

Eine Arbeitsgemeinschaft der Verlage

Brill | Schöningh – Fink · Paderborn –
Vandenhoeck & Ruprecht · Göttingen – Böhlau · Wien · Köln
Verlag Barbara Budrich · Opladen · Toronto
facultas · Wien
Walter de Gruyter · Berlin · Boston
Haupt Verlag · Bern
Verlag Julius Klinkhardt · Bad Heilbrunn
Mohr Siebeck · Tübingen
Narr Francke Attempto Verlag – expert verlag · Tübingen
Psychiatrie Verlag · Köln
Psychosozial-Verlag · Gießen
Ernst Reinhardt Verlag · München
transcript Verlag · Bielefeld
Verlag Eugen Ulmer · Stuttgart
UVK Verlag · München
Waxmann · Münster · New York
wbv Publikation · Bielefeld
Wochenschau Verlag · Frankfurt am Main

Thomas Köhler, Prof. Dr. med. Dr. phil., Dipl.-Psych., Dipl.-Math., Arzt, lehrt an der Hochschule Fresenius Hamburg die Fächer Biologische Psychologie und Medizin für Psycholog*innen. Zudem ist er als Dozent für Psychologische Psychotherapie an mehreren Weiterbildungsinstituten tätig.

Thomas Köhler

Biopsychologie

2., vollständig überarbeitete Auflage

Psychosozial-Verlag

Digitale Ausgaben und Zusatzmaterial erhältlich unter utb.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

2., vollständig überarbeitete Auflage 2026
© 2010 Psychosozial-Verlag GmbH & Co. KG
Gesetzlich vertreten durch die persönlich haftende Gesellschaft Wirth GmbH,
Geschäftsführer: Johann Wirth
Walltorstraße 10, 35390 Gießen, Deutschland
06 41 96 99 78 0
info@psychosozial-verlag.de
www.psychosozial-verlag.de

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werks darf in irgendeiner Form
(durch Fotografie, Mikrofilm oder andere Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlags repro-
duziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.
Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Text und Data Mining im Sinne von § 44b UrhG vor.

Einbandgestaltung: siegel konzeption | gestaltung, Stuttgart
Umschlagabbildung: © Leo/Adobe Stock
Innenlayout nach Entwürfen von Hanspeter Ludwig, Wetzlar
Druck und Bindung: Prime Rate AG, H-1044 Budapest, Megyeri út. 53

utb-nummer 6503
ISBN 978-3-8252-6503-8 (Print)
ISBN 978-3-8385-6503-3 (E-Book)

Inhalt

Vorwort	9
1 Struktur und Funktion der Zelle; Feinaufbau des Nervensystems	13
1.1 Überblick; Allgemeines zum Aufbau und zur Funktionsweise von Zellen	13
1.2 Neurone (Nervenzellen)	22
1.3 Gliazellen	24
1.4 Interstitieller Raum; Blut-Hirn-Schranke	25
1.5 Testen Sie Ihr Wissen	26
2 Makroskopische Anatomie des Nervensystems	27
2.1 Topografische und neuroanatomische Grundbegriffe	27
2.2 Gliederung des Nervensystems	30
2.3 Das Rückenmark	31
2.4 Allgemeines zum Gehirn und zu seiner Einteilung	32
2.5 Hirnstamm	34
2.6 Cerebellum (Kleinhirn)	36
2.7 Diencephalon (Zwischenhirn)	38
2.8 Telencephalon (Endhirn)	39
2.9 Rückenmarksnerven	48
2.10 Hirnnerven	49
2.11 Hirn- und Rückenmarkshäute; Liquorräume und Liquor cerebrospinalis	51
2.12 Die Gefäßversorgung des Gehirns	55
2.13 Testen Sie Ihr Wissen	56
3 Bildung, Leitung und Übertragung von Erregung in der Nervenzelle	57
3.1 Vorbemerkung; Überblick	57
3.2 Synaptische Übertragung und die Ausbildung postsynaptischer Potenziale	57
3.3 Wichtige Transmitter und ihre biopsychologische Bedeutung	67
3.4 Entstehung des Aktionspotenzials	76
3.5 Die Ausbreitung des Aktionspotenzials	78
3.6 Testen Sie Ihr Wissen	80

4	Vegetatives (autonomes) Nervensystem und endokrines System; Regulation innerer Organe	81
4.1	Vorbemerkungen; Überblick	81
4.2	Das vegetative (autonome) Nervensystem	81
4.3	Allgemeines zu Hormonen und ihren Wirkungen	92
4.4	Nebennierenmark und Nebennierenrinde	95
4.5	Hypophyse	99
4.6	Hypothalamus	101
4.7	Die Achse Hypothalamus-Hypophyse-Nebennierenrinde; »Stress«	103
4.8	Keimdrüsen und Sexualhormone	105
4.9	Weitere Hormondrüsen	108
4.10	Gewebshormone	111
4.11	Das Herz-Kreislauf-System	111
4.12	Der Atmungsapparat	115
4.13	Das Verdauungssystem	119
4.14	Testen Sie Ihr Wissen	127
5	Biopsychologische Methoden	129
5.1	Vorbemerkungen; Überblick	129
5.2	Bildgebende Verfahren	130
5.3	Psychophysiologische Methoden	133
5.4	Läsions- und Stimulationsverfahren; Eingriffe in des Erbmateriail	141
5.5	Methoden zur Untersuchung neurochemischer Vorgänge	142
5.6	Neuroanatomische Techniken	144
5.7	Testen Sie Ihr Wissen	145
6	Sinnessysteme	147
6.1	Definitionen; Überblick	147
6.2	Das visuelle System	147
6.3	Gehör	151
6.4	Gleichgewichtssinn	153
6.5	Geruchs- und Geschmackssinn	154
6.6	Das somatosensorische System	155
6.7	Testen Sie Ihr Wissen	166
7	Das motorische System	167
7.1	Vorbemerkungen; Überblick	167
7.2	Aufbau und Funktion von (quergestreiften) Muskelzellen und Muskeln	167
7.3	Sensible und motorische Innervation der Skelettmuskulatur; mono- und polysynaptische Reflexe	171
7.4	Zentralnervöse motorische Strukturen	174
7.5	Regulation der Motorik	182
7.6	Testen Sie Ihr Wissen	184

8	Lernen und Gedächtnis; Neuroplastizität	185
8.1	Vorbemerkungen; Überblick	185
8.2	Lernen	185
8.3	Gedächtnis	190
8.4	Neuroplastizität	197
8.5	Testen Sie Ihr Wissen	197
9	Denken und Sprache; Hemisphärenspezialisierung	199
9.1	Vorbemerkungen; Überblick; begriffliche Klärungen	199
9.2	Biologische Grundlagen des Denkens	199
9.3	Sprache und Sprachstörungen	203
9.4	Hemisphärenspezialisierung (Hemisphärenasymmetrie, Lateralisation)	207
9.5	Testen Sie Ihr Wissen	212
10	Essen, Trinken und Schlaf	213
10.1	Vorbemerkungen; Überblick	213
10.2	Biopsychologie des Essens	213
10.3	Regulation von Flüssigkeitsaufnahme und -ausscheidung	219
10.4	Schlaf	222
10.5	Testen Sie Ihr Wissen	228
11	Sexualität und Fortpflanzung	229
11.1	Vorbemerkungen; Überblick	229
11.2	Männliche Geschlechtsorgane; sexueller Funktionszyklus beim Mann	229
11.3	Weibliche Geschlechtsorgane; sexueller Funktionszyklus bei der Frau	233
11.4	Steuerung des Sexualverhaltens	235
11.5	Sexuelle Orientierung	237
11.6	Bildung der Keimzellen; Menstruationszyklus	238
11.7	Befruchtung, Schwangerschaft und Embryonalentwicklung	241
11.8	Geschlechtsdifferenzierung in der Embryonalentwicklung	242
11.9	Biologische Vorgänge in der Pubertät	245
11.10	Testen Sie Ihr Wissen	245
12	Biologische Grundlagen psychischer Störungen	247
12.1	Vorbemerkungen; Überblick	247
12.2	Schizophrenie	247
12.3	Affektive Störungen	253
12.4	Zwangsstörungen	262
12.5	Testen Sie Ihr Wissen	264

13	Drogen und ihre Wirkungen	265
13.1	Definitionen; Allgemeines zu Drogenwirkungen und ihren biologischen Grundlagen	265
13.2	Toleranz; Entzugssymptomatik; schädlicher Gebrauch und Abhängigkeitssyndrom	268
13.3	Alkohol	270
13.4	Opioide (Opiate)	274
13.5	Kokain und Psychostimulanzien	278
13.6	Nikotin	279
13.7	Sedativa und Hypnotika	283
13.8	Cannabinoide	285
13.9	Halluzinogene	289
13.10	Inhalanzien	291
13.11	Testen Sie Ihr Wissen	292
14	Genetik	293
14.1	Vorbemerkungen; Überblick	293
14.2	Das menschliche Erbgut und die Chromosomen	294
14.3	Mitose und Meiose; Chromosomenaberrationen	298
14.4	Formale Genetik; Mendel'sche Gesetze	303
14.5	Erbkrankheiten	307
14.6	Testen Sie Ihr Wissen	310
	Anmerkungen	311
	Literaturverzeichnis	317
	Register	321

Vorwort

Die erste Auflage dieser Monografie erschien 2001 im Kohlhammer-Verlag und verkaufte sich anfangs durchaus zufriedenstellend. Nachdem jedoch zunehmend weitere Lehrbücher der Biopsychologie auf den Markt kamen (darunter Übersetzungen bisher nur auf Englisch verfügbarer Monografien), welche sämtlich hinsichtlich des Bildmaterials sehr viel aufwändiger waren, ging der Absatz merklich zurück und Kohlhammer nahm – durchaus nachvollziehbar – 2008 das Buch aus seinem Sortiment. Ich habe dies sehr bedauert und bin nach wie vor der Meinung, dass die Monografie (knapp formuliert und zu einem günstigen Preis) die wesentlichen biopsychologischen Grundlagen vermittelt, wenn auch teilweise mit einer von den anderen Lehrbüchern abweichenden Schwerpunktsetzung (s. u.).

Mittlerweile hat sich mit Einführung des Bachelor-Studiengangs die Situation grundlegend verändert. Biopsychologie wird nun üblicherweise in einem einzigen Semester abgeschlossen, und in einem generell inhaltlich überfrachteten Studium wird es immer weniger zumutbar, sich detailliert die Inhalte voluminöser (und teurer) Monografien anzueignen. Es gibt zu denken, dass Lehrbücher der Biopsychologie, anhand welcher sich Bachelor-Studierende binnen eines halben Jahres Kenntnisse des Faches verschaffen sollen, oft ähnlich umfangreich sind wie Lehrbücher der gesamten Inneren Medizin, mit deren Hilfe Generationen von Ärzten ihre Patienten mit Erfolg diagnostiziert und therapiert haben. Ich halte es auch nicht unbedingt dem Ruf einer Wissenschaft für zuträglich, wenn Lehrbücher nur dann akzeptiert werden, wenn sie aussehen wie Walt-Disney-Hefte (was im Übrigen auch für andere Sparten der Psychologie gilt).

Ich war deshalb sehr dankbar, als Herr Professor Sulz von CIP-Medien meinen Vorschlag annahm, eine zweite, noch kürzere Version herauszubringen, die zu einem erschwinglichen Preis in überschaubarem Umfang die wichtigsten biopsychologischen Sachverhalte vermitteln soll. Dabei wurde bewusst darauf verzichtet, jeden gerade veröffentlichten einschlägigen Befund einzuarbeiten, sondern eine Beschränkung auf gesichertes (bzw. zumindest lange tradiertes) biopsychologisches Wissen vorgenommen. Mittlerweile wurde CIP-Medien vom Psychosozial-Verlag übernommen, was deutlich verbesserte Verkaufszahlen mit sich brachte, und nun ergibt sich die erfreuliche Notwendigkeit einer Neuauflage.

Gegenüber den ersten Auflagen ist die Monografie insofern leserfreundlicher gestaltet, als die Quellenangaben im Text auf ein Minimum reduziert wurden; bezüglich anatomischer

und physiologischer Sachverhalte (die ja in der Regel nicht strittig sind) wird so gut wie ganz auf entsprechende Angaben verzichtet. Die Darstellung der anatomischen Sachverhalte geschieht anhand diverser Standardlehrbücher, die physiologischer anhand des Materials im unentbehrlichen *Taschenatlas Physiologie* von Silbernagl, Despopoulos und Draguhn (9. Auflage aus dem Jahre 2018); diese Quelle wird im Text nicht mehr gesondert aufgeführt. Dass die Wiedergabe der Inhalte teilweise unter Vereinfachungen und (gewissen) Ungenauigkeiten erfolgt, ist aufgrund des gesetzten knappen Umfangs und der oft weitgehend fehlenden physikalisch-chemischen Vorkenntnisse der Leserschaft unvermeidlich.

Die Leserfreundlichkeit wird zudem dadurch erhöht, dass manche Detaildarstellungen in die Anmerkungen verlegt werden. Man kann diese sicher mit gewissem Gewinn lesen, muss es aber nicht tun, insbesondere nicht bei der ersten Einarbeitung in das Thema. Viele der Anmerkungen dienen nicht zuletzt dazu, den Verfasser bei seiner vereinfachenden Darstellung gegen den Vorwurf der wissenschaftlichen Nachlässigkeit abzusichern.

Auch sind einige der Abbildungen nun farbig gestaltet, allerdings nur insoweit, als damit wesentlich das Verständnis erleichtert wird. Die meisten Abbildungen liegen nach wie vor in Schwarz-Weiß vor – was für den günstigen Ladenpreis mitverantwortlich ist.

Die Auswahl der behandelten Themen geschah nicht zuletzt anhand ihrer klinischen Relevanz. Tatsache ist, dass der Großteil der Psychologiestudierenden später im klinischen Bereich (im weiteren Sinne) arbeiten wird; für sie sind deshalb weniger Themen wie Kontrastverstärkung im visuellen System von praktischer Bedeutung als bspw. die teils gravierenden Nebenwirkungen, welche Psychopharmaka aufgrund ihrer anticholinergen Effekte haben können. Deshalb werden die Sinnessysteme (etwa das in den meisten Lehrbüchern der Biopsychologie sehr detailliert dargestellte visuelle) nur kurz eingeführt – umso mehr als dies in aller Regel ja auch in Lehrbüchern der Allgemeinen Psychologie behandelt wird. Ausführlicher kommt lediglich das somatosensorische System zur Darstellung; dabei liegt wiederum der Schwerpunkt auf der Biologie und Biopsychologie des Schmerzes. Aus dem erwähnten Grund der klinischen Relevanz sind auch die Kapitel zu biologischen Grundlagen psychischer Störungen und zu psychotropen Substanzen (»Drogen«) eher ausführlich und behandeln vergleichsweise genau psychopharmakologische Aspekte. Im ohnehin schon umfangreichen Kapitel über das Vegetative Nervensystem und das Hormonsystem sind Anatomie und Physiologie von Herz-Kreislauf, Atmung und Verdauung genauer besprochen, weil dies eben für die Klinische Psychologie, die Psychosomatik und die Psychophysiologie von zentraler Bedeutung ist. Umfangreicher ist zudem das Kapitel über Sexualität, in dem nicht nur die Anatomie der Geschlechtsorgane und die Physiologie der Sexualvorgänge detaillierter dargestellt werden, sondern auch die Grundlagen sexueller Funktionsstörungen zur Sprache kommen. Weiter schien ein vergleichsweise ausführliches Kapitel zur Genetik sinnvoll – die meines Erachtens in vielen anderen Lehrbüchern zu kurz kommt –, wobei v. a. wieder auf die klinischen Aspekte Wert gelegt wird (Chromosomenaberrationen, erblich bedingte Erkrankungen). Schweren Herzens habe ich das Kapitel über Evolution dafür ganz gestrichen, denn angesichts des immer stärker verdichteten Lehrstoffs scheint die Frage nach den Ursprüngen des Menschen mittlerweile in den Hintergrund gerückt. Hinzu kommt, dass die letzten Befunde der Paläoanthropologie so widersprüchlich sind, dass man nicht mehr guten Gewissens einen einfachen Stammbaum des Menschen konstruieren kann.

Dem Lektorat des Psychosozial-Verlags, insbesondere Herrn Flierl, bin ich sehr verbunden für die Gestaltung des Layouts inklusive der Abbildungen; diese gute und effiziente Zusammenarbeit habe ich ausgesprochen geschätzt. Wie schon so oft und hoffentlich immer wieder, ist natürlich meiner lieben Frau Carmen zu danken, die gezwungenermaßen Verständnis und Interesse für meine Buchprojekte aufbringen muss.

Augsburg, im Juni 2025
Thomas Köhler

1 Struktur und Funktion der Zelle; Feinaufbau des Nervensystems

1.1 Überblick; Allgemeines zum Aufbau und zur Funktionsweise von Zellen

Das Nervensystem besteht nicht nur aus den Nervenzellen (Neuronen), sondern auch aus verschiedenen Arten einer zweiten Zellgruppe, die im Zentralnervensystem (ZNS) als *Glia* oder *Neuroglia*, im peripheren Nervensystem üblicherweise als *Satellitenzellen* bezeichnet werden. Gliazellen halten nicht nur die Neurone zusammen, sondern unterstützen sie auch in ihren Aufgaben, können bspw. durch Bildung von Myelinschichten deren elektrische Leitfähigkeit erheblich verbessern.

Trotz ihrer hochgradigen Spezialisierung weisen Neurone und Glia mit den anderen Zellen des Körpers wichtige Gemeinsamkeiten auf, sodass zunächst allgemein über Struktur und Funktion von Zellen zu sprechen ist; erst dann sollen Aufgabe, Gestalt sowie Funktionsweisen von Neuronen (1.2) und Gliazellen (1.3) zur Darstellung kommen.

Zellmembran, Zytoplasma, Organellen, Kern und Nukleinsäuren: Der menschliche Körper besitzt mehrere Milliarden Zellen – allein Neuronen gibt es mindestens 10 Milliarden; andere Schätzungen gehen sogar von einem Vielfachen dieser Zahl aus. Trotz ihrer unterschiedlichen Aufgaben sind sie im Prinzip vergleichsweise ähnlich gebaut – wobei die kernlosen roten Blutkörperchen und die Keimzellen bedeutsame Ausnahmen darstellen. Zellen sind von einer Schutzschicht (Zellmembran) umgeben, besitzen in der Zellflüssigkeit (Zytoplasma) zahlreiche kleine Organe (Zellorganellen) und haben einen meist recht großen Kern, der von einer eigenen Membran (Kernmembran) umhüllt ist und u. a. die Chromosomen mit den darauf lokalisierten Genen enthält. Die *Zellmembran* (ähnlich die Kernmembran sowie die Hüllen der Organellen) besteht aus Eiweißen, daneben v. a. aus Phospholipiden; letztere sind Verbindungen von Lipiden mit Phosphorsäure, die aufgrund elektrostatischer Eigenschaften (wechselseitige Abstoßung bzw. Anziehung geladener Molekülteile) eine charakteristische parallele, senkrecht zur Membranoberfläche gerichtete Orientierung aufweisen; diese hat für die Durchlässigkeit der Zellmembran wesentliche Bedeutung (s. Abb. 1.1).

Unter der Bezeichnung Lipide fasst man chemisch unterschiedliche Stoffe zusammen, die eine lipophile (d.h. in Wasser schlecht, in bestimmten organischen Flüssigkeiten wie Chloroform oder Benzol hingegen gut lösliche) Gruppe besitzen. Dazu gehören die Fettsäuren und die Phospholipide (s.u.), die Ester der Fettsäuren mit dem Alkohol Glycerin (Triglyceride) sowie die Steroide (Cholesterin und die aus Cholesterin synthetisierten Steroidhormone).

Fettsäuren sind Kohlenwasserstoffverbindungen mit einer *Carboxylgruppe* (COOH) an einem Ende. Durch Veresterung mit Phosphorsäure entstehen Phospholipide. Ihr Fettsäureteil ist hydrophob (schlecht in Wasser löslich), während die mit Phosphorsäure veresterte Carboxylgruppe sich gut in Wasser löst (hydrophil ist). Die Zellmembranen sind so gebaut, dass sich die hydrophoben Enden zweier Phospholipide gegenüberstehen, während die hydrophilen Enden nach innen (in das wasserreiche Zytoplasma) bzw. nach außen (in die ebenfalls wasserreiche Zellumgebung) ragen (Lipiddoppelschicht). Eingelagert sind weitere Lipide, z. B. Cholesterin, deren hydrophobe und hydrophile Enden sich ähnlich anordnen; die Lipidzusammensetzung der Zellmembran bestimmt wesentlich ihre chemisch-physikalischen Eigenschaften. Weiter befinden sich in oder an der Membran zahlreiche Proteine (Eiweiße). Sie bilden Ionenkanäle, Eintrittsstellen für diverse Stoffe (z. B. rücktransportierte Transmitter) oder Bindungsstellen für Hormone und Neurotransmitter.

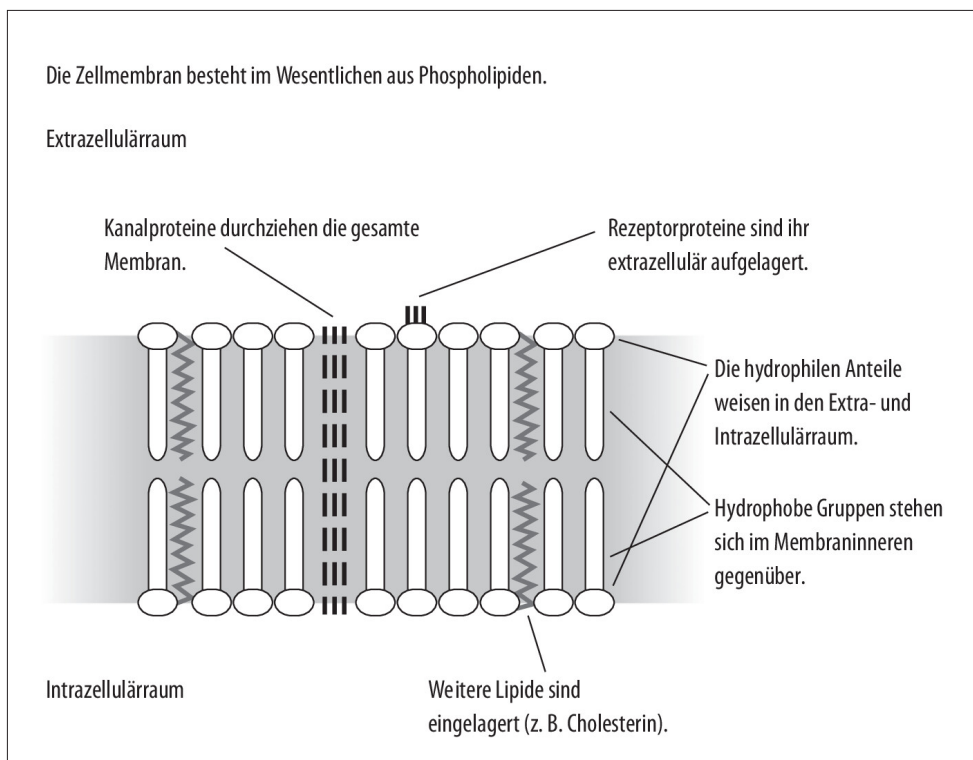


Abbildung 1.1: Aufbau der Zellmembran

Was die *Permeabilität (Durchlässigkeit)* für einzelne Stoffe bestimmt, ist nicht in allen Einzelheiten klar. Viele Moleküle, etwa Eiweiße, können nicht oder nur in einer Richtung die Zellmembran durchqueren, andere Stoffe (auch kleine Ionen) nur unter gewissen, zeitlich variablen Umständen. Gut passieren i. Allg. Lipide; Glukose und Aminosäuren werden durch einen aktiven (mit Energieverbrauch verbundenen) Prozess in die Zelle geschleust. O_2 und CO_2 gelangen problemlos durch die Membran. Für große Partikel wie Bakterien besitzt die Zelle besondere Verfahren der »Einverleibung«.

Als Endozytose (Phagozytose) bezeichnet man die Aufnahme größerer Teilchen in die Zelle (z. B. von Bakterienteilen in die Leukozyten). Dazu wölbt sich die Zellmembran um das aufzunehmende Objekt, hüllt es ein und gibt es schließlich ins Zellinnere wieder frei. Auch der umgekehrte Prozess (Exozytose) findet statt; so verschmelzen die mit Transmitter gefüllten Vesikel (Bläschen) in den Endknöpfchen der Neurone mit der Zellmembran und ergießen ihren Inhalt in den synaptischen Spalt (anschaulich als Emcyotose = Zellerbrechen bezeichnet).

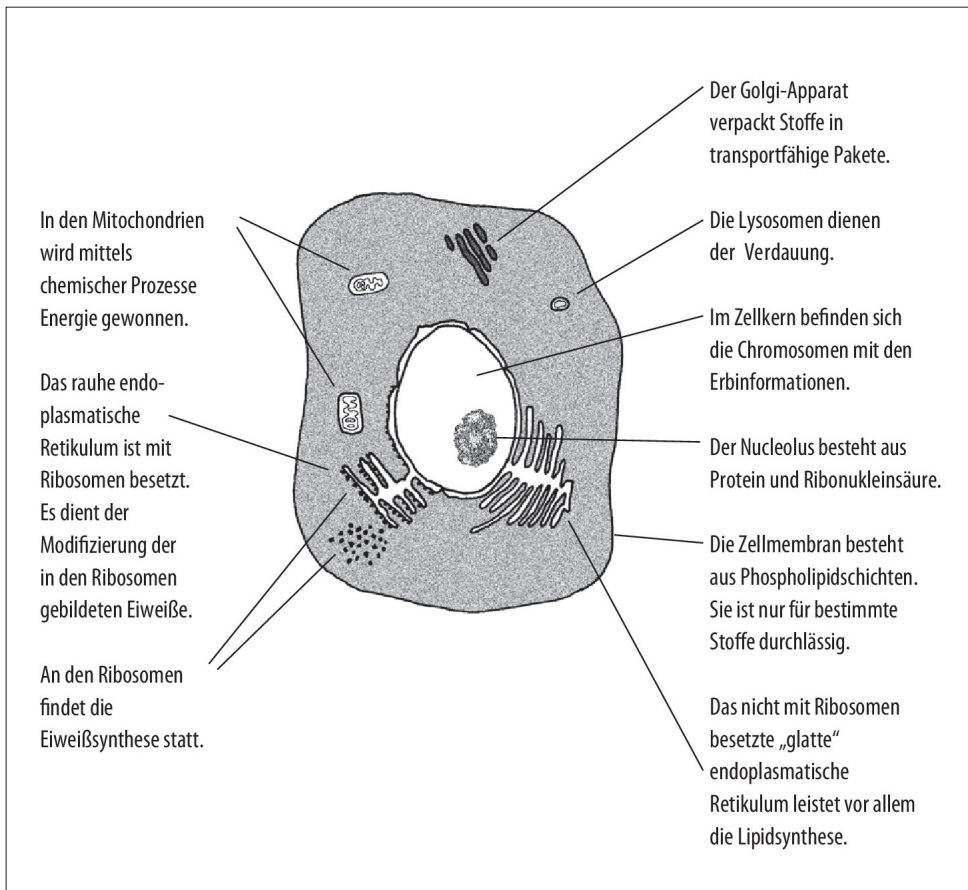


Abbildung 1.2: Zelle und Zellorganellen

Von den zahlreichen Zellorganellen fällt zunächst das schlauchförmige *endoplasmatische Retikulum* auf (endoplasmatisch = im Zytoplasma gelegen, lat. reticulum = Netz). Es ist teilweise an der Oberfläche von den kleinen körnerartigen *Ribosomen* besetzt (*raues endoplasmatisches Retikulum*); diese auch frei im Zytoplasma vorkommenden Ribosomen sind die Orte der *Eiweißsynthese* anhand der von den Genen gelieferten Information. Im rauen endoplasmatischen Retikulum werden vorwiegend die gebildeten Proteine weiterverarbeitet, im nicht mit Ribosomen besetzten »glatten« findet hauptsächlich Synthese von Lipiden statt (s. Abb. 1.2).

Im dem endoplasmatischen Retikulum strukturell ähnlichen *Golgi-Apparat* werden u. a. die Vesikel gebildet, in denen die Transmitter bis zu ihrer Ausschüttung gelagert werden; durch Verschmelzung mit der Zellmembran gelangt ihr Inhalt in den synaptischen Spalt zwischen den Nervenzellen (s. o. zur Meiose). Weiter lassen sich *Mitochondrien* erkennen, längliche Gebilde, die im Inneren von durchbrochenen Wänden durchzogen sind; hier finden im Wesentlichen oxidative Stoffwechselprozesse statt, bei denen Stoffe unter Bildung des energiereichen Adenosintriphosphats (ATP) zerlegt werden.

Mitochondrien waren wohl in den Anfängen der Evolution Bakterien, die sich in Zellen eingeschleust hatten und mit ihnen eine Symbiose eingegangen sind. Daher besitzen diese Organellen ihre eigene Erbinformation; ihr Aufbau wird also nicht von der DNA des Kerns, sondern durch die eigene mitochondriale DNA (mt-DNA) bestimmt. Mitochondrien werden nur über die Eizelle weitergegeben, womit die mütterliche mt-DNA unverändert auf die Kinder übertragen wird. Dies spielt beim Verständnis gewisser Erbkrankheiten eine Rolle. Auch bei der Erforschung der Menschheitsentstehung und -ausbreitung bietet die Analyse der mitochondrialen DNA wertvolle Hilfe.

Die kleinen *Lysosomen* dienen der »Verdauung«: Aufgenommene Stoffe wie Bakterien oder Zellbestandteile (etwa Membranen funktionsuntüchtiger Organellen) werden hier zerlegt, brauchbare Elemente für Syntheseleistungen zur Verfügung gestellt.

Die intrazelluläre Flüssigkeit, das *Zytoplasma*, besteht vornehmlich aus Wasser mit darin gelösten Ionen sowie Proteinen, Glukose und Fettsäuren. In hoher Konzentration finden sich dort Kaliumionen, während der die Zelle umgebende Flüssigkeitsraum, der Extrazellulärraum, in der Zusammensetzung dem Meer ähnelt, also große Mengen von Natrium- und Chloridionen enthält. Mehr oder weniger alle Zellen, keineswegs nur die Neurone, sind gegenüber dem Extrazellulärraum negativ geladen, was u. a. dadurch bedingt ist, dass die negativen Proteinionen nicht das Zellinnere verlassen können, während die positiv geladenen Kaliumionen, einem Diffusionsgradienten folgend, in geringen Mengen austreten (s. 3.4 zum Ruhepotenzial).

Kern; Chromosomen; Nukleotide: Der *Kern (Nucleus)*, der durch eine der Zellmembran ähnliche – wenngleich etwas porösere – Kernmembran gegen das übrige Zellinnere abgegrenzt ist, enthält hauptsächlich die Chromosomen mit der *Desoxyribonukleinsäure (DNS)*, angloamerikanischem Sprachgebrauch folgend meist *DNA* abgekürzt).

In den Kernen der menschlichen Zelle (Keimzellen ausgenommen) liegen die Chromosomen paarweise vor (sog. diploider Chromosomensatz; s. 14.2) Diese bestehen aus zwei von Eiweißen umgebenen schraubenförmig gedrehten, sich gegenüberstehenden *DNA-Einzelsträngen (Doppelhelix-Struktur)*. Die Einzelstränge sind lange Nukleotidketten, d. h. durch Phosphorsäure untereinander verbundene Zuckermoleküle, an denen eine der

Nukleotidbasen Adenin, Thymin, Cytosin oder Guanin hängt. Die beiden Doppelstränge sind *komplementär*, indem Adenin im einen Strang stets Thymin im anderen gegenübersteht und Cytosin auf der einen Seite Guanin auf der anderen.

Desoxyribose ist eine *Pentose*, also ein ringförmiges Molekül mit fünf C-Atomen (griech. penta = fünf). Die Verbindung eines Desoxyribosemoleküls mit einer Base nennt man *Nukleosid*, die eines *Nukleosids* mit einem Phosphorsäuremolekül *Nukleotid* (genauer: Mononukleotid). Das Phosphatmolekül eines Nukleotids kann sich mit der Desoxyribose eines anderen unter Wasserabspaltung verbinden (Esterbindung), sodass lange Nukleotidketten (Polynukleotide) entstehen. Die Phosphatbrücken zwischen den Zuckermolekülen enthalten zudem eine OH-Gruppe, von der sich das Wasserstoffion leicht abspalten kann; deshalb haben die Nukleotidketten Säureeigenschaften (daher die Bezeichnung Desoxyribonukleinsäure). Adenin und Guanin sind Purinbasen, Cytosin und Thymin Pyrimidinbasen; die Struktur ist so, dass nur Adenin und Thymin einerseits, Cytosin und Guanin andererseits Wasserstoffbrücken ausbilden und sich damit gegenüberstehen können (s. Abb. 1.3).

Chromosomen bestehen neben den Nukleotidketten aus Eiweißen und sind gut färbbar (daher ihr Name: griech. chroma = Farbe, soma = Körper). Mikroskopisch zeigen sie sich als (einzelne) Chromatinfäden, die zwischen den Zellteilungen knäuelförmig aufgerollt sind. Unmittelbar vor Teilung von Kern und Zellen liegen sie in der Kernmitte angeordnet als doppelte, nur noch an einem Punkt zusammenhängende Chromatinfäden (Resultat der zuvor abgelaufenen Reduplikation). Die üblichen Darstellungen, bei denen man gut Substrukturen (z. B. zwei Arme) erkennen kann, sind mittels elektronenmikroskopischer Techniken gewonnen worden und zeigen die doppelt vorliegenden, teilungsbereiten Chromosomen.

Auf den größtmäßig sehr verschiedenen Chromosomen sind Informationen für etwa 30.000 *Erbmerkmale* (*Gene*) gespeichert, im Durchschnitt liegen also gut 1.000 Gene auf jedem Chromosom. Alle Gene (die auf dem X-Chromosom ausgenommen) finden sich auf den entsprechenden Abschnitten der beiden ein Paar bildenden *homologen Chromosomen* und sind deshalb in Parallelförmigkeit vorhanden (*Allele* genannt).

Jedes Gen besteht aus einem Abschnitt der DNA, wobei die Erbinformation als *Abfolge* von *Nukleotidbasen* *kodiert* ist. Jeweils drei Nukleotide (ein »Kodon«) verschlüsseln nämlich eine der 20 im menschlichen Körper zur Eiweißsynthese benutzten *Aminosäuren*. Die Abfolge der Kodone auf dem jeweiligen Gen entsprechenden DNA-Abschnitt determiniert so eine Abfolge von Aminosäuren und damit ein Polypeptid, welches häufig als Enzym einen bestimmten Stoffwechselvorgang kontrolliert (»ein Gen = ein Enzym«-Hypothese; s. u. zur Proteinsynthese).

Neben DNA enthält die Zelle *Ribonukleinsäure* (RNS oder RNA); diese befindet sich sowohl im Kern wie im Zytoplasma und dient zum einen als *messenger-RNA* (m-RNA = Boten-RNS) dazu, die in der chromosomalen DNA gespeicherte Information an die im Zytoplasma liegenden Ribosomen zu vermitteln. Zum anderen ist es Aufgabe kürzerer RNA-Abschnitte, die zur Proteinbildung benötigten Aminosäuren an die Ribosomen zu transportieren (*transfer-RNA* oder t-RNA). Im Prinzip ist die RNA ähnlich gebaut wie die DNA: Nukleoside, die durch Phosphatbrücken verbunden sind; der Zucker, an dem die Basen hängen, ist jedoch nicht Desoxyribose, sondern die geringfügig anders strukturierte Ribose; zudem findet sich statt der Pyrimidinbase Thymin in der RNA die Pyrimidinbase Uracil. Auch sind die RNA-Abschnitte deutlich kürzer und liegen nur als einfacher Strang vor (s. u.).

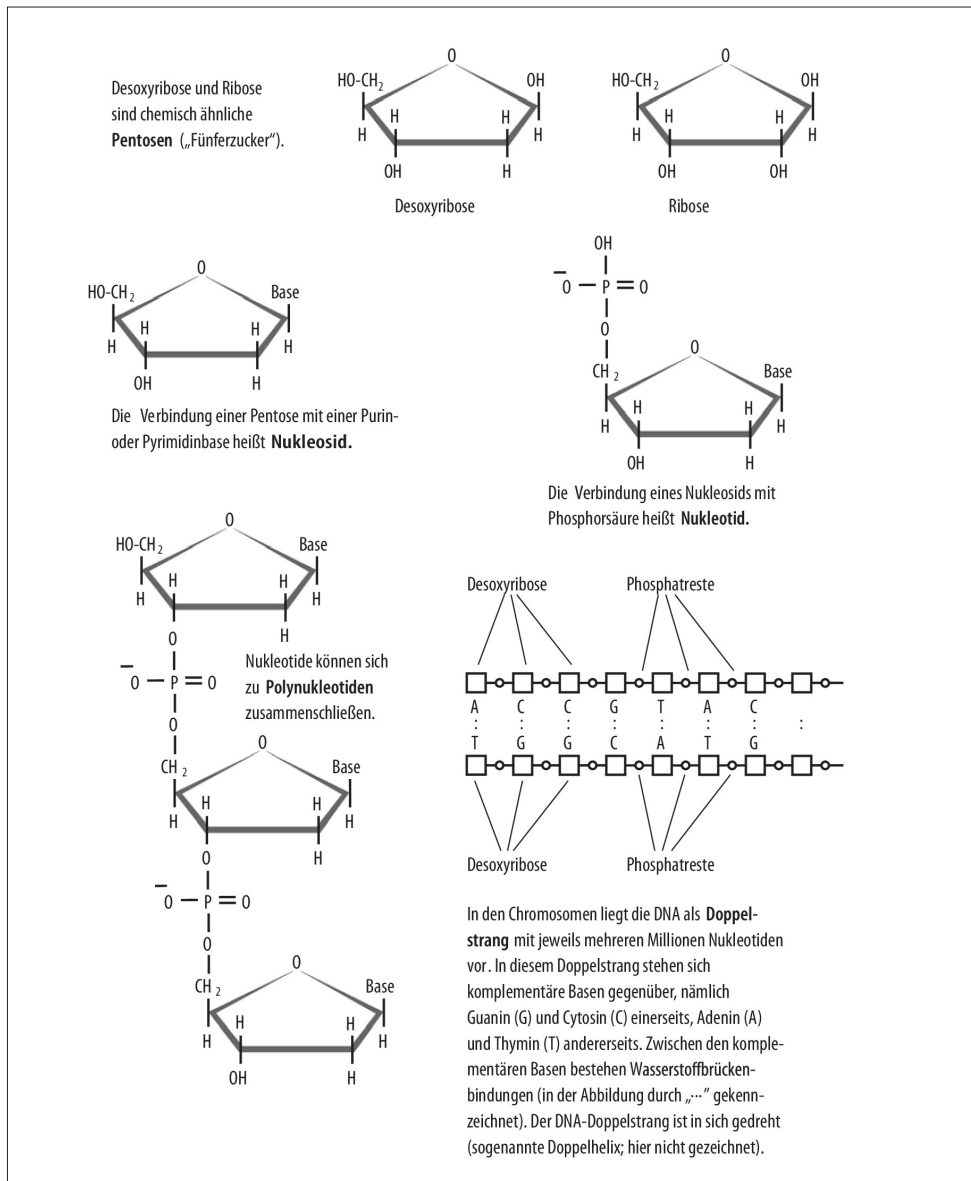


Abbildung 1.3: Pentosen, Nukleoside, Nukleotide

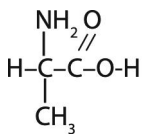
Identische Reduplikation und Zellteilung; Proteinsynthese; Energiegewinnung; weitere Synthese- und Abbauvorgänge: Auch im ausgewachsenen Organismus teilen sich Zellen; da in den Chromosomen die Information sitzt, nach der die Zelle ihre Aufgaben erfüllt, ist neben Aufteilung der zytoplasmatischen Flüssigkeit und der Organellen auf die beiden »Tochterzellen« Teilung des Kerns und Weitergabe des diploiden Chromosomensatzes notwendig. Der Vorgang wird *Mitose* genannt.

Erster Schritt ist die *identische Reduplikation* der DNA-Doppelhelix: Dazu trennen sich ähnlich wie bei einem Reißverschluss die beiden komplementären Stränge; an jeden lagern sich nach der Vorlage der Einzelstränge passende Nukleotide an: einem Nukleotid mit Adenin im ursprünglichen Strang wird also eines mit Thymin gegenübergestellt, einem Guanin-Nukleotid eines mit Cytosin als Base usw. Die angelagerten Nukleotide verbinden sich durch Phosphatbrücken, sodass ein vollständiger komplementärer Strang entsteht. Der Vorgang steht unter Kontrolle des Enzyms DNA-Polymerase; es ist leicht zu sehen, dass man mit seiner pharmakologischen Blockade wirksam in die Zellvermehrung eingreifen kann.

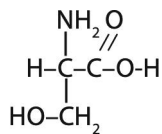
Im Anschluss an die identische Reduplikation liegen also 46-mal jeweils zwei DNA-Doppelstränge vor. Die Chromosomen stellen sich nun so dar, wie sie üblicherweise abgebildet werden: als 46 Doppelchromosomen (zwei Chromatinfäden), die nur an einer Stelle (dem Zentromer) zusammenhängen. Diese ordnen sich in einer Ebene an; die Doppelchromatiden werden getrennt, restlicher Kern und Zytoplasma auf zwei neue Zellen mit Kern- und Zellmembran verteilt. Jede enthält wieder einen diploiden Chromosomensatz; jedes Chromosom besitzt wie zuvor einen DNA-Doppelstrang. Die Erbinformation determiniert die Bildung von Peptiden und damit sämtlicher Enzyme; letztere kontrollieren die Synthese- und Abbauvorgänge, sodass mit dem Bauplan für die Enzyme die Eigenheiten des Organismus und die in ihm ablaufenden Prozesse weitgehend festgelegt sind.

Ein Beispiel: Das Enzym ADH (Alkoholdehydrogenase) baut Ethanol zum stark aversiv wirkenden Acetaldehyd ab. Ist dieses Enzym besonders aktiv (und die das Acetaldehyd abbauende ALDH nicht), kommt es nach Alkoholgenuß zu starkem Anstieg von Acetaldehyd und unangenehmen Reaktionen; diese (bei Ostasiaten sehr häufige) Enzymkonstellation stellt einen protektiven Faktor gegen die Entwicklung von Alkoholismus dar. Die Neigung zu Alkoholmissbrauch ist somit u. a. durch eine bestimmte Anordnung der DNA an jenen Abschnitten bestimmt, die Information für die Bildung dieser Enzymproteine liefern.

Proteine (Eiweiße) sind lange Ketten von Aminosäuren, von denen im menschlichen Körper genau 20 vorkommen. Die Struktur von (α -)Aminosäuren ist prinzipiell gleich: An einem C-Atom hängt einerseits eine Carboxylgruppe (COOH), andererseits eine Aminogruppe (NH_2), zudem ein H-Atom und schließlich der für die einzelne Aminosäure charakteristische Rest R. Im Fall des Glycins ist R ein H-Atom, bei den anderen Aminosäuren meist deutlich komplexer. Hier zwei einfache Beispiele:

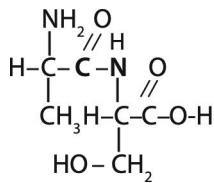


L-Alanin



L-Serin

Unter Abspaltung von H_2O kann sich die Carboxylgruppe einer Aminosäure mit der Aminogruppe einer anderen verbinden (*Peptidbindung*), womit ein Dipeptid entsteht. Das Dipeptid von L-Alanin und L-Serin sähe so aus:



Vom fettgedrucktem C-Atom hat sich also die OH-Gruppe,
vom fettgedruckten N-Atom ein H-Atom abgespalten.

Durch Fortsetzung dieses Vorganges bilden sich mehr oder weniger langkettige *Peptide*; ab etwa 100 aneinandergefügt Aminosäuren spricht man von *Proteinen*.

Bei den Aminosäuren unterscheidet man i. Allg. zwei Stereoisomere, Formen, die gleiche Struktur haben, aber nicht durch räumliche Drehung ineinander überführt werden können. Konventionsgemäß bezeichnet man eine Variante als L-Aminosäure und drückt dies in der Strukturformel dadurch aus, dass bei Stellung der Carboxylgruppe rechts die Aminogruppe nach oben zeigt. Bei den D-Aminosäuren zeigt die Aminogruppe nach unten. Der menschliche Organismus ist praktisch nur in der Lage, L-Aminosäuren zu verwerten; angebotene D-Aminosäuren sind für ihn meist wertlos. Im Übrigen liegen die Aminosäuren im Körper nur zu geringem Anteil in der dargestellten, für das Verständnis fasslicheren Form vor; tatsächlich hat sich das Wasserstoffion der (sauren) Carboxylgruppe an die (basische) Aminogruppe angelagert, sodass eine Dipolstruktur entsteht.

Wie ausgeführt, wird eine Aminosäure auf dem DNA-Strang durch ein *Basentriplett* kodiert. Angenommen, die ersten beiden Glieder des von der Leber zum Alkoholabbau benötigten Enzyms Alkoholdehydrogenase (ADH) seien die Aminosäuren Alanin und Serin. Diese werden auf der DNA durch die Basentriplets Cytosin, Guanin, Adenin (CGA) sowie Adenin, Guanin, Cytosin (ACG) kodiert, und somit besteht der erste Abschnitt des Gens für aus den Basen CGAACG. (Tatsächlich gibt es bei vier Nukleotidbasen $4^3 = 64$ verschiedene Dreierkodone; jede der 20 Aminosäuren ist also durch mehrere Kodone verschlüsselt; der Code ist »degeneriert«.) Diese Information muss nun aus dem Kern zu den Ribosomen im Zytoplasma gebracht werden (den Orten der Eiweißsynthese) und dort ein Aneinanderfügen von Aminosäuren veranlassen; dabei soll mit Alanin begonnen und daran Serin gekoppelt werden.

Der erste Schritt besteht in der *Abschrift des entsprechenden Gens*. Dazu wird der DNA-Doppelstrang geöffnet und nach dem im Rahmen der identischen Reduplikation beschriebenen Verfahren eine Kopie in Form einer *RNA-Kette* erstellt; die ersten Glieder dieser Kette lauten GCUUGC (U = Uracil, das in der RNA Thymin ersetzt). Das die Synthese kontrollierende Enzym wird DNA-abhängige RNA-Polymerase genannt; diese lässt sich pharmakologisch blockieren, wodurch sich die Eiweißsynthese beeinflussen lässt (Prinzip diverser Antibiotika und Zytostatika). Ist die Abschrift des für die Synthese von Alkoholdehydrogenase zuständigen DNA-Abschnitts beendet (dessen Ende durch ein »Stop-Kodon«, ein bestimmtes Basentriplett, gekennzeichnet ist), löst sich die gebildete RNA vom DNA-Strang und transportiert diese Information durch die Kernmembran zu einem Ribosom; dieser RNA-Abschnitt wird deshalb auch *m-RNA* (*messenger-RNA* = *Boten-RNA*) genannt.

Die m-RNA bindet sich an ein Ribosom und wandert an ihm entlang. Kommt über einer bestimmten Stelle des Ribosoms ein Kodon, also ein Basentriplett zu liegen, wird die ihm entsprechende Aminosäure aus dem Zytoplasma herbeigeschafft und verbindet