere Prozessierungsvorgänge	362		<i>Christian Grillhösl* und Florian Horn</i>
			15.4.1	Aktivierung der Aminosäuren
			15.4.2	Translationsinitiation – Zusammenbau der Ribosomen
			15.4.3	Translationselongation
			15.4.4	Translationstermination

16	Regulation der Genexpression	371			
16.1	Differenzielle Genexpression im Menschen	371			
	<i>Florian Horn</i>				
16.1.1	Zeit- und ortsabhängige Regulation	371	16.2.3	Die Epigenetik	373
16.1.2	Ebenen der Regulation in unseren Zellen .	371		<i>Bettina Otte*</i>	
16.2	Transkriptionelle Regulation	371	16.2.4	DNA-Steuerelemente	373
	<i>Florian Horn</i>		16.2.5	DNA-bindende Proteine – die Transkriptionsfaktoren.	375
16.2.1	Chromatin und die Transkription	372	16.3	Posttranskriptionelle Regulation	376
16.2.2	DNA-Methylierung	372		<i>Florian Horn und Bettina Otte*</i>	
17	Replikation, Schäden und Reparatur	377	16.4	Translationale Regulation	376
	<i>Florian Horn</i>			<i>Florian Horn</i>	
17.1	DNA-Replikation	377	17.3	DNA-Schäden und ihre Reparatur	382
17.1.1	Replikation auf Chromosomenebene	377	17.3.1	DNA-Schäden – wie Fehler entstehen können	382
17.1.2	Replikation auf molekularer Ebene	377	17.3.2	Reparaturmechanismen – oder wie der Körper die Fehler wieder ausbügelt	384
17.1.3	Die DNA-Polymerasen	379	17.3.3	Mögliche Folgen von DNA-Schäden – wenn die Reparatur versagt hat	387
17.1.4	Telomerasen und der Traum von der ewigen Jugend	380			
17.2	DNA-Sequenzierung	381			
	<i>Paul Ziegler*</i>				
17.2.1	Sequenzierung in der Medizin	381			
18	Genetik der Bakterien und Viren	389			
18.1	Bakterien	389	18.4	Das Humane Immundefizienz-Virus (HIV)	401
	<i>Florian Horn</i>			<i>Florian Horn</i>	
18.1.1	Was sind Bakterien?	389	18.4.1	Was ist HIV?	401
18.1.2	Genetik der Bakterien	391	18.4.2	Was macht das HI-Virus?	402
18.1.3	Grundlagen der Antibiotika-Therapie	392	18.4.3	Was bedeutet das für den Menschen?	404
18.2	Die Genschere CRISPR/Cas	394	18.4.4	Virustatika	406
	<i>Florian Horn und Franziska Blaeschke</i>		18.5	Viren in der Gentherapie	406
18.2.1	Teil des bakteriellen Immunsystems	395		<i>Florian Horn</i>	
18.2.2	Meilenstein für die Forschung	398	18.5.1	Molekularbiologische Grundlagen	406
18.2.3	Therapeutische Anwendungen	399	18.5.2	Herstellung rekombinanter Viren	408
18.3	Viren	399	18.6	PCR: Polymerase-Kettenreaktion	409
	<i>Florian Horn</i>			<i>Daniel Koch*</i>	
18.3.1	Woraus besteht ein Virus?	400	18.6.1	Ablauf der PCR	410
18.3.2	Vermehrungszyklus eines Virus	401	18.6.2	Besonderheiten	411
			18.6.3	Varianten und Anwendungen	411

IV Hormone

19	Die Grundlagen	416			
	<i>Florian Horn</i>				
19.1	Die verschiedenen Botenstoffe	416	19.4	Ein wenig Chemie der Hormone	420
19.1.1	Klassische Hormone.....	416	19.4.1	Peptidhormone.....	420
19.1.2	Gewebshormone.....	416	19.4.2	Steroidhormone.....	421
19.1.3	Mediatoren.....	416	19.4.3	Aminosäure-Derivate.....	421
19.1.4	Interleukine.....	417	19.4.4	Eikosanoide und Retinsäure.....	421
19.1.5	Neurotransmitter.....	417	19.4.5	Hormone im Gleichgewicht.....	422
19.2	Die Hormonrezeptoren	417	19.5	Hormone in unserem Körper	422
19.2.1	Vier verschiedene Rezeptoren.....	417	19.5.1	Hormonbildungsorte.....	422
19.2.2	Die Rezeptorverteilung.....	418	19.5.2	Die Nebennieren.....	423
19.2.3	Signaltransduktion.....	419	19.5.3	Das Hypothalamus-Hypophysen-System..	423
19.3	Hormone und der Stoffwechsel	419		<i>Jan Nassrallah*, Laura Nassrallah* und Florian Horn</i>	
19.3.1	Regulation des Stoffwechsels.....	419			
20	Molekulare Hormonwirkung	426			
	<i>Florian Horn</i>				
20.1	Typ-I-Rezeptoren (Enzyme)	426	20.3.3	Die durch G-Proteine aktivierbaren Enzyme.....	428
20.1.1	Tyrosinkinase.....	426	20.3.4	Die Adenylatzyklase und cAMP.....	429
20.1.2	Die Guanylatzyklase.....	427	20.3.5	Die Phospholipase C.....	430
20.2	Typ-II-Rezeptoren (Ionenkanäle)	427	20.4	Intrazelluläre Rezeptoren	432
20.2.1	Membranständige Ionenkanäle.....	427	20.4.1	Aktivierung des Rezeptors.....	432
20.2.2	Intrazelluläre membranständige Ionenkanäle.....	427	20.4.2	Interaktion mit der DNA.....	433
20.3	Typ-III-Rezeptoren (G-Protein-gekoppelt)	428	20.4.3	Hormone mit intrazellulären Rezeptoren..	433
20.3.1	Die Rezeptoren.....	428	20.5	Zytokinrezeptoren	433
20.3.2	Die G-Proteine.....	428		<i>Nadine Schneider* und Florian Horn</i>	
			20.5.1	Die Janus-Kinasen (JAKs).....	433
			20.5.2	Die Signaltransduktion.....	434
21	Energieversorgung	435			
21.1	Der Energiestoffwechsel	435	21.2	Insulin und die Evolution des Pankreas'	437
	<i>Isabelle Nath* und Florian Horn</i>			<i>Florian Horn</i>	
21.1.1	Die Resorptionsphase.....	435	21.2.1	Evolutionäre Hintergründe.....	437
21.1.2	Die Postresorptionsphase.....	435	21.2.2	Biosynthese des Insulins.....	439
21.1.3	Die Schlüsselenzyme des Stoffwechsels...	436	21.2.3	Molekulare Wirkungen von Insulin.....	440
			21.2.4	Physiologische Wirkungen von Insulin...	442
			21.2.5	Steuerung der Insulinsekretion.....	445
			21.2.6	Wege des Insulins im Körper und Abbau..	446

21.3	Glukagon	448	21.5	Glukokortikoide	456
	<i>Isabelle Nath* und Florian Horn</i>			<i>Florian Horn</i>	
21.3.1	Biosynthese des Glukagons	448	21.5.1	Biosynthese der Glukokortikoide	457
21.3.2	Molekulare und physiologische Wirkungen	448	21.5.2	Molekulare Wirkungen der Glukokortikoide	457
21.3.3	Steuerung der Glukagonsekretion	449	21.5.3	Physiologische Wirkungen der Glukokortikoide	457
21.3.4	Wege des Glukagons im Körper	449	21.5.4	Steuerung der Glukokortikoidsekretion...	460
21.3.5	Abbau des Glukagons	449	21.5.5	Abbau der Glukokortikoide	460
21.4	Adrenalin und die Evolution des Nebennierenmarks	449	21.5.6	Regelkreis der Glukokortikoide	460
	<i>Katharina Trugenbergger</i>		21.5.7	Proopiomelanokortin (POMC)	462
21.4.1	Evolution des Nebennierenmarks	450	21.5.8	Wege der Glukokortikoide im Körper	462
21.4.2	Biosynthese des Adrenalins	450	21.6	Schilddrüsenhormone	463
21.4.3	Molekulare Wirkungen von Adrenalin. ...	451		<i>Florian Horn</i>	
21.4.4	Physiologische Wirkungen von Adrenalin.	452	21.6.1	Jod und die Evolution der Schilddrüse ...	464
21.4.5	Wirkungen von Noradrenalin	454	21.6.2	Biosynthese der Schilddrüsenhormone...	465
21.4.6	Steuerung der Biosynthese, Speicherung und Sekretion der Katecholamine	454	21.6.3	Molekulare Mechanismen der Hormon- wirkung	467
21.4.7	Wege des Adrenalins	455	21.6.4	Physiologische Wirkungen der Schilddrüsenhormone	470
21.4.8	Abbau des Adrenalins	455	21.6.5	Regelkreis der Schilddrüsenhormone	470
			21.6.6	Wege der Beteiligten im Körper	471
22	Gastrointestinale Hormone	473			
	<i>Florian Horn</i>				
22.1	Regulation der Magensaftmenge	473	22.2	Regulation der Pankreas- und Gallensekretion	475
22.1.1	Gastrin	473	22.2.1	Sekretin	475
22.1.2	Histamin	474	22.2.2	Cholezystokinin	475
22.1.3	Somatostatin	474	22.2.3	GIP (Glukose-induziertes insulinotropes Polypeptid)	476
22.1.4	VIP (vasoaktives intestinales Peptid)	474	22.3	Sonstige intestinale Hormone	476
23	Wasser, Elektrolyte und Mineralstoffe	477			
	<i>Florian Horn</i>				
23.1	Natrium, Kalium und Wasser	477	23.2	Calcium und Phosphat	485
23.1.1	Der Wasser- und Elektrolythaushalt	477	23.2.1	Evolutionäre Herausforderungen	486
23.1.2	Atriopeptin	478	23.2.2	Calcitriol	489
23.1.3	Angiotensin II und das RAAS	479	23.2.3	Parathormon	493
23.1.4	Aldosteron	481	23.2.4	FGF23 und Klotho	496
23.1.5	Adiuretin	483	23.2.5	Calcitonin und Procalcitonin	498

24	Wachstum und Fortpflanzung	499		
24.1	Somatotropin und IGFs	499	24.3.3	Regelkreis der Östrogene und Gestagene – die Gonadotropine
	<i>Florian Horn</i>			512
24.1.1	Evolutionsgeschichte(n)	499	24.3.4	Wege der Östrogene und Gestagene im Körper
24.1.2	Somatotropin	500		512
24.1.3	Die IGFs und ihre Bindeproteine	504	24.3.5	Abbau der Östrogene und Gestagene
			24.3.6	Der weibliche Zyklus
				513
24.2	Androgene – die männlichen Sexualhormone	508	24.4	Prolaktin
	<i>Christian Grillhösl*</i>			514
24.2.1	Biosynthese der Androgene	508	24.4.1	Biosynthese des Prolaktins
24.2.2	Molekulare und physiologische Wirkungen	509	24.4.2	Molekulare und physiologische Wirkungen
24.2.3	Regelkreis der Androgene – die Gonadotropine	509	24.4.3	Wege des Prolaktins im Körper
24.2.4	Wege der Androgene im Körper	510	24.4.4	Abbau des Prolaktins
24.2.5	Abbau der Androgene	510		515
24.3	Östrogene und Gestagene – die weiblichen Sexualhormone	510	24.5	Oxytocin
	<i>Christian Grillhösl*</i>			515
24.3.1	Biosynthese von Östrogenen und Gestagenen	510	24.5.1	Biosynthese des Oxytocins
24.3.2	Molekulare und physiologische Wirkungen	511	24.5.2	Molekulare und physiologische Wirkungen
			24.5.3	Wege des Oxytocins im Körper
			24.5.4	Abbau des Oxytocins
			24.5.5	Oxytocin in der Evolution
				516
25	Mediatoren	517		
	<i>Franziska Blaeschke</i>			
25.1	Eikosanoide	517	25.3.2	Histamin-Rezeptoren
			25.3.3	Wirkungen des Histamins
25.1.1	Prostaglandine und Thromboxane	518	25.3.4	Sekretionsreiz für die Ausschüttung von Histamin
25.1.2	Leukotriene	523		528
25.2	Stickstoffmonoxid (NO)	524	25.3.5	Abbau von Histamin
				528
25.2.1	Biosynthese des NO	524	25.4	Kinine
25.2.2	Wirkungen des Stickstoffmonoxids	525		529
25.2.3	„Abbau“ des NO	526	25.4.1	Biosynthese der Kinine
25.3	Histamin	526	25.4.2	Kinin-Rezeptoren
			25.4.3	Wirkungen der Kinine
25.3.1	Biosynthese des Histamins	526	25.4.4	Sekretionsreiz für die Kinine
			25.4.5	Abbau der Kinine
				530
26	Neurotransmitter	531		
	<i>Matthias Gröll</i>			
26.1	Grundlagen der Neurotransmission ...	531	26.2	Erregende Neurotransmitter
				536
26.1.1	Elektrische Reizweiterleitung	531	26.2.1	Glutamat
26.1.2	Biochemie der Neurotransmitter	533	26.2.2	Acetylcholin
26.1.3	Die Synapsen	533		538
26.1.4	Rezeptoren, Ionenkanäle und G-Proteine ..	534		

26.3	Hemmende Neurotransmitter	541	26.4	Komplex wirkende Neurotransmitter .	543
26.3.1	GABA.....	541	26.4.1	Die Gruppe der Monoamine	543
26.3.2	Glycin	542	26.4.2	Dopamin.....	544
			26.4.3	Noradrenalin	546
			26.4.4	Serotonin	547
			26.4.5	Endogene Opioide.....	549

V Von der Zelle zum Organismus

27	Zellbiologie	554			
	<i>Isabelle Nath* und Florian Horn</i>				
27.1	Die Zellorganellen	554	27.7	Die Ribosomen	567
27.1.1	Zytoplasma und Zytosol.....	554	27.7.1	Aufbau der Ribosomen.....	567
27.1.2	Die Organellen.....	554	27.7.2	Funktion der Ribosomen	567
			27.7.3	Biosynthese der Ribosomen.....	567
27.2	Die Plasmamembran	554	27.8	Das Endoplasmatische Retikulum	567
27.2.1	Aufbau der Plasmamembran.....	554	27.8.1	Das glatte ER	568
27.2.2	Aufgaben der Plasmamembran.....	556	27.8.2	Das raue ER	568
27.2.3	Herkunft der Membranen	556	27.8.3	Herkunft des ER.....	568
27.3	Der Stofftransport	557	27.9	Der Golgi-Apparat	568
27.3.1	Ionen in unseren Zellen	557	27.9.1	Aufbau des Golgi-Apparates	568
27.3.2	Passiver Transport.....	557	27.9.2	Funktion des Golgi-Apparates.....	569
27.3.3	Aktiver Transport	558	27.9.3	Wie entsteht der Golgi-Apparat?	569
27.3.4	Transportproteine.....	559	27.10	Die Lysosomen	569
27.3.5	Zytosevorgänge	559	27.10.1	Aufbau der Lysosomen	569
27.4	Das Zytoskelett	559	27.10.2	Funktionen der Lysosomen	569
27.4.1	Aktinfilamente.....	560	27.10.3	Wo kommen die Lysosomen her?.....	570
27.4.2	Intermediärfilamente.....	560	27.11	Die Peroxisomen	570
27.4.3	Mikrotubuli	561	27.11.1	Aufbau der Peroxisomen	571
27.5	Der Zellkern	564	27.11.2	Aufgabe der Peroxisomen	571
27.5.1	Aufbau des Zellkerns.....	564	27.11.3	Wie vermehren sich Peroxisomen?	571
27.5.2	Aufgaben des Zellkerns.....	564	27.12	Zellverbindungen	571
27.5.3	Der Nukleolus	565		<i>Daniel Koch*</i>	
27.5.4	Vermehrung des Zellkerns – die Mitose... ..	565	27.12.1	Zelladhäsionsmoleküle.....	571
27.6	Die Mitochondrien	565	27.12.2	Zellkontakte.....	574
27.6.1	Aufbau der Mitochondrien.....	565			
27.6.2	Aufgaben der Mitochondrien	565			
27.6.3	Die Endosymbiontentheorie	566			
27.6.4	Vermehrung der Mitochondrien.....	567			

28	Extrazellulärsubstanz – was zwischen den Zellen ist	576			
	<i>Isabelle Nath* und Florian Horn</i>				
28.1	Die Bindegewebszellen	576	28.4	Die Glykoproteine	580
28.2	Die Faserproteine	576	28.4.1	Fibronektin	580
28.2.1	Die Kollagene	576	28.4.2	Laminin	581
28.2.2	Das Elastin	578	28.5	Matrixmetalloproteinasen (MMPs)	581
28.3	Die Glykosaminoglykane	579	28.6	Das Vitamin C	581
28.3.1	Die Hyaluronsäure	579	28.6.1	Zur Evolutionsgeschichte	581
28.3.2	Die anderen Glykosaminoglykane	580	28.6.2	Radikalfänger und Reduktionsmittel	582
			28.6.3	Vitamin-C-abhängige Reaktionen	582
			28.6.4	Aufnahme von Vitamin C	583
			28.6.5	Bedarf an Vitamin C	583
29	Die Stoffaufnahme				584
29.1	Ernährung	584	29.3	Aufnahme der einzelnen Nahrungsbestandteile	596
	<i>Florian Horn und Katharina Lechner</i>			<i>Florian Horn und Katharina Lechner</i>	
29.1.1	Besonderheiten der Proteine	585	29.3.1	Kohlenhydrate	596
29.1.2	Der Energiegehalt der Nahrung	585	29.3.2	Lipide	598
29.1.3	Die essenziellen Nährstoffe	586	29.3.3	Proteine	600
29.2	Unser Verdauungstrakt	587	29.3.4	Nukleinsäuren	600
	<i>Florian Horn</i>		29.3.5	Wasser	601
29.2.1	Teller, Mund und Speiseröhre	587	29.3.6	Vitamine, Mengen- und Spurenelemente	601
29.2.2	Der Magen	588	29.3.7	Wie die Nahrungsstoffe in die Peripherie gelangen	605
29.2.3	Das Duodenum und seine Drüsen	592			
29.2.4	Die weiteren Darmabschnitte	595			
30	Das Blut				606
30.1	Aufgaben des Blutes	606	30.3.4	Die Erythropoese	611
	<i>Florian Horn und Silke Berghold*</i>		30.3.5	Das Erythropoetin	612
30.1.1	Transportfunktionen	606	30.3.6	Vitamin B ₁₂ (Cobalamin)	614
30.1.2	Die Homöostase	606	30.3.7	Abbau der Erythrozyten	616
30.1.3	Die Blutgerinnung	606	30.3.8	Das Vitamin E (Tocopherol)	616
30.1.4	Die Immunabwehr	607	30.4	Hämoglobin und Sauerstofftransport ..	617
30.2	Das Knochenmark	607		<i>Carina Polzer und Florian Horn</i>	
	<i>Florian Horn</i>		30.4.1	Evolution des Hämoglobins	619
30.2.1	Aufbau des Knochenmarks	607	30.4.2	Die Moleküle Häm und Globin und das Hämoglobin	622
30.2.2	Die Stromazellen des Knochenmarks	607	30.4.3	Hämoglobin-Biosynthese	624
30.2.3	Stammzellen des Knochenmarks	607	30.4.4	Sauerstoff- und CO ₂ -Transport	629
30.3	Die Erythrozyten	608	30.4.5	Glutathion	634
	<i>Carina Polzer und Florian Horn</i>		30.4.6	Hämoglobin-Abbau	637
30.3.1	Energiegewinnung in den Erythrozyten ..	609			
30.3.2	Pentosephosphatweg in den Erythrozyten	609			
30.3.3	Laborwerte der Erythrozyten	610			

30.5	Blutgruppen und Transfusionsbiologie	640	30.7	Das Blutplasma	652
	<i>Florian Horn</i>			<i>Florian Horn</i>	
30.5.1	Die Rolle des Immunsystems	640	30.7.1	Zellen, Plasma und Serum	652
30.5.2	Das ABO-System	642	30.7.2	Die Plasmaproteine	653
30.5.3	Das Rhesus-System	644	30.7.3	Die Fraktionen der Elektrophorese	655
30.5.4	Das Kell-System	645	30.7.4	Die anderen Plasmaproteine	659
30.5.5	Die Bluttransfusion	645	30.7.5	Der Blutzuckerspiegel	660
30.6	Der Eisenstoffwechsel	646	30.8	Die Hämostase	660
	<i>Florian Horn</i>			<i>Florian Horn</i>	
30.6.1	Wozu brauchen wir überhaupt Eisen?	646	30.8.1	Ein kurzer Überblick scheint von Nöten	660
30.6.2	Die Eisenspeicher unseres Organismus	646	30.8.2	Die vaskuläre Reaktion	661
30.6.3	Die Resorption von Eisen im Dünndarm	647	30.8.3	Die Endothelzellen	661
30.6.4	Transport von Eisen im Blut	648	30.8.4	Die Thrombozyten	663
30.6.5	Der Eisenumsatz unseres Körpers	649	30.8.5	Das plasmatische Gerinnungssystem	666
30.6.6	Die Eisenausscheidung	649	30.8.6	Regulation der Hämostase	670
30.6.7	Vorkommen von Eisen in der Nahrung	649	30.8.7	Das fibrinolytische System	672
30.6.8	Regulation der Eisenaufnahme	650	30.8.8	Das Vitamin K	674
30.6.9	Eisen und die Infektion	650			
30.6.10	Die Eisenmangelanämie	651			
30.6.11	Eisenüberladung unseres Organismus	652			
31	Die Nieren				677
	<i>Paul Ziegler*</i>				
31.1	Überblick	677	31.6	Die endokrinen Aufgaben der Niere	685
31.1.1	Aufbau der Niere	677	31.6.1	Erythropoetin	685
31.1.2	Harnbildung	678	31.6.2	Renin-Angiotensin-Aldosteron-System (RAAS)	685
31.2	Das Niereninterstitium und die Gefäße	678	31.6.3	Calcitriol	686
31.3	Der Ultrafilter der Glomeruli	679	31.7	Regulation der Nierenfunktion	686
31.4	Das Tubulussystem	679	31.7.1	Bayliss-Effekt	686
31.4.1	Der proximale Tubulus	680	31.7.2	Tubuloglomeruläre Rückkopplung	686
31.4.2	Der dünne Teil der Henle-Schleife	681	31.7.3	Renin-Angiotensin-Aldosteron-System	687
31.4.3	Der dicke aufsteigende Teil der Henle-Schleife	682	31.7.4	Feineinstellung der Urinkonzentration	687
31.4.4	Der juxtaglomeruläre Apparat	682	31.8	Der Urin	687
31.4.5	Der distale Tubulus	683	31.8.1	Zusammensetzung des Urins	687
31.4.6	Das Sammelrohr	683	31.9	Die Nieren im Säure-Basen-Haushalt	689
31.5	Energieversorgung der Niere	685	31.9.1	Bicarbonat-Resorption	689
			31.9.2	Ammonium-Synthese	689
			31.9.3	Die Glukoneogenese der Niere	689
			31.9.4	Protonen-Ausscheidung im Sammelrohr	690

32	Der Säure-Basen-Haushalt	691			
	<i>Paul Ziegler*</i>				
32.1	Chemie der Säuren und Basen	691	32.2.2	Aufrechterhaltung des pH-Werts	695
32.1.1	Der pH-Wert	693	32.2.3	Nicht-Bicarbonat-Puffer	695
32.1.2	Puffer	693	32.2.4	Transport von CO ₂ im Blut	696
32.2	Die Puffersysteme des Körpers	694	32.3	Protonenbilanz des Körpers	697
32.2.1	Kohlensäure-Bicarbonat-Puffersystem ...	694	32.4	Messung des Säure-Basen-Status	697
33	Das Immunsystem	700			
	<i>Nadine Schneider* und Bettina Otte*</i>				
33.1	Die an der Abwehr beteiligten lymphatischen Organe	700	33.4.3	Dendritische Zellen als Bindeglied zwischen angeborener und erworbener Immunabwehr	718
33.1.1	Primär lymphatische Organe	700	33.5	Die erworbene oder spezifische Immunreaktion	718
33.1.2	Sekundär lymphatische Organe	701	33.5.1	Was ist ein Antigen?	719
33.2	Die humoralen Bestandteile des Immunsystems	702	33.5.2	Klonale Selektion	719
33.2.1	Epithelien	702	33.5.3	Die Antigenrezeptoren der Lymphozyten ..	719
33.2.2	Lysozym und Laktoferrin	702	33.5.4	Die MHC-Moleküle	722
33.2.3	Mechanische Vorbeugung von Infektionen	702	33.5.5	Gedächtnisreaktion	724
33.2.4	Die Standortflora	702	33.6	Immunologische Ausnahme-situationen	725
33.2.5	Das Komplementsystem	703	33.6.1	Allergie	725
33.2.6	Zytokine	705	33.6.2	Autoimmunerkrankungen	726
33.2.7	Antikörper	708	33.6.3	Tumorerkrankungen	726
33.2.8	Akute-Phase-Proteine	712	33.7	Wichtige immunologische Methoden ..	726
33.3	Die zellulären Bestandteile der Abwehr	713	33.7.1	Durchflusszytometrie	726
33.3.1	Myeloische Reihe	714		<i>Bettina Otte*</i>	
33.3.2	Lymphatische Reihe	716	33.7.2	ELISA	726
33.4	Die angeborene oder unspezifische Immunreaktion	717		<i>Bettina Otte*</i>	
33.4.1	Mustererkennungsrezeptoren	717	33.7.3	SDS-PAGE und Westernblot	727
33.4.2	Entzündungsreaktion	718		<i>Franziska Blaeschke</i>	
34	Die Leber	728			
	<i>Isabelle Nath* und Florian Horn</i>				
34.1	Anatomie und Histologie	728	34.2	Die Leber und der Energiestoffwechsel	730
34.1.1	Das Leberläppchen	728	34.2.1	Die Resorptionsphase	730
34.1.2	Die Blutversorgung	729	34.2.2	Die Postresorptionsphase	731
34.1.3	Was passiert wo in der Leber?	729	34.2.3	Die Enzymausstattung	732
34.1.4	Die Zellen der Leber	730	34.2.4	Was die Leber für sich selbst tut	733
			34.2.5	Was die Leber für den ganzen Menschen tut	733

34.3	Der Alkoholstoffwechsel	735	34.5	Speicher und Abwehr	743
34.3.1	Was ist Alkohol?	735	34.5.1	Die Leber als Speicherorgan.	743
34.3.2	Die Alkoholaufnahme	735	34.5.2	Die Leber und ihre Abwehrfunktion.	743
34.3.3	Der Alkoholmetabolismus	735	34.6	Die Leber als Ausscheidungsorgan	744
34.3.4	Kurzfristige Wirkungen des Alkohols.	736	34.6.1	Die Biotransformation	744
34.3.5	Langfristige Wirkungen des Alkohols.	736	34.6.2	Ausscheidung über die Galle	749
34.3.6	Der Alkoholtest	737	34.6.3	Der Harnstoffzyklus	749
34.4	Die Leber als Produktionsfabrik	738	34.7	Leberfunktionsprüfungen	750
34.4.1	Produktion der Plasmaproteine	738	34.7.1	Biosyntheseleistungen	750
34.4.2	Cholesterin-Biosynthese	739	34.7.2	Ausscheidungsleistungen.	750
34.4.3	Produktion von Gallenflüssigkeit	739	34.7.3	Zellständige Enzyme	751
34.4.4	Herstellung von Hormonen	743			
34.4.5	Biosynthese von Kreatin	743			
35	Die Muskulatur	754			
	<i>Michael Pritsch*</i>				
35.1	Aufbau der Muskulatur	754	35.2.4	Regeneration des Muskelgewebes	759
35.1.1	Der Skelettmuskel	754	35.3	Stoffwechsel der Skelettmuskulatur ...	759
35.1.2	Der Herzmuskel	754	35.3.1	Anaerobe Energiegewinnung	759
35.1.3	Die glatte Muskulatur	755	35.3.2	Aerobe (oxidative) Energiegewinnung. ...	761
35.1.4	Die Proteine des Sarkomers	755	35.3.3	Skelettmuskeltypen	762
35.2	Der Kontraktionsmechanismus	756	35.4	Stoffwechsel der Herzmuskulatur	762
35.2.1	Die Gleitfilament-Theorie	756	35.5	Myokine	763
35.2.2	Die Kontrolle der Kontraktion	757		<i>Florian Horn</i>	
35.2.3	Kontraktion ist Chefsache	758			

Anhang

36	Literaturverzeichnis	766
37	Sachverzeichnis	772