

Waldeyer – Anatomie des Menschen

Anderhuber · Pera · Streicher (Hrsg.)

Waldeyer – Anatomie des Menschen

Lehrbuch und Atlas in einem Band

Herausgeber

Friedrich Anderhuber, Franz Pera und Johannes Streicher

19., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage

DE GRUYTER

Herausgeber

Prof. Dr. med. Dr. h. c. Friedrich Anderhuber
Medizinische Universität Graz
Institut für Anatomie
Harrachgasse 21
8010 Graz, Österreich
E-Mail: friedrich.anderhuber@medunigraz.at

Prof. em. Dr. med. Franz Pera
Universitätsklinikum Münster
Institut für Anatomie
Vesaliusweg 2-4
48149 Münster
E-Mail: pera.franz@ukmuenster.de

Ao. Prof. Dr. Johannes Streicher
Medizinische Universität Wien
Institut für Anatomie und Zellbiologie
Währinger Straße 13
1090 Wien, Österreich
E-Mail: johannes.streicher@meduniwien.ac.at

Begründer

Prof. Dr. med. et phil. A. Waldeyer,
ehem. Direktor des Anatomischen Institutes
der Humboldt-Universität Berlin
unter Mitarbeit von Dr. med. U. Waldeyer,
ehem. Erste Oberärztin am Anatomischen Institut
der Humboldt-Universität Berlin

Herausgeber und Bearbeiter der 8.–15. Auflage

Prof. Dr. med. A. Mayet,
ehem. Direktor des Anatomischen Institutes
der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

Das Buch enthält 846 Abbildungen und 44 Tabellen.

ISBN 978-3-11-022862-5
e-ISBN 978-3-11-022863-2

Library of Congress Cataloging-in-Publication data
A CIP catalog record for this book has been applied
for at the Library of Congress.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2012 by Walter de Gruyter GmbH & Co. KG,
Berlin/Boston

Der Verlag hat für die Wiedergabe aller in diesem
Buch enthaltenen Informationen (Programme, Ver-
fahren, Mengen, Dosierungen, Applikationen etc.)
mit Autoren bzw. Herausgebern große Mühe darauf
verwandt, diese Angaben genau entsprechend dem
Wissensstand bei Fertigstellung des Werkes abzu-
drucken. Trotz sorgfältiger Manuskriptherstellung
und Korrektur des Satzes können Fehler nicht ganz

ausgeschlossen werden. Autoren bzw. Herausgeber
und Verlag übernehmen infolgedessen keine Ver-
antwortung und keine daraus folgende oder sonstige
Haftung, die auf irgendeine Art aus der Benutzung
der in dem Werk enthaltenen Informationen oder
Teilen davon entsteht.

Die Wiedergabe der Gebrauchsnamen, Handels-
namen, Warenbezeichnungen und dergleichen
in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme,
dass solche Namen ohne weiteres von jedermann
benutzt werden dürfen. Vielmehr handelt es sich
häufig um gesetzlich geschützte, eingetragene Wa-
renzeichen, auch wenn sie nicht eigens als solche
gekennzeichnet sind.

Bildbearbeitung: Andreas Hoffmann und
Christian Groth, Berlin; Andreas Bauer, Graz
Lektorat: Dr. Antje Kronenberg, Gronau
Satz: LVD GmbH, Berlin
Druck: Bosch-Druck GmbH, Ergolding
∞ Gedruckt auf säurefreiem Papier
Printed in Germany
www.degruyter.com

Vorwort zur 19. Auflage

Eigentlich bezweckt die 19. Auflage nichts anderes, als es Anton Waldeyer schon vor 70 Jahren formuliert hatte. Die makroskopische Anatomie, die in den letzten Jahren weltweit einen Niedergang erlitten hatte, was ja auch in den diversen Curricula seinen Niederschlag fand, erlebt nach diesen schlechten Erfahrungen wiederum eine Renaissance. Die „alte“ Anatomie, die sich als Dienerin der Klinik verstand, muss sich mit der weiteren Entwicklung der Klinik ebenso neu orientieren und verliert daher, wie die Klinik selbst, niemals ihre Aktualität.

Das Auf und Ab der Curriculumreformen der letzten Jahre hat gezeigt, dass Studierende letztlich doch am meisten von einem einzigen vollständigen Lehrbuch profitieren, welches sie durchgehend im gesamten Studium und auch im postgraduellen Ausbildungsweg begleitet. Vollständig meint dabei, dass alle Organsysteme, vom Bewegungsapparat bis zur Neuroanatomie, behandelt werden und sowohl systematisch und funktionell als auch, wie für den Präparierkurs unverzichtbar, topografisch betrachtet und dargestellt sind. Gleichzeitig verlangen die aktuellen curricularen Zeitbudgets der Studierenden eine maßvolle Detailtiefe ohne Überladung, gepaart mit einer leicht und schnell verständlichen verbalen und bildlichen Repräsentation.

Das wichtigste Anliegen der Neuauflage war die Verbesserung und Vereinheitlichung der Abbildungen. Hierfür gebührt den Grafikern Andreas Bauer, Graz, und Andreas Hoffmann, Berlin, ein besonderer Dank. Die Reihenfolge der Kapitel wurde der Themenfolge angepasst, wie sie die Curricula vieler Fakultäten für den Präparierkurs vorsehen. Alle Kapitel wurden von den Fachautoren und den Herausgebern inhaltlich überarbeitet und lesefreundlicher gestaltet. Wichtige Übersichten sind gelb, klinische Hinweise grün hinterlegt.

Um den neuen Waldeyer auch „tragbarer“ zu machen, haben wir auf die bisherigen Kapitel Blut, Genetik und Allgemeine Embryologie verzichtet und verweisen die Studierenden hierfür auf die Lehrbücher der Biologie, Histologie und Entwicklungsgeschichte. Die organbezogene Entwicklungsgeschichte wurde in die entsprechenden Kapitel integriert. Das Anatomische Glossar, das bei vielen Benutzern der 17. und 18. Auflage große Zustimmung erfuhr, wurde ausgegliedert und ist stattdessen als handliches Taschenbuch unter dem Titel „Medizinischer Wortschatz“ erhältlich. Mit seiner Hilfe werden die im „Waldeyer“ verwendeten anatomischen und klinischen Fachausdrücke auf ihre sprachliche Herkunft zurückgeführt, damit die zunächst so fremd klingenden Fachausdrücke verständlich werden.

Zusätzlich wird die „Tragbarkeit“ noch durch die Verfügbarkeit als e-book bzw. iBook/App für Tablet-Computer verbessert, womit der „Waldeyer“ trotz seines Umfangs zum physisch unbeschwerlichen *Vademecum* konvertiert.

Die Herausgeber sind den Mitarbeitern des Verlages de Gruyter für die Initiative zur Neuauflage dankbar; insbesondere Frau Dr. Petra Kowalski danken wir für ihr erfolgreiches Bemühen, innerhalb relativ kurzer Zeit aus dem alten einen doch recht „neuen“ Waldeyer zu machen. Frau Dr. Antje Kronenberg, Frau Dr. Britta Nagl und Frau Marie-Rose Dobler möchten wir für die gute Zusammenarbeit während der Fertigstellungsphase des Buches danken.

Graz, Münster und Wien, Friedrich Anderhuber
Mai 2012 Franz Pera
Johannes Streicher

Aus dem Vorwort zur 1. Auflage

Es ist nicht die Aufgabe eines Grundrisses der Anatomie, das gewaltige Tatsachenmaterial der großen anatomischen Lehr- und Handbücher auf möglichst engem Raum zusammenzudrängen. Ein Grundriß soll vielmehr eine Sichtung des Stoffes vornehmen, das Wesentliche herauschälen, durch Darstellung, Druck, Bild usw. hervorheben und das weniger Wichtige zurückdrängen. Nur so kann er dem Anfänger, der in der Fülle der systematischen Tatsachen zu ersticken droht, ein Führer sein.

Richtschnur für die Auswahl und Anordnung des Stoffes muß der Gesichtspunkt sein, daß es die vornehmste Aufgabe der Anatomie ist, dem Arzte das nötige Rüstzeug für sein praktisches Handeln zu geben. Es wurde deshalb der Versuch unternommen, schon frühzeitig von der systematischen Anatomie zur topographischen Anatomie, von der Analyse zur Synthese vorzudringen, den Bau des lebenden Menschen zu erfassen.

Es erschien mir notwendig, den spröden Stoff der Anatomie durch Betonung funktioneller Zusammenhänge und durch Hinweise auf Nachbargebiete, auf die Physiologie, Pathologie und Klinik zu beleben. Manchen mag diese Art der Darstellung unwissenschaftlich erscheinen. Doch weiß ich aus Erfahrung, wie gerade der strebsame Stu-

dent aufhorcht, wenn er auch nur kleine Hinweise auf Anwendungsmöglichkeiten, die er auch ohne genaue Kenntnis des Krankheitsbildes verstehen kann, erhält.

Entwicklungsgeschichtliche und vergleichend-anatomische Tatsachen sind nur so weit ... eingeflochten, wie es für das Verständnis endgültiger Formen und zur Erklärung von Varietäten notwendig erscheint. Die Zellen- und Gewebelehre wird in einem allgemeinen Abschnitt über die Baumaterialien des Körpers vorausgeschickt. ...

Es entspricht der Absicht des Verlages, wenn dem Text eine große Zahl von Abbildungen beigegeben wurde. Sie sollen nicht mit den Abbildungen bewährter Atlanten und Lehrbücher wetteifern. Sie gestatten aber die knappe Fassung des Textes und ermöglichen es, daß der Grundriß auch ohne Zuhilfenahme größerer Werke verwendet werden kann.

Mit Verehrung und Dankbarkeit gedenke ich meiner anatomischen Lehrer, besonders Rudolf Ficks und Wilhelm v. Möllendorff, wenn ich auch in der Art der Darstellung eigenwillige Wege gegangen bin.

Babelsberg, Februar 1942

A. Waldeyer

Wer war Waldeyer?



Anton Johannes Waldeyer, 1901–1970 (aus dem Besitz des Institutes für Anatomie der Charité).

Anton Johannes Waldeyer (1901–1970) wurde in einer westfälischen Bauernfamilie in Tietelsen geboren. Wilhelm von Waldeyer-Hartz (1836–1921) war sein Großonkel. Beide Waldeyer hatten in Paderborn ihre Schulausbildung und katholische Weltanschauung erfahren. Dennoch waren Anton Waldeyer scholastisches Denken und Dogmatismus in der Wissenschaft fremd. Anatomie lernte er in Münster bei Emil Ballowitz, später in Berlin bei weiteren namhaften Anatomen (u. a. Rudolf Fick, Franz Kopsch).

Curriculum vitae. Nach dem medizinischen Vorexamen studierte er in Würzburg (mit Zwischensemestern in München, wo er 1925 mit einem anthropologischen Thema promovierte). Schon in dieser Zeit war er in der Anatomie tätig und brachte einen Teil seiner Medizinalpraktikantenzeit in diesem Fach. Insbesondere die Präparierübungen verbanden ihn nachhaltig mit der Anatomie. 1927 wurde er approbiert. Noch im gleichen Jahr pro-

movierte er ein weiteres Mal, diesmal in Würzburg mit einem Thema der vergleichenden Anatomie. Er ging dann nach Kiel, später nach Freiburg. Seine erste Professur erhielt er in China und erlebte alle sprachlichen, ethnischen und mit dem chinesischen Leichenwesen verbundenen Schwierigkeiten. Seine Bestrebungen, die Ausbildung optimal zu gestalten, erhielten hier vielleicht ihre stärksten Impulse. Er wollte morphologisch und funktionell denkende Ärzte und keine reinen Morphologen heranbilden. 1935 wechselte Anton Waldeyer nach Berlin.

Lehrbuchautor. 1942 erschien der erste Band der Anatomie des Menschen, ein Grundriss für Studierende und Ärzte, in dem er weg von den damaligen Gepflogenheiten zur angewandten (funktionellen) Anatomie vorzudringen suchte. Die Originalität wurde von der Fachwelt anerkannt, das Werk aber als für Studierende ungeeignet eingestuft. Diese Auffassung teilten die Studierenden gar nicht. Innerhalb eines Jahres war die erste Auflage bereits vergriffen, für diese Zeit äußerst ungewöhnlich. Der Krieg zerstörte den Umbruch des zweiten Bandes. Doch der Verlag wagte später einen Neuanfang in Wien, und dieser Band konnte 1950 erscheinen. Nachdem der erste Band zehn Jahre lang vergriffen war, konnte 1953 die zweite Auflage herausgebracht werden. Waldeyer lehrte inzwischen in Münster, kehrte aber später nach Berlin zurück. Er widmete sich dem dortigen Wiederaufbau des im 2. Weltkrieg zerstörten Anatomischen Instituts. Den Unterricht konzipierte Waldeyer nach seinen Vorstellungen komplett neu, führte „Anatomie am Lebenden“ ein und kämpfte ständig mit der Anpassung der Anatomieausbildung an die zunehmenden Kürzungen. Hierin sah er eine intensive Bedrohung der nur durch Praxis schulbaren Fähigkeiten im Beobachten und exakten Arbeiten. Er wollte, „dass durch die Inanspruchnahme neuer Hirnrindfelder, durch neue Engramme, die Haftfähigkeit verbessert, d. h. die Erinnerungsbilder fester verankert werden“.

Eponyme. Während der Mittelpunkt von Anton Waldeyers Tätigkeit die Ausbildung von Studenten

war, ist die Mehrzahl der namentlichen Assoziationen mit anatomischen Entitäten auf Wilhelm Waldeyer-Hartz zurückzuführen. Viele davon sind insbesondere von klinischer Relevanz (Waldeyer-Rachenring). Beziehung zu Studierenden. Bei seinen Studierenden war der eher kleinwüchsige, kräftige Anton Waldeyer überaus beliebt, galt als

sehr gütig und als Helfer. In den Prüfungen war er hingegen durchaus gefürchtet. Mit dem „Greifer“, wie er seine Pinzette nannte, tippte er auf einzelne Strukturen (und stopfte mit ihm zwischendurch auch mal seine Pfeife nach), die dann kurz und prägnant benannt werden mussten. Herumschwätzen des Prüflings liebte er nicht.

Autoren

Prof. Dr. med. Dr. h. c. Friedrich Anderhuber
Medizinische Universität Graz
Institut für Anatomie
Harrachgasse 21
8010 Graz, Österreich
E-Mail: friedrich.anderhuber@meduni-graz.at

Prof. Dr. med. Ingo Bechmann
Universität Leipzig
Institut für Anatomie
Liebigstr. 13
04103 Leipzig
E-Mail: Ingo.Bechmann@medizin.uni-leipzig.de

Prof. Dr. med. Timm J. Filler
Sektion für Klinische Anatomie
Universitätsstr. 1 Geb. 22.05
40225 Düsseldorf
E-Mail: timm.filler@uni-duesseldorf.de

Prof. Dr. med. Richard H.W. Funk
Universitätsklinikum Carl Gustav Carus
Institut für Anatomie I
Fetscherstraße 74
01307 Dresden

Prof. em. Dr. med. habil. Werner Linß
Friedrich-Schiller-Universität Jena
Institut für Anatomie
Teichgraben 7
07743 Jena
E-Mail: w.linss@uni-jena.de

Prof. Dr. med. Robert Nitsch
Universitätsmedizin Mainz
Institut für mikroskopische Anatomie und Neuro-
biologie
Langenbeckstraße 1
55131 Mainz
E-Mail: robert.nitsch@unimedizin-mainz.de

Prof. em. Dr. med. Franz Pera
Universitätsklinikum Münster
Institut für Anatomie
Vesaliusweg 2–4
48149 Münster
E-Mail: pera.franz@ukmuenster.de

Dr. med. Elmar T. Peuker
Hausarztzentrum Münster
Schaumburgstr. 1–3
48145 Münster
E-Mail: peuker@integrative-medin.de

Ass.-Prof. Dr. Michael Leopold Pretterklieber
Medizinische Universität Wien
Zentrum für Anatomie und Zellbiologie
Währinger Straße 13
1090 Wien, Österreich
E-Mail: michael.pretterklieber@meduniwien.ac.at

Prof. Dr. med. Gebhard Reiss
Institut für Anatomie und klinische Morphologie
Fakultät für Gesundheit
Universität Witten-Herdecke
Alfred-Herrhausen-Straße 50
58448 Witten
E-Mail: greiss@uni-wh.de

Ao. Prof. Dr. Johannes Streicher
Medizinische Universität Wien
Institut für Anatomie und Zellbiologie
Währinger Straße 13
1090 Wien, Österreich
E-Mail: johannes.streicher@meduniwien.ac.at

Assoc. Prof. Andreas H. Weiglein
Institut für Anatomie
Medizinische Universität Graz
Harrachgasse 21
8010 Graz, Österreich
E-Mail: andreas.weiglein@meduni-graz.at

Wissenschaftliche Mitarbeiter

Verlag, Herausgeber und Autoren danken den nachstehenden Wissenschaftlern und Studenten, die mit ihrem fachlichen Rat und ihren Hinweisen zu den klinischen Bezügen sowie mit kritischer Durchsicht von Texten die Arbeit an diesem Buch unterstützend begleitet haben:
Norbert Naber, Christoph Triska

Inhalt

Kapitel 1

Gegenstand und Arbeitsgebiete der Anatomie

Franz Pera, Timm J. Filler

1.1 Was ist Anatomie?	1
1.1.1 Definition der Humananatomie	1
1.1.2 Einteilung des Faches	1
1.1.3 Fachrichtungen in der Anatomie	1
1.1.4 Betrachtungsmöglichkeiten in der Anatomie	2
1.1.5 Bedeutung des Faches	3
1.2 Anatomie früher und heute	4
1.3 Einführung in den Präparierkurs	4
1.3.1 Wer sind die Körperspender?	5
1.3.2 Was geschieht im Präparierkurs?	5
1.3.3 Rechtliche Fragen	6
1.3.4 Psychische Situation	6
1.3.5 Vorbereitung auf den Kurs	7
1.3.6 Weiterführende Gedanken zum Präparierkurs	7
1.4 Leichenkonservierung	8

Kapitel 2

Allgemeine Anatomie

Timm J. Filler, Franz Pera, Friedrich Anderhuber

2.1 Bauplan des menschlichen Körpers	11
2.1.1 Unterteilung des Körpers	11
2.1.1.1 Orientierung am Körper	11
2.1.2 Gliederung des Körpers	13
2.1.3 Geschlechtsdimorphismus	14
2.1.4 Körperbautypen	15
2.1.5 Wachstum	16
2.1.5.1 Kindliches Wachstum und Entwicklung	18
2.1.5.2 Wachstum auf Organ- und Zellebene	19
2.2 Aufbau des Organismus	19
2.2.1 Die Zelle	20
2.2.2 Die Gewebe	20
2.2.2.1 Epithelgewebe	21
2.2.2.2 Binde- und Stützgewebe	27
2.2.2.3 Muskelgewebe	34
2.2.2.4 Nervengewebe	36
2.2.3 Organe und Organsysteme	40
2.3 Herz-Kreislauf-System	40
2.3.1 Kreislauf	41
2.3.1.1 Aufgaben und Einteilung des Kreislauf-Systems	41
2.3.1.2 Großer und kleiner Kreislauf	42

2.3.1.3 Pfortaderkreislauf	42
2.3.1.4 Pränataler Kreislauf	42
2.3.1.5 Uteroplazentarer Kreislauf	44
2.3.2 Gefäße	44
2.3.2.1 Aufgaben und Einteilung des Gefäßsystems	44
2.3.2.2 Allgemeiner Wandbau	44
2.3.2.3 Mechanik des Gefäßsystems	45
2.3.2.4 Blutdruck	46
2.3.2.5 Verteilung des Blutes im Blutgefäßsystem	47
2.3.2.6 Rezeptoren in den Gefäßwänden	47
2.3.2.7 Nervöse Versorgung	48
2.3.2.8 Endo- und parakrine Regulatoren	48
2.3.2.9 Anordnung, Verlauf und Dehnbarkeit der Gefäße	48
2.3.2.10 Arterien und Arteriolen	49
2.3.2.11 Kapillaren und Sinus	51
2.3.2.12 Venen und Venolen	52
2.3.2.13 Gefäßtypen nach dem Versorgungsmodus	54
2.3.2.14 Drossel- und Sperrgefäße	55
2.3.2.15 Anastomosen	55
2.3.2.16 Anatomische und funktionelle Endgefäße	57
2.3.2.17 Vasa vasorum	57
2.3.3 Übersicht über die großen Arterienstämme	58
2.3.3.1 Körperkreislauf	58
2.3.3.2 Lungenkreislauf	60
2.3.4 Kurze Übersicht über die großen Venenstämme	60
2.3.4.1 Körperkreislauf	60
2.3.4.2 Lungenkreislauf	61
2.3.5 Immunkompetente Organe, lymphatisches Gewebe	61
2.3.5.1 Lymphknoten, Nodus lymphoideus (Lymphonodus)	61
2.3.6 Lymphgefäße, Vasa lymphoidei	63
2.3.6.1 Einteilung der Lymphgefäße	63
2.3.6.2 Lymphfluss	63
2.3.6.3 Mandeln, Tonsillen	65
2.3.6.4 Bries, Thymus	65
2.3.6.5 Milz, Lien, Splen	65
2.3.6.6 Schleimhautassoziiertes Lymphgewebe, Mucosa Associated Lymphatic Tissue (MALT)	65
2.3.6.7 Wurmfortsatz, Appendix vermiformis	65
2.4 Nervensystem, Systema nervosum	65

2.4.1	Einteilung des Nervensystems	65	4.1.1.4	Knochenentwicklung und Knochenwachstum	99
2.4.2	Grundbegriffe zum Gehirn des Menschen.....	66	4.1.1.5	Apophysen.....	100
2.4.3	Funktionelle Systeme des Zentralnervensystems (ZNS).....	67	4.1.1.6	Biomechanik von Knochen	100
2.4.4	Sinnesorgane, Organa sensuum	68	4.1.1.7	Knochenphysiologie und -pathologie	101
2.4.5	Peripheres Nervensystem, Pars peripherica (Systema nervosum periphericum)	69	4.1.2	Arthrologie, allgemeine Gelenklehre	101
2.4.5.1	Spinalnerven, Nn. spinales	69	4.1.2.1	Synarthrosen, kontinuierliche Knochenverbindungen	101
2.4.5.2	Hirn-(Kopf-)nerven, Nn. craniales ...	70	4.1.2.2	Diarthrosen, Articulationes, diskontinuierliche Knochenverbindungen..	103
2.4.5.3	Anastomosen und Plexusbildung	71	4.1.2.3	Propriozeption im passiven Bewegungsapparat	108
2.4.5.4	Periphere und radikuläre Hautinnervation	71	4.1.3	Myologie, allgemeine Skelettmuskellehre	108
2.4.6	Vegetatives Nervensystem (VNS), Divisio autonómica (Pars autonómica systematis nervosi peripherici)	72	4.1.3.1	Aufbau und Formen des Skelettmuskels.....	108
2.4.6.1	Übersicht über das VNS.....	73	4.1.3.2	Biomechanik des Skelettmuskels	113
2.4.6.3	Transmitter des VNS und ihre Rezeptoren	76	4.1.3.3	Innervation	115
2.4.6.4	Entwicklung des VNS.....	76	4.1.3.4	Durchblutung	115
2.4.6.5	Pars sympathica, Sympathicus	77	4.1.3.5	Abkürzungen	115
2.4.6.6	Pars parasympathica, Parasympathicus	80	4.2	Bewegungsapparat des Rumpfes	116
2.4.6.7	Trophische Innervation	81	4.2.1	Hintere Rumpfwand	117
2.4.6.8	Reflexe	82	4.2.1.1	Columna vertebralis, Wirbelsäule ...	117
2.4.6.9	Übergeordnete vegetative Zentren ..	82	4.2.1.2	Rückenmuskulatur	130
2.4.6.10	Enterisches Nervensystem (ENS)	83	4.2.1.3	Faszien des Rückens	139
			4.2.1.4	Arterien des Rückens	140
			4.2.1.5	Venen des Rückens.....	140
			4.2.1.6	Nerven des Rückens	141
			4.2.1.7	Regio nuchae, Nackenregion.....	141
			4.2.2	Ventrolaterale Brustwand.....	143
			4.2.2.1	Äußere Aspekte	143
			4.2.2.2	Oberflächliche Schicht der Brustwand	147
			4.2.2.3	Rumpf-Schultergürtelmuskulatur....	153
			4.2.2.4	Skeleton thoracis, Musculi intercostales und segmentale Leitungsbahnen	153
			4.2.2.5	Binnenschichten der Brustwand.....	166
			4.2.3	Ventrolaterale Bauchwand.....	168
			4.2.3.1	Schichten der ventrolateralen Bauchwand	168
			4.2.3.2	Ventrolaterale Bauchmuskeln	170
			4.2.3.3	Binnenschichten der Bauchwand....	179
			4.2.3.4	Ligamentum inguinale, Leistenband und Canalis inguinalis, Leistenkanal	182
			4.2.4	Hintere Bauchwand.....	184
			4.2.5	Leitungsbahnen der Bauchwand....	185
			4.2.5.1	Arterien	185
			4.2.5.2	Venen.....	186
			4.2.5.3	Lymphgefäße	187
			4.2.5.4	Nerven	187
			4.2.6	Angewandte Anatomie: Hernien	189
			4.2.6.1	Hernia inguinalis	189
			4.2.6.2	Weitere Hernien	191

Kapitel 3

Haut, Integumentum commune Anhangsgebilde: Drüsen, Glandulae; Haare, Pili, und Nägel, Ungues.....

Werner Linß

3.1	Oberhaut, Epidermis	85
3.2	Lederhaut, Dermis, Corium	86
3.3	Unterhaut, Tela subcutanea, Subcutis	87
3.4	Anhangsgebilde der Haut	88
3.4.1	Haare	88
3.4.2	Finger- und Zehennägel, Ungues	89
3.4.3	Drüsen.....	90
3.5	Gefäße der Haut.....	91
3.6	Hautnerven, Hautsinne	91

Kapitel 4

Bewegungsapparat

Johannes Streicher, Michael L. Pretterklieber

4.1	Allgemeine Knochen-, Gelenk- und Muskellehre.....	95
4.1.1	Osteologie, allgemeine Knochenlehre.....	95
4.1.1.1	Knochenarten	95
4.1.1.2	Aufbau eines Knochens	96
4.1.1.3	Knochenformen	98

4.3	Membrum superius, obere Extremität	192	4.3.4.4	A. ulnaris.....	252
4.3.1	Ossa membri superioris.....	196	4.3.4.5	A. interossea communis.....	253
4.3.1.1	Scapula, Schulterblatt.....	196	4.3.5	Venae membri superioris.....	253
4.3.1.2	Clavicula, Schlüsselbein.....	197	4.3.5.1	Venae superficiales.....	253
4.3.1.3	Humerus, Oberarmbein.....	199	4.3.5.2	Venae profundae.....	256
4.3.1.4	Ulna, Elle.....	201	4.3.6	Vasa lymphatica und Nodi lymphoidei membri superioris.....	256
4.3.1.5	Radius, Speiche.....	201	4.3.7	Nervi membri superioris.....	257
4.3.1.6	Ossa carpi, Ossa carpalia, Handwurzelknochen.....	203	4.3.7.1	Plexus brachialis (C5–Th1).....	257
4.3.1.7	Ossa metacarpi, Ossa metacarpalia, Mittelhandknochen.....	204	4.3.8	Topografische und Angewandte Anatomie der oberen Extremität.....	264
4.3.1.8	Ossa digitorum manus, Phalanges, Fingerknochen.....	205	4.3.8.1	Regio infraclavicularis, Unterschlüsselbeinregion.....	264
4.3.2	Juncturae membri superioris.....	207	4.3.8.2	Regio axillaris, Achselregion.....	266
4.3.2.1	Articulatio sternoclavicularis.....	207	4.3.8.3	Spatium axillare, Achselhöhle.....	267
4.3.2.2	Articulatio acromioclavicularis.....	207	4.3.8.4	Regio deltoidea, seitliche Schulterregion.....	270
4.3.2.3	Syndesmoses cinguli pectoralis, Eigenbänder der Scapula.....	208	4.3.8.5	Regio scapularis, Schulterblattregion.....	272
4.3.2.4	Articulatio humeri, Articulatio glenohumeralis, Schultergelenk.....	209	4.3.8.6	Regio brachii anterior, Beugerloge.....	273
4.3.2.5	Articulatio cubiti, Ellenbogengelenk.....	212	4.3.8.7	Regio brachii posterior, Streckerloge.....	275
4.3.2.6	Syndesmosis radioulnaris, Speichen-Ellen-Bindegewebschaft.....	216	4.3.8.8	Regio cubitalis anterior, Ellenbeuge.....	277
4.3.2.7	Articulatio radioulnaris distalis, Distales Speichen-Ellen-Gelenk.....	217	4.3.8.9	Regio cubitalis posterior, Hintere Ellenbogenregion.....	281
4.3.2.8	Articulatio radiocarpalis, proximales Handgelenk.....	218	4.3.8.10	Regio antebrachii anterior, Beuge-seite des Unterarms.....	282
4.3.2.9	Articulatio mediocarpalis, distales Handgelenk.....	219	4.3.8.11	Regio antebrachii posterior, Streck-seite des Unterarms.....	283
4.3.2.10	Articulatio carpometacarpalis pollicis, Daumensattelgelenk.....	221	4.3.8.12	Regio carpalis anterior, Handgelenkbeugeseite.....	285
4.3.2.11	Articulatio carpometacarpalis II–V, Handwurzel-Mittelhandgelenke.....	222	4.3.8.13	Palma (Vola) manus, Hohlhand.....	288
4.3.2.12	Articulationes intermetacarpales, Gelenke zwischen Mittelhandknochen.....	222	4.3.8.14	Dorsum manus, Handrücken.....	291
4.3.2.13	Articulationes metacarpophalangeae, Fingergrundgelenke.....	222	4.3.8.15	Digitus manus, Finger.....	293
4.3.2.14	Articulationes interphalangeae manus, Fingergelenke.....	223	4.4	Untere Extremität, Membrum inferius	295
4.3.3	Musculi membri superioris.....	224	4.4.1	Ossa membri inferioris liberi.....	306
4.3.3.1	Ventrale Rumpf-Gliedmaßenmuskulatur.....	224	4.4.1.1	Femur, Os femoris, Oberschenkelbein.....	306
4.3.3.2	Schultermuskeln.....	227	4.4.1.2	Patella, Kniescheibe.....	307
4.3.3.3	Zusammenspiel der Schultermuskeln.....	232	4.4.1.3	Tibia, Schienbein.....	308
4.3.3.4	Oberarmmuskeln.....	233	4.4.1.4	Fibula, Wadenbein.....	310
4.3.3.5	Unterarmmuskeln.....	234	4.4.1.5	Ossa pedis, Fußskelett.....	310
4.3.3.6	Kurze Handmuskeln.....	244	4.4.2	Juncturae membri inferioris liberi.....	315
4.3.3.7	Faszien und Sehnenscheiden der oberen Extremität.....	246	4.4.2.1	Articulatio coxae (coxofemoralis), Hüftgelenk.....	315
4.3.4	Arteriae membri superioris.....	249	4.4.2.2	Articulatio genus, Kniegelenk.....	320
4.3.4.1	A. axillaris.....	249	4.4.2.3	Articulatio tibiofibularis, Schienbein-Wadenbein-Gelenk.....	331
4.3.4.2	A. brachialis.....	251	4.4.2.4	Membrana interossea cruris, Schienbein-Wadenbein-Membran.....	331
4.3.4.3	A. radialis.....	252	4.4.2.5	Syndesmosis tibiofibularis, Schienbein-Wadenbein-Bandhaft.....	332
			4.4.2.6	Articulatio talocruralis, oberes Sprunggelenk.....	332

4.4.2.7 Articulatio subtalaris (talocalcanea) und Articulatio talocalcaneonavicularis, unteres Sprunggelenk 336

4.4.2.8 Articulatio calcaneocuboidea, Fersenbein-Würfelbein-Gelenk 337

4.4.2.9 Articulatio cuneonavicularis, Keilbein-Kahnbein-Gelenk, Articulationes intercuneiformes, Zwischenkeilbein-Gelenke, Articulatio cuneocuboidea, Keilbein-Würfelbein-Gelenk..... 337

4.4.2.10 Articulationes tarsometatarsales, Fußwurzel-Mittelfußgelenke 337

4.4.2.11 Articulationes intermetatarsales, Gelenke zwischen den Mittelfußknochen 339

4.4.2.12 Articulationes metatarsophalangeae, Zehengrundgelenke 339

4.4.2.13 Articulationes interphalangeae pedis proximales et distales, Mittel- und Endgelenke der Zehen 339

4.4.2.14 Der Fuß als Ganzes..... 339

4.4.3 Musculi membri inferioris 342

4.4.3.1 Innere oder vordere Hüftmuskeln.... 342

4.4.3.2 Äußere oder hintere Hüftmuskeln 342

4.4.3.3 Oberschenkelmuskeln 347

4.4.3.4 Unterschenkelmuskeln 353

4.4.3.5 Fußmuskeln 360

4.4.3.6 Faszien der unteren Extremität 362

4.4.3.7 Sehnscheiden des Fußes 367

4.4.4 Arteriae membri inferioris 368

4.4.4.1 Arteria iliaca externa..... 368

4.4.4.2 Arteria femoralis 368

4.4.4.3 Arteria profunda femoris 368

4.4.4.4 Arteria poplitea 371

4.4.4.5 Arteria tibialis anterior 371

4.4.4.6 Arteria tibialis posterior..... 371

4.4.4.7 Arteria peronea (fibularis) 371

4.4.4.8 Arteria dorsalis pedis 372

4.4.4.9 Arteria plantaris medialis 372

4.4.4.10 Arteria plantaris lateralis 372

4.4.4.11 Arteria iliaca interna 372

4.4.5 Venae membri inferioris 373

4.4.6 Vasa lymphatica und Nodi lymphoidei membri inferioris 375

4.4.7 Nervi membri inferioris..... 375

4.4.7.1 Plexus lumbalis (Th12–L4)..... 376

4.4.7.2 Plexus sacralis (L4–S3) 380

4.4.8 Topografische und Angewandte Anatomie der unteren Extremität..... 383

4.4.8.1 Regio glutealis, Gesäßregion..... 383

4.4.8.2 Regio femoris, Oberschenkelregion 387

4.4.8.3 Regio genus, Knieregion 396

4.4.8.4 Regio cruris, Unterschenkelregion .. 400

4.4.8.5 Regio pedis, Fußregion 405

Kapitel 5
Innere Organe in Thorax, Abdomen und Becken 427

Friedrich Anderhuber, Timm J. Filler, Franz Pera, Elmar T. Peuker

5.1 Brustraum, Cavitas thoracis, mit Zwerchfell, Diaphragma 427

5.1.1 Zwerchfell, Diaphragma 427

5.1.2 Der Thorax als Ganzes und Mechanik der Atmung 432

5.1.2.1 Einatmung 433

5.1.2.2 Ausatmung 433

5.1.2.3 Thoraxform und Atmungstyp 436

5.1.2.4 Komplementäräume 436

5.1.3 Lunge, Pulmo 436

5.1.3.1 Entwicklung 437

5.1.3.2 Topografie 438

5.1.3.3 Lungenlappen, Lobi pulmonis..... 442

5.1.3.4 Bronchialbaum, Arbor bronchialis und Lungensegmente, Segmenta bronchopulmonalia 443

5.1.3.5 Lungenläppchen, Lobuli pulmonales..... 446

5.1.3.6 Gefäße der Lunge 446

5.1.3.7 Nerven 448

5.1.3.8 Atemregulation 449

5.1.3.9 Atmungsbewegung und Verformung der Lunge 449

5.1.3.10 Feinbau der Lunge 450

5.1.4 Mittelfellraum, Mediastinum..... 453

5.1.4.1 Herz, Cor..... 453

5.1.4.2 Große Gefäße des Mediastinums 489

5.1.4.4 Luftröhre, Trachea 500

5.1.4.5 Speiseröhre, Oesophagus..... 502

5.1.4.6 Brustmilchgang, Ductus thoracicus. 506

5.1.4.7 Lymphsystem des Brustraumes..... 507

5.1.4.8 Nervus vagus..... 508

5.1.4.9 Grenzstrang, Truncus sympathicus . 509

5.1.4.10 Nervus phrenicus..... 510

5.2 Bauchhöhle, Cavitas abdominalis (abdominalis) 511

5.2.1.1 Lage der Bauchorgane zum Peritoneum 512

5.2.1.2 Entstehung des Bauchsitus 512

5.2.2 Oberbauch und seine Eingeweide.. 523

5.2.2.1 Topografischer Überblick 523

5.2.2.2 Netzbeutel, Bursa omentalis 525

5.2.2.3 Organe des Oberbauches 527

5.2.3 Der Unterbauch und seine Eingeweide..... 561

5.2.3.1 Topografischer Überblick 561

5.2.3.2 Peritoneale Falten und Buchten 566

5.2.3.3 Übersicht über den Aufbau der Darmwand 567

5.2.3.4 Dünndarm, Intestinum tenue 570

5.2.3.5 Dickdarm, Intestinum crassum..... 575

5.2.4 Retroperitonealraum, Spatium retroperitoneale 581

5.2.4.1 Niere, Ren (Nephros) 581

5.2.4.3 Nierenbeckenkelchsystem und Harnleiter 592

5.2.4.4 Nebennieren, Glandulae suprarenales 593

5.2.4.5 Lendengegend, Regio lumbalis 596

5.2.4.6 Leitungsbahnen im Retroperitonealraum 598

5.3 Becken, Pelvis, Beckenhöhle, Cavitas pelvis 601

5.3.1 Knochen des Beckengürtels, Ossa cinguli membri inferioris, Knochenverbindungen, Juncturae cinguli pelvici 602

5.3.1.1 Hüftbein, Os coxae 602

5.3.1.2 Das Becken als Ganzes 607

5.3.2 Beckenboden, Diaphragma pelvis et Diaphragma urogenitale, und Damm, Perineum 612

5.3.2.1 Diaphragma pelvis 612

5.3.2.2 Diaphragma urogenitale 616

5.3.3 Räume des kleinen Beckens, Bauchfellverhältnisse, Beckenfaszie, Fascia pelvis, Faszienräume, Spatia, Fossa ischioanalis (ischiorectalis) 617

5.3.3.1 Gliederung 617

5.3.3.2 Spatium extraperitoneale pelvis 617

5.3.3.3 Fascia pelvis 617

5.3.3.4 Faszienräume des kleinen Beckens.. 619

5.3.4 Öffnungen in der Wand des kleinen Beckens 622

5.3.4.1 Canalis obturatorius 622

5.3.4.2 Foramina ischiadica 622

5.3.5 Organe des Magen-Darm-Kanals und des harnableitenden Systems ... 622

5.3.5.1 Mastdarm, Rectum 622

5.3.5.2 Beckenteil des Harnleiters, Pars pelvica et intramuralis ureteris 628

5.3.5.3 Harnblase, Vesica urinaria 629

5.3.5.4 Harnröhre, Urethra 634

5.3.6 Geschlechtsorgane, Organa genitalia 635

5.3.6.1 Übersicht über weibliche und männliche Geschlechtsorgane, Organa genitalia feminina et masculina 635

5.3.6.2 Innere weibliche Geschlechtsorgane, Organa genitalia feminina interna 639

5.3.6.3 Äußere weibliche Geschlechtsorgane, Pudendum femininum (Vulva, Cunnus) 676

5.3.6.4 Innere männliche Geschlechtsorgane, Organa genitalia masculina 680

5.3.6.5 Äußere männliche Geschlechtsorgane 692

Kapitel 6 Kopf, Cranium und Hals, Collum 697
Andreas H. Weiglein

6.1 Gliederung und Einteilung 697

6.1.1 Cranium (Schädel) im Überblick 697

6.1.2 Ossa cranii im Überblick 699

6.1.3 Lufthaltige Knochen (Ossa pneumatia) 700

6.2 Schädelansichten 700

6.2.1 Ansicht von oben, Norma verticalis 700

6.2.2 Ansicht von der Seite, Norma lateralis 700

6.2.3 Ansicht von vorne, Norma frontalis.. 701

6.2.4 Ansicht von hinten, Norma occipitalis 703

6.2.5 Innenansicht der Calvaria 703

6.3 Schädelbasis, Basis cranii 703

6.3.1 Äußere Schädelbasis, Basis cranii externa 703

6.3.2 Innere Schädelbasis, Basis cranii interna 706

6.3.2.1 Vordere Schädelgrube, Fossa cranii anterior 706

6.3.2.2 Mittlere Schädelgrube, Fossa cranii media 706

6.3.2.3 Hintere Schädelgrube, Fossa cranii posterior 709

6.4 Höhlen und Gruben 709

6.4.1 Viscerocranium 709

6.4.1.1 Augenhöhle, Orbita 709

6.4.1.2 Öffnungen der Orbita 710

6.4.1.3 Inhalt der Orbita 712

6.4.1.4 Nasenhöhle, Cavitas nasi und Nasennebenhöhlen, Sinus paranasales 712

6.4.2 Seitliche Schädelgegend 712

6.4.2.1 Schläfengrube, Fossa temporalis 712

6.4.2.2 Unterschläfengrube, Fossa infratemporalis 712

6.4.2.3 Flügelgaumengrube, Fossa pterygopalatina 713

6.5 Schädelknochen, Ossa cranii 713

6.5.1 Gehirnschädel, Neurocranium 713

6.5.1.1 Stirnbein, Os frontale 713

6.5.1.2 Hinterhauptbein, Os occipitale 715

6.5.1.3 Keilbein (früher auch Wespensbein), Os sphenoidale 715

6.5.1.4 Scheitelbein, Os parietale 718

6.5.1.5 Nahtknochen, Ossa suturalia, und Fontanelleknöchen 718

6.5.1.6 Schläfenbein, Os temporale 718

6.5.2 Viscerocranium 722

6.5.2.1	Siebbein, Os ethmoidale.....	722	6.10.1.1	Augenringmuskeln.....	744
6.5.2.2	Untere Nasenmuschel, Concha nasalis inferior	722	6.10.1.2	Nasenringmuskeln.....	746
6.5.2.3	Nasenbein, Os nasale.....	723	6.10.1.3	Mundringmuskeln.....	746
6.5.2.4	Pflugscharbein, Vomer.....	723	6.10.1.4	Radiäres orales Muskelsystem	747
6.5.2.5	Tränenbein, Os lacrimale	723	6.10.1.5	Ohrmuskeln.....	748
6.5.2.6	Jochbein, Wangenbein, Os zygo- maticum	723	6.10.1.6	Muskeln des Schädeldachs	748
6.5.2.7	Gaumenbein, Os palatinum.....	724	6.10.1.7	Bedeutung der mimischen Musku- latur.....	749
6.5.2.8	Oberkiefer, Oberkieferbein, Maxilla	724	6.10.2	Kaumuskeln, Mm. masticatorii.....	749
6.5.2.9	Unterkiefer, Mandibula.....	726	6.11	Aufbau und Muskulatur des Halses, Musculi colli.....	752
6.5.2.10	Zungenbein, Os hyoideum	728	6.11.1	Aufbau des Halses	752
6.5.2.11	Gehörknöchelchen, Ossicula auditus.....	728	6.11.2	Halswirbelsäule	752
6.5.3	Geschlechtsdimorphismus.....	728	6.11.3	Halsregionen und -dreiecke.....	753
6.6	Konstruktiver Bau des Schädels.....	728	6.11.3.1	Oberflächliche Halsmuskeln.....	754
6.6.1	Verstärkungen der Schädelkonstruk- tion.....	729	6.11.3.2	Mittlere Schicht der Halsmusku- latur.....	756
6.6.2	Pneumatisation und Kaudruck- pfeiler.....	730	6.11.3.3	Tiefe Halsmuskulatur	757
6.6.3	Mandibula.....	731	6.11.4	Das Zusammenspiel der Hals-, Kau- und Nackenmuskeln.....	759
6.6.4	Beteiligung der Dura mater	732	6.12	Faszien und Bindegewebsräume.....	759
6.6.5	Praktische Bedeutung der Rahmen- konstruktion.....	732	6.12.1	Halsfaszien.....	759
6.7	Gelenke des Kopfes.....	732	6.12.2	Bindegewebsräume am Hals.....	761
6.7.1	Kopfgelenke.....	732	6.13	Systematik der Kopf-Hals-Region ...	762
6.7.2	Kiefergelenk, Articulatio temporo- mandibularis.....	733	6.13.1	Arterien der Kopf-Hals-Regionen	763
6.7.3	Gefäße und Nerven	733	6.13.2	Venen der Kopf-Hals-Regionen.....	770
6.7.4	Mechanik des Kiefergelenkes.....	733	6.13.2.1	Venen im Schädel.....	770
6.7.4.1	Bewegungsmöglichkeiten	734	6.13.2.2	Venen der Kopfweichteile.....	772
6.7.4.2	Anpassungsvorgänge am Kiefer- gelenk.....	735	6.13.2.3	Venenplexus.....	772
6.8	Entwicklung des knöchernen Schädels, Schlunddarm	735	6.13.2.4	Große abführende Venen	773
6.8.1	Ontogenese des Schädels	735	6.13.3	Lymphgefäße und -knoten der Kopf-Hals-Regionen.....	773
6.8.1.1	Entwicklung des Neurocraniums.....	735	6.13.3.1	Regionäre Lymphknoten des Kopfes	773
6.8.1.2	Entwicklung des Viscerocraniums und Schlunddarms.....	738	6.13.3.2	Regionäre Lymphknoten des Halses.....	774
6.8.2	Phylogenese	740	6.13.4	Nerven der Kopf-Hals-Regionen	775
6.8.2.1	Proportionsverschiebungen.....	740	6.13.4.1	Hirnnerven, Nn. craniales.....	775
6.8.2.2	Schädelbasisknickung.....	741	6.13.4.2	Spinalnerven, Nn. spinales der Kopf-Hals-Regionen.....	787
6.8.2.3	Weitere Faktoren für die Schädel- formung.....	741	6.14	Topografie der Kopf-Hals-Regio- nen.....	792
6.8.3	Kraniofaziales Wachstum	741	6.14.1	Mundhöhle, Cavitas oris	792
6.8.4	Fehlbildungen.....	742	6.14.1.1	Zunge, Lingua.....	792
6.8.4.1	Kranioschisis.....	742	6.14.1.2	Große Kopfspeicheldrüsen, Glan- dulae salivariae majores	798
6.8.4.2	Kraniosynostosen, Kraniostenosen, Stenokephalie	742	6.14.1.3	Zähne, Dentees, und Zahnhalte- apparat, Parodontium	800
6.8.4.3	Syndrome, Systemerkrankungen	742	6.14.1.4	Gaumen, Palatum.....	818
6.9	SCALP und SMAS	743	6.14.2	Schlund, Pharynx.....	821
6.10	Muskulatur des Kopfes, Musculi capitis.....	743	6.14.2.1	Lage und Befestigungen des Pharynx	821
6.10.1	Mimische Muskulatur, Musculi faciei	743	6.14.2.2	Etagengliederung und Inhalt des Pharynx	821
			6.14.2.3	Pharynxmuskeln, Musculi pharyngis.....	824

6.14.2.4	Gefäße und Nerven des Pharynx.....	828	6.15.2.4	Regio sternocleidomastoidea	869	
6.14.2.5	Mandeln, Tonsillen, Tonsillae.....	828	6.15.3	Spatium lateropharyngeum (Spatium pharyngeum laterale, Spatium parapharyngeum).....	870	
6.14.3	Nasenhöhle, Cavitas nasi und Nasennebenhöhlen, Sinus paranasales.....	830	6.15.4	Cervicothorakaler Übergang.....	872	
6.14.3.1	Nasenhöhle, Cavitas nasi.....	832	Kapitel 7			
6.14.3.2	Nasennebenhöhlen, Sinus paranasales.....	838	Sinnesorgane Auge und Ohr..... 873			
6.14.4	Kehlkopf, Larynx.....	844	<i>Richard H. W. Funk, Gebhard Reiss</i>			
6.14.4.1	Kehlkopfskelett	844	7.1 Sehorgan, Auge, Oculus et Structurae pertinentes..... 873			
6.14.4.2	Kehlkopfbänder	845	7.1.1	Augapfel, Bulbus oculi.....	875	
6.14.4.3	Kehlkopfgelenke.....	847	7.1.1.1	Äußere Augenhaut, Tunica fibrosa bulbi.....	875	
6.14.4.4	Kehlkopfmuskeln, Musculi laryngis .	847	7.1.1.3	Innere Augenhaut, Augenbecherschichten, Tunica interna bulbi.....	888	
6.14.4.5	Kehlkopfhöhle, Cavitas laryngis	850	7.1.1.4	Gefäße und Nerven des Bulbus oculi	894	
6.14.4.6	Gefäße und Nerven	853	7.1.2	Bewegungsapparat des Augapfels ...	895	
6.14.4.7	Geschlechts- und Altersunterschiede des Kehlkopfes.....	854	7.1.3	Schutzeinrichtungen des Auges	901	
6.14.4.8	Nachbarschaftsbeziehungen des Kehlkopfes.....	854	7.1.3.1	Augenlider, Palpebrae und Augenbrauen, Supercilia.....	901	
6.14.4.9	Lagebeziehungen des Kehlkopfes zum Skelett.....	854	7.1.3.2	Bindehaut, Tunica conjunctiva	904	
6.14.4.10	Leistungen des Kehlkopfes	855	7.1.3.3	Tränenapparat, Apparatus lacrimonalis.....	905	
6.14.5	Schilddrüse, Glandula thyroidea....	855	7.1.3.4	Orbita und Nasennebenhöhlen.....	907	
6.14.5.1	Funktion	855	7.1.4	Gefäße und Nerven der Orbita	907	
6.14.5.2	Gestalt, Hüllen, Größe.....	856	7.2 Gehör- und Gleichgewichtsorgan, Organum vestibulo-cochleare..... 909			
6.14.5.3	Histologie.....	856	7.2.1	Schallleitungsapparat des Ohres	911	
6.14.5.4	Topografie	857	7.2.1.1	Äußeres Ohr, Auris externa.....	911	
6.14.5.5	Gefäße und Nerven	857	7.2.1.2	Mittelohr, Auris media	917	
6.14.6	Beischildrüsen (Nebenschildrüsen), Epithelkörperchen, Glandulae parathyroideae.....	858	7.2.2	Innenohr, Gleichgewichts- und Schallempfindungsapparat, Auris interna	929	
6.14.6.1	Funktion	858	7.2.2.1	Knöchernes Labyrinth, Labyrinthus osseus.....	929	
6.14.6.2	Gestalt und Lage.....	858	7.2.2.2	Häutiges Labyrinth, Labyrinthus membranaceus	931	
6.14.6.3	Histologie.....	858	7.2.2.3	Perilymphatische Räume, Spatium perilymphaticum	940	
6.14.6.4	Gefäße und Nerven	859	7.2.2.4	Innerer Gehörgang, Meatus acusticus internus	941	
6.15 Topografische und angewandte Anatomie des Kopfes und des Halses – ausgewählte Kapitel			859	7.2.2.5	Hör- und Gleichgewichtsbahn.....	944
6.15.1	Kopfregionen	859	Kapitel 8			
6.15.1.1	Topografische Anatomie der Schädeldecke	859	Zentrales Nervensystem, Systema nervosum centrale, Gehirn, Encephalon und Rückenmark, Medulla spinalis			
6.15.1.2	Topografische Anatomie der Fossa retromandibularis	859	<i>Ingo Bechmann, Robert Nitsch, unter Mitarbeit von Franz Pera, Andreas Winkelmann und Frank Stahnisch</i>			
6.15.1.3	Topografische Anatomie der Fossa temporalis.....	860	8.1 Baueinheiten und Morphogenese des zentralen Nervensystems..... 945			
6.15.1.4	Topografische Anatomie der Fossa infratemporalis.....	860	8.1.1	Allgemeine Einführung und Grundlagen der Neuroanatomie	945	
6.15.1.5	Topografische Anatomie des Gesichtes	861	8.1.2	Frühe Entwicklung.....	947	
6.15.2	Halsregionen	861				
6.15.2.1	Relief und Einteilung in Regionen ...	861				
6.15.2.2	Regio cervicalis anterior (Trigonum cervicale anterius, Regio colli anterior)	862				
6.15.2.3	Regio cervicalis lateralis (Trigonum cervicale posterior, Regio colli lateralis)	867				

8.1.3	Entwicklung des Rückenmarks.....	949	8.3.4.5	Lymphabflüsse von Gehirn und Rückenmark	1037
8.1.4	Entwicklung des Gehirns und der Ventrikelräume	953	8.3.4.6	Blut-Hirn-Schranke, Blut-Liquor-Schranke und Immunprivileg des ZNS	1037
8.1.5	Entwicklung der weißen Substanz...	957			
8.2	Allgemeine Topografie, Präparation und Bildgebung des ZNS	958	8.4	Funktionelle Systeme des ZNS.....	1038
8.2.1	Hirnteile und Achsen.....	958	8.4.1	Was ist funktionelle Neuroanatomie?.....	1038
8.2.2	Die äußere Gestalt des Großhirns ...	959	8.4.2	Visuelles System	1038
8.2.2.1	Ansicht von oben und seitlich (Facies superolateralis hemispherii cerebri).....	959	8.4.2.1	Definition	1038
8.2.2.2	Die Lappen des Telencephalon.....	964	8.4.2.2	Sehbahn	1038
8.2.2.3	Ansicht von medial (Facies medialis hemispherii cerebri).....	966	8.4.2.3	Visueller Cortex	1041
8.2.2.4	Ansicht von basal (Facies inferior hemispherii cerebri).....	967	8.4.2.4	Okulomotorik	1043
8.2.3	Systematische Gliederung des ZNS.	969	8.4.3	Auditorisches (akustisches) und vestibuläres System.....	1050
8.2.4	Zerebrale Computertomografie und Magnetresonanztomografie.....	970	8.4.3.1	Definition	1050
8.2.4.1	Intravitale versus postmortale Neuroanatomie: cCT und MRT	970	8.4.3.2	Spiralorgan, Corti-Organ, Organum spirale und Hörnerv, N. cochlearis.....	1051
8.2.4.2	Horizontale Schichten durch den Kopf.....	971	8.4.3.4	Höririnde, auditiver Cortex	1053
8.2.4.3	Frontale Schichten durch den Kopf.	972	8.4.3.5	Afferenzen der Vestibulariskerne	1054
8.2.4.4	Sagittale Schichten durch den Kopf.....	976	8.4.3.6	Efferenzen der Vestibulariskerne	1055
8.2.5	Regionale Anatomie des Vorderhirns, Proencephalon	979	8.4.2	Olfaktorisches System.....	1058
8.2.5.1	Endhirn, Telencephalon	979	8.4.4.1	Riechhärchen, Fila olfactoria	1058
8.2.5.2	Basalganglien, Nuclei basales.....	984	8.4.4.2	Riechhirn, Rhinencephalon	1058
8.2.5.3	Das Großhirnmark: Fasersysteme....	986	8.4.4.3	Riechstrang, Tractus olfactorius	1059
8.2.6	Regionale Anatomie des Hirnstamms	997	8.4.4.4	Verschaltung der Riechsignale	1059
8.2.6.2	Rautenhirn, Rhombencephalon	1000	8.4.5	Gustatorisches System	1060
8.2.7	Rückenmark, Medulla spinalis	1008	8.4.5.1	Geschmacksknospen, Caliculi gustatorii.....	1060
8.2.7.1	Übersicht.....	1008	8.4.5.2	Geschmacksnerven und Geschmacksbahn	1060
8.2.7.2	Rückenmarksquerschnitte	1008	8.4.6	Topografie und funktionelle Gliederung der sensiblen Systeme und Bahnen	1061
8.2.7.3	Morphologie und Topografie des Rückenmarks	1008	8.4.6.1	Allgemeiner Bauplan der sensiblen Bahnen	1061
8.2.7.4	Graue und weiße Substanz des Rückenmarks	1012	8.4.6.2	Hinterstrangbahn	1064
8.2.7.5	Segmentale Gliederung des Rückenmarks.....	1016	8.4.6.3	Anterolaterales System.....	1065
8.3	Hirn- und Rückenmarkshäute, Ventrikelräume und Gefäßversorgung des ZNS.....	1017	8.4.6.4	Spinozerebelläre Bahnen.....	1066
8.3.1	Übersicht.....	1017	8.4.6.5	Trigeminales System	1067
8.3.2	Hirn- und Rückenmarkshäute, Meninges.....	1018	8.4.7	Motorisches System	1068
8.3.2.1	Hüllen des Gehirns	1018	8.4.7.1	Übersicht.....	1068
8.3.2.2	Hüllen des Rückenmarks	1023	8.4.7.2	Funktionsebenen der Motorik	1070
8.3.3	Ventrikelsystem	1025	8.4.7.3	Monosynaptisches spinale System (Muskeleigenreflex).....	1072
8.3.4	Gefäßversorgung von Gehirn und Rückenmark	1027	8.4.7.4	Polysynaptisches spinale System (Hautreflexe, Fremdrelexe).....	1075
8.3.4.1	Arterien des Gehirns	1027	8.4.7.5	Übergeordnete motorische Systeme	1076
8.3.4.2	Arterien des Rückenmarks	1032	8.4.8	Funktionelle Anatomie des Kleinhirns, Cerebellum	1088
			8.4.8.1	Funktionelle und entwicklungs-geschichtliche Gliederung des Cerebellum.....	1089

8.4.8.2	Organisation der Afferenzsysteme des Cortex cerebelli	1090	8.4.9.2	Formatio reticularis.....	1097
8.4.8.3	Kleinhirnkerne, Nuclei cere- bellares.....	1091	8.4.9.3	Vegetative Zentren.....	1099
8.4.8.4	Efferente Fasersysteme des Klein- hirns	1092	8.4.10	Integrative und kognitive Systeme...	1100
8.4.8.5	Kleinhirnstiele.....	1093	8.4.10.1	Limbisches System.....	1100
8.4.8.6	Funktionen des Kleinhirns.....	1094	8.4.10.2	Kortikale Systeme	1109
8.4.8.7	Verbindungen der motorischen Systeme zum Rückenmark: moto- rische Endstrecke.....	1095	8.4.11	Neuroendokrine Systeme.....	1119
8.4.9	Vegetative Steuersysteme.....	1096	8.4.11.1	Überblick	1119
8.4.9.1	Organisation und Hierarchie vege- tativer Zentren	1096	8.4.11.2	Hypothalamo-hypophysäres System	1120
			8.4.11.3	Zirkumventrikuläre Organe.....	1125
			8.4.11.4	Zirbeldrüse, Corpus pineale, Glandula pinealis, Epiphyse.....	1125
			Register	1127

1 Gegenstand und Arbeitsgebiete der Anatomie

Franz Pera, Timm J. Filler

1.1 Was ist Anatomie?

Unter Anatomie verstehen wir die Lehre vom Bau der Organismen (griech.: *anatemnein* schneiden). Humananatomie ist die Anatomie des Menschen.

Im Gegensatz zur Pathologie versucht die Humananatomie, Kenntnisse zum Verständnis des Körperbaus des gesunden lebenden Menschen zu gewinnen und zu vermitteln.

1.1.1 Definition der Humananatomie

Humananatomie ist definiert als die Wissenschaft von der Struktur des Menschen. Sie macht das rein Strukturelle durchschaubar für Fragestellungen zur Funktion und für die Unterscheidung zwischen normal und pathologisch sowie für die Erkenntnismöglichkeiten aus der Gestalt.

Die Lehre vom Bau des Menschen interessiert sowohl unter erkenntnistheoretischen als auch unter praktischen Gesichtspunkten. Im medizinischen System ermöglicht sie durch intensives Erfassen der Form des lebenden Menschen, die Grundlagen für das ärztliche Handeln zu schaffen, denn Kenntnis der Form ist Voraussetzung für das Verstehen der Funktion; Kenntnis der normalen Form und Funktion ist Voraussetzung für das Erkennen des Krankhaften (Pathologische Anatomie).

Zielsetzung des Faches. Ziel der Beschäftigung mit Anatomie ist es, endogene und exogene Ursachen, Einflüsse und Mechanismen, welche die anatomischen Eigenschaften des Menschen beeinflussen, sowie deren Beziehungen zu erkennen. Damit soll das Gesunde Basis medizinischer Tätigkeit und Ziel therapeutischer Bemühungen sein.

1.1.2 Einteilung des Faches

Anatomie wird in mehrere Subdisziplinen eingeteilt, in denen jeweils bestimmte Arbeitstechniken bevorzugt werden. Auch eine organbezogene Einteilung (beispielsweise Bewegungsapparat, innere Organe, Blut oder Nervensystem) kann wie die fachlich-methodische Einteilung wegweisend durch das gesamte Fachgebiet sein. Die Einteilungen hängen jedoch so sehr voneinander ab, dass niemand zuverlässig in einer Richtung darin arbeiten kann, wenn er die anderen ignoriert.

1.1.3 Fachrichtungen in der Anatomie

Anatomie in Forschung und Lehre verfolgt verschiedene Ziele. Ihre systematischen und kausalen Betrachtungen sind vorwiegend humanbiologischer Art. Sie versucht, allgemeine und spezielle Gestaltungs- und Funktionsprinzipien des menschlichen Körpers zu definieren und zu erklären. Dabei werden die Aspekte möglichst vieler ihrer Teilgebiete berücksichtigt.

Vergleichende Anatomie. Im Bau des menschlichen und des tierischen Organismus gibt es viele Übereinstimmungen (Homologa), aber auch Abweichungen (Heterologa). Aufgabe der vergleichenden Anatomie ist, Tiere und Menschen miteinander zu vergleichen und homologe bzw. heterologe Formen aufzuzeigen. Sie zeigt, dass beim Menschen Formen als Varietäten vorkommen, die bei bestimmten Tieren stets vorhanden sind, und dass manche Organe beim Verlust ihrer ursprünglichen Funktion nicht vollständig verschwinden, sondern für andere Aufgaben sinnvoll umgebaut werden (z. B. Wurmfortsatz des Blinddarms).

Phylogenese. Die Wissenschaft der Phylogenese oder Stammesgeschichte erforscht aufgrund vergleichend-anatomischer Kenntnisse die Stammes-

verwandtschaft der Tierformen und versucht, Stammbäume der Arten aufzustellen. In der Phylogenie wird das Werden einer Form (Morphogenese) untersucht. Nachdem ein Entwicklungsvorgang in seinem Ablauf erkannt ist, ergibt sich die Frage nach den dem Ablauf zugrunde liegenden Gesetzen. Man versucht, im Experiment zu ergründen, welche im Keim oder außerhalb des Keimes gelegenen Kräfte die Entwicklung beeinflussen. Diesen Fragen der kausalen Genese geht die Entwicklungsmechanik nach.

Ontogenese. Die Wissenschaft der Ontogenese oder Entwicklungsgeschichte des Einzelwesens verfolgt die Entwicklung von der befruchteten Eizelle bis zum Tode. Besonderer Wert wird dabei auf die Embryonalentwicklung gelegt, die Differenzierung des Keimes und die Ausbildung eines dem fertigen Organismus annähernd gleichen Gebildes (Histogenese und Organogenese). Beim Menschen reicht die Ontogenese bis zur Geburt; die Entwicklung einiger Organe (z. B. Niere, Nebenniere, Gehirn) geht darüber hinaus. Es wird unter anderem untersucht, welche Organe aus einem gemeinsamen Material entstehen, und der zeitliche Verlauf der Organentwicklung festgestellt. Beide Faktoren sind wichtig für das Verständnis der Entstehung von Fehlbildungen (Teratologie). Die Entwicklungsgeschichte beschreibt anhand von Entwicklungsstufen und Entwicklungsreihen, wie aus einfachen Formen durch Differenzierung komplizierte entstehen.

Anthropologie. Das relevanteste Teilgebiet der Anthropologie, der Wissenschaft vom Menschen und seiner Entwicklung in natur- und geisteswissenschaftlicher Hinsicht, ist für anatomische Betrachtungen die biologische Anthropologie. Die verwandten Parameter waren ursprünglich meist anthropometrisch (Maßverhältnisse des menschlichen Körpers wie Strecken, Umfänge, Bögen und Winkel) und deskriptiv (qualitative Unterschiede wie Haartypen, Lippenform, Nasenrückenprofil, Lidspalte, Pigmentierungsmerkmale, Körperbautypen). Stereologische, physiologische, serologische und biochemische Methoden vertiefen heute mithilfe signifikanter Wahrscheinlichkeitsaussagen (Biostatistik) die Erkenntnisse.

Zellbiologie. Diese kausalanalytische Wissenschaft behandelt auf zellulärer und subzellulärer Ebene die Bedingungen und Abhängigkeiten, unter denen Gestalt und Struktur entstehen, erhalten werden oder sich wandeln. Ihre Methoden erbringen der-

zeit wesentliche Fortschritte in der Erkenntnis der Humanbiologie, vor allem auf ultrastruktureller (d. h. mit dem Elektronenmikroskop erkennbarer) und molekularer Ebene.

Biometrie. Die Biometrie konzentriert sich auf das Erstellen von (zumeist rechnergestützten) Modellen des Menschen oder einzelner seiner Komponenten zur Untersuchung von Erkrankungen und darauf basierenden Modellen zu ihrer Therapie oder Prävention. Der Erkenntnisgewinn hat auch der gerichtlichen Medizin neue Tragweite verliehen. So dienen biometrische Systeme heute der Identifizierung und Authentifizierung von Personen.

1.1.4 Betrachtungsmöglichkeiten in der Anatomie

Makroskopische Anatomie. Sie befasst sich mit Formen und Strukturen des Körpers, die mit dem bloßen Auge oder mit der Lupe zu erfassen sind. In der Lehre wird die makroskopische Anatomie vor allem durch den anatomischen Präparierkurs vermittelt.

Mikroskopische Anatomie. Mithilfe von verschiedenen Präparations- und Mikroskopierverfahren wird der Feinbau des Körpers analysiert. Mikroskopische Anatomie gliedert sich in die Zellenlehre (Zytologie), Gewebelehre (Histologie) und die mikroskopische Anatomie der Organe.

Deskriptive Anatomie oder beschreibende Anatomie wird die Darstellung der durch makro- und mikroskopische Analysen gewonnenen Befunde genannt.

Systematische Anatomie. Hierbei werden Teile des Körpers nach funktionellen, entwicklungsgeschichtlichen und vergleichend-anatomischen Gesichtspunkten zu Systemen zusammengefasst (z. B. Urogenitalsystem).

Topografische Anatomie. Sie übermittelt die räumliche Vorstellung über die Lage der Teile im Körper (gr. topos: Ort) und über ihre gegenseitigen Beziehungen (Synthese). Deskriptive und systematische Anatomie sind als analytische Stufen Voraussetzung für die topografische Anatomie. Ihre Kenntnis ist eine wesentliche Grundbedingung für jeden ärztlichen Eingriff beim Lebenden. Topografische Anatomie ist einem Stadtplan oder einem Navigator vergleichbar, der den Fahrer sicher und ohne gefährliche Umwege zum Ziel führt.

Funktionelle und klinische Anatomie. Funktionelle Anatomie geht den Beziehungen und Abhängigkei-

ten zwischen Form und Funktion nach. Darauf basiert die klinische Anatomie (Erkenntnis anatomischer Entitäten, d. h. gegebener Einheiten, nach klinischer Relevanz), deren Verständnis einen ersten Einblick in das Lebendige des Faches gewährt.

Anatomie am Lebenden. Anatomie ist ein praktisches Fach, in dem die Benutzung von so vielen Sinnesorganen wie möglich und vor allem das „Begreifen“ des menschlichen Körpers wichtiger ist als jede Theorie. Sie ist für den Anfänger zwar zunächst durch Behandlung der Körperspenden geprägt, hat aber eigentlich den lebenden Körper zum Gegenstand. Die bei der Präparation gewonnenen Einsichten werden im Studium als Erstes bei den klassischen klinischen Untersuchungsverfahren (Inspektion, Palpation, Perkussion, Auskultation und Funktionsprüfungen) angewendet. Die plastische Anatomie stellt als Oberflächenanatomie am Lebenden einen weiteren Gebrauch des im Präparierkurs erworbenen Bildes vom Menschen dar. Invasive Anatomie am Lebenden (während Operationen) wurde durch die Entwicklung der Anästhesiologie ermöglicht. Alle Organe sind damit auch intravital der Betrachtung zugänglich. Außer den verschiedenen radiologischen Verfahren sind zudem endoskopische und andere minimalinvasive Methoden geeignet, Anatomie am Lebenden zu praktizieren.

1.1.5 Bedeutung des Faches

Anatomie und Naturwissenschaft. Die Anatomie, so wie sie der angehende Arzt heute vermittelt bekommt, ist das Produkt ihrer Geschichte. Sie hat gerade im 20. und im beginnenden 21. Jahrhundert entscheidende Veränderungen erfahren. Die Erklärung dafür liegt in den in diesem Zeitabschnitt gemachten Fortschritten der Naturwissenschaften und Entwicklungen neuer Methoden und Analysetechniken (z. B. Elektronenmikroskopie, Zytochemie, Immunzytochemie, Bildanalyse und 3D-Rekonstruktion, Autoradiografie, In-situ-Hybridisierung und andere Gentechnologien) sowie den Erkenntnissen der Physik, Chemie, Biologie, Technik und deren Subdisziplinen.

Anatomie, Pathologie und Rechtsmedizin (Forensische Medizin). Diese drei Fächer haben in einem wesentlichen Teil ihrer Aufgaben mit dem Leichenwesen zu tun. Die Pathologie untersucht am toten Körper das Krankhafte und die Rechtsmedizin das Forensische (gerichtlich Relevante). Anatomie hat

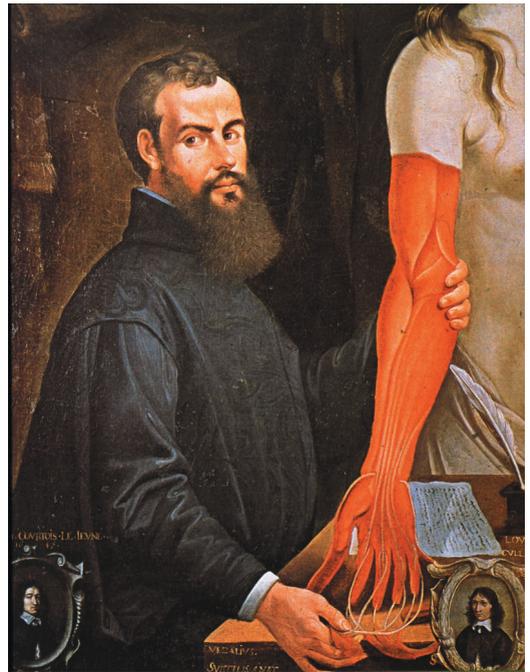


Abb. 1.1 Andreas Vesal (1514–1564) von Poncet (17. Jh.) nach der Vorlage des Bildes in Vesals Werk „De humani corporis fabrica“ (1543).

das Gesunde zum Gegenstand und liefert damit die Basis für das Erkennen des Anormalen. Es war Andreas Vesal (1514–1564), der Begründer der modernen Humananatomie, dessen Ziel die exakte Vorstellung des normalen Körperbaus wurde (Abb. 1.1). Da sich keine zwei menschlichen Körper exakt gleichen, ist die Frage nach der Normalität auch die Frage nach der Normvariante.

Bis in die 70er-Jahre des 20. Jahrhunderts war die Anatomie Bezugspunkt der gesamten Medizin, da sie als Teil all des Wissens angesehen wurde, das in der Medizin praktiziert wurde. Dank der Entdeckung des Blutkreislaufsystems durch William Harvey (1578–1657) wurde beispielsweise das Geschehen des Herzschlags verständlich, ein Problem, das schon seit der Antike bekannt war. Anatomie ist in der Praxis nie ganz von Pathologie zu trennen, trotz der inzwischen klar getrennten Wege. Bei Giovanni Battista Morgagni (1682–1771) beispielsweise kann man im heutigen Sinne nicht klar erkennen, ob er eher Anatom oder eher Pathologe war. Seit Morgagni setzte sich das Konzept durch, dass Krankheit mit anatomischer Läsion verbunden ist. Rudolf Virchow (1821–1902) nannte das

100 Jahre später den „anatomischen Gedanken“. Die pathologische Anatomie wurde zur Grundlage der klinischen Medizin des 19. Jahrhunderts. Nicht nur aus der historischen Begründung heraus muss die Anatomie in der Ausbildung des Mediziners immer auch mit dem Blick auf die Klinik gelehrt werden. Erst dieser Blick ermöglicht anatomisches Verständnis auf dem heutigen Niveau.

Anatomie und Klinik. Klinik meint die diagnostische und therapeutische Arbeit am Patienten auf einer Wissensbasis. Anatomie und Klinik gehören zusammen. Zitat eines pragmatischen Chirurgen: „Ein guter Chirurg braucht zu 90% sehr gute anatomische Kenntnisse, der Rest ist Handwerk.“

1.2 Anatomie früher und heute

Im anatomischen Unterricht spielt der tote menschliche Körper eine große Rolle. Der Umgang mit dem sterbenden Menschen und dem toten Körper ist in der Geschichte durch bestimmte kulturelle Regeln und von unterschiedlichen Vorstellungen über das Sterben und den Tod bestimmt.

Sofern es sich um Verstorbene der eigenen Familie oder des eigenen Volkes handelte, ist in unzähligen Quellen die Ehrfurcht gegenüber dem toten Menschen überliefert, die allerdings nicht immer den Feinden zuteil wurde. Die Unversehrtheit des Körpers galt nicht nur im Christentum, sondern auch in vielen anderen Kulturen und Religionen als eine wichtige Voraussetzung für ein Weiterleben im Jenseits. Aus diesem religiösen Grund waren anatomische Sektionen am toten Menschen über viele Jahrhunderte ein absolutes Tabu. Bis zum späten Mittelalter beruhte in der ärztlichen Ausbildung die Lehre der menschlichen Anatomie auf den Erkenntnissen aus den Sektionen von Tieren.

Vereinzelt soll es bereits in der **Antike** Humananatomie gegeben haben, doch wurden dafür nur zum Tode verurteilte Verbrecher, also Personen, die aus der sozialen Gemeinschaft ausgestoßen waren, benutzt. Sogar von Vivisektionen, d. h. Eingriffen am Lebenden, wird berichtet. Im Allgemeinen wurde in der Antike Tieranatomie betrieben, allerdings außerhalb jeglicher systematischen und allgemein verbreiteten Forschung. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse übertrug man auch auf den menschlichen Körper. Im Zusammenhang mit

der seit der Antike jahrhundertlang vorherrschenden Humoralpathologie oder Viersäftelehre waren die anatomischen Gegebenheiten des Körpers ohne große Bedeutung für die entsprechenden Funktionsvorstellungen.

Als sich anatomische Demonstrationen langsam an den Universitäten des **Spätmittelalters** zu etablieren begannen, war die Beschaffung von Leichen ein großes Problem. In erster Linie wurde auch zu dieser Zeit auf zum Tode verurteilte Verbrecher nach ihrer Hinrichtung zurückgegriffen. In der Renaissance erhielt die Anatomie ihren mächtigen Aufschwung. Im *Theatrum anatomicum* kam es zu Inszenierungen über den Bau des menschlichen Körpers, die nicht nur dem Fachpublikum vorbehalten waren, sondern auch das bürgerliche Publikum der Städte anlockten. Diese inszenierten Sektionen dauerten etwa jeweils eine Woche, da dann die Verwesung der Leiche zu weit fortgeschritten war. Vereinzelt wird davon berichtet, dass nach Abschluss der Sektion beim Publikum für das Begräbnis des Sezierten Geld gesammelt wurde.

Mehr und mehr entwickelte sich ein Interesse an der Struktur und Funktion des eigenen Körpers, was auch dazu beitrug, dass Bürger ihren Körper für die anatomische Zergliederung nach ihrem Tode zur Verfügung stellten und gesetzliche Regelungen getroffen werden mussten.

Mit den mechanistischen Funktionstheorien des menschlichen Körpers im **18. Jahrhundert** und dem Durchbruch der naturwissenschaftlichen Richtung der Medizin um die Mitte des **19. Jahrhunderts** wurde der Aufschwung der anatomischen Arbeiten ununterbrochen fortgesetzt. Religiöse Gepflogenheiten und Einwände traten immer mehr in den Hintergrund. Im Rahmen dieses Säkularisierungsprozesses erfolgte eine Materialisierung des toten Menschen, welche die Gefahr barg, keine Rücksicht auf die Würde des Verstorbenen zu legen und den vergegenständlichten Körper als Ort reiner Materialanhäufung aufzufassen.

1.3 Einführung in den Präparierkurs

Der „Kursus der makroskopischen Anatomie“ (oder „Anatomische Präparierübungen“) ist ein wesentlicher Bestandteil der anatomischen Ausbildung und wird von den meisten Studierenden der Medizin und Zahnmedizin als die eindrucksvollste Lehrveranstaltung ihres vor-klinischen Studiums angesehen.

Vor etwa 200 Jahren hat sich im anatomischen Unterricht durchgesetzt, dass die Studierenden selbst an Leichnamen präparieren; früher wurde das anatomische Wissen durch Lehrsektionen vermittelt, denen die Studierenden nur als Zuschauer beiwohnen durften. Jeder Arzt braucht für seine tägliche Arbeit fundierte anatomische Kenntnisse. Nicht umsonst heißt es in den Therapieempfehlungen z. B. der Orthopädie und Chirurgie: Das Ziel der Behandlung ist die Wiederherstellung der normalen anatomischen Verhältnisse.

Die Studierenden sehen bei ihrer ersten Begegnung mit der Anatomie zunächst bestimmt weniger das überlieferte Wissen aus mehr als 2000 Jahren Geschichte der menschlichen Anatomie als vielmehr den einzelnen Menschen, dessen Körper ihnen zum Studium und zur Zergliederung persönlich übergeben wurde. Diesem Gefühl müssen sie sich stellen, nicht nur dem Lernstoff. Der Student trifft als ersten Menschen, der ihm anvertraut wird, auf einen Toten, mit dem er sich über ein ganzes Semester oder Jahr intensiv zu beschäftigen hat.

1.3.1 Wer sind die Körperspender?

Entgegen mancher Vorstellung in Laienkreisen haben wir heute in der Anatomie keine Leichen, die eine Behörde der Anatomie zur Verfügung gestellt hat. Es sind Menschen, die sich entschieden haben, dass ihr Körper nach dem Tod der Ausbildung von Ärzten und der Wissenschaft dient. Sie treten von sich aus zu Lebzeiten an ein Institut für Anatomie heran und stellen ihren Körper durch eine schriftliche Vereinbarung mit dem Institut zur Verfügung – ohne Bezahlung.

Wir bezeichnen in der Anatomie die toten Menschen, an denen wir präparieren, nicht einfach als Leichen und nicht als Präparate, sondern als **Körperspender** oder **Vermächtnisgeber**.

Nach dem Todeseintritt wird das Anatomische Institut von den Angehörigen, vom behandelnden Arzt oder vom Krankenhaus benachrichtigt und die Überführung des Leichnams veranlasst. Vor der Konservierung der Körperspender erfolgt eine amtliche Leichenschau. Körper von Verstorbenen mit bestimmten ansteckenden Krankheiten (Tuberkulose, Aids u. a.) sowie bei ungeklärter Todesursache werden von den Anatomischen Instituten aus Sicherheitsgründen nicht angenommen, auch

nicht frisch Operierte, da hier eine vollständige Konservierung nicht sichergestellt werden kann.

In der Regel sind die Körperspender in hohem Lebensalter; sie sind eines natürlichen Todes gestorben, d.h. an einer zum Tode führenden Krankheit. Wir werden an den Körperspendern daher meist auch vielfältige pathologische Befunde erheben können und nicht nur die „normale Anatomie“ vorfinden wie im anatomischen Lehrbuch oder Atlas.

An den toten Körperspendern im Präpariersaal ist nichts Makaberes. Der Umgang mit ihnen soll und darf nicht zur Inhumanität führen. Es ist ein toter Mensch, dem wir mit Achtung begegnen, dem wir als anatomische Lehrer und als Studierende dankbar für seine Körperspende sind. Viele Universitätsstädte haben auf ihren Friedhöfen eigene Gräberfelder für die Anatomie, in denen die Körperspender ihre letzte Ruhe finden, falls sie nicht in ihrem Heimatort beigesetzt werden wollten. Es zeugt von der Dankbarkeit der Studierenden, wenn, wie vielfach üblich, die Kursteilnehmer an der Gedenkfeier für ihre Körperspender teilnehmen und diese auch mitgestalten.

1.3.2 Was geschieht im Präparierkurs?

Der erste Schritt ist die Begegnung mit dem unversehrten Körper, der mit Fixierungs- und Desinfektionsflüssigkeiten behandelt ist, damit er nicht verwest. Eine Mindestzeit von 6 bis 12 Monaten Fixierungsdauer wird eingehalten, ehe der Leichnam des Körperspenders für die Präparation freigegeben wird.

Diese Frist garantiert weitestgehend Ansteckungsfreiheit. Bei den üblicherweise verwendeten Fixierungsmitteln erhärten die Körpergewebe, sodass Haut und Muskeln viel rigider als beim Lebenden werden und passive Bewegungen der Extremitäten in den Gelenken nur noch eingeschränkt möglich sind. Die Haut erscheint wächsern-blassgelb bis grau, an den Stellen der Totenflecke dunkler.

Arbeitsschritte. Nach der ersten Inspektion des Körpers beginnt die Präparation. Zunächst wird die Haut (Epidermis und Corium) entfernt; die im Fettgewebe der Unterhaut verlaufenden Hautgefäße und -nerven werden aufgesucht. Danach wird das Hautfett restlos entfernt, um die darunter liegenden Strukturen sichtbar zu machen. Schichtweise arbeitet man sich in die Tiefe vor; es werden die

Körperhöhlen eröffnet, die Organe zuerst im Zusammenhang und später isoliert studiert. Die Extremitäten werden zumeist im Ablauf des Kurses vom Rumpf abgetrennt, damit sie von allen Seiten weiter präpariert werden können. Am Ende des Kurses ist man teilweise bis zum Skelett vorgedrungen: Gelenke sind dargestellt, Knochen sind frei zu erkennen. Am Kopf sind einzelne Knochen durchsägt worden, um in tiefere Schichten vorzudringen oder das Gehirn zu sehen und entnehmen zu können. Der Körper ist zergliedert. All dies dient dazu, den menschlichen Körper zu begreifen.

Die Arbeit im anatomischen Präparierkurs hat nur wenig gemeinsam mit der Arbeit eines Chirurgen, weder von der Präparationstechnik her noch von der didaktischen Intention: In der makroskopischen Anatomie soll die große Übersicht vermittelt werden, die jeder Arzt für seine spätere Arbeit und sein ärztliches Denken braucht. Aber schon im Präparierkurs können sich spezielle Interessen entwickeln, die später in so unterschiedliche Berufsbezeichnungen wie Fachärztin/Facharzt für Orthopädie, Kardiologie, Ophthalmologie oder Neurologie, ja sogar für Anatomie münden.

1.3.3 Rechtliche Fragen

Das Präparieren am toten Menschen wird von der Rechtsprechung als eine ärztliche Tätigkeit angesehen, die neben den in den Instituten für Anatomie, Pathologie und Rechtsmedizin beschäftigten Mitarbeitern und den in der Transplantationschirurgie tätigen Ärzten nur den zum Medizin-, Zahnmedizin- sowie Humanbiologiestudium zugelassenen Studierenden erlaubt ist.

Die Körperspender haben vor ihrem Tod die Einwilligung gegeben, dass ihr Körper zu Ausbildungszwecken zergliedert wird. Aber bereits hier gilt die durch Gesetz und ärztliche Landesverordnung festgelegte Schweigepflicht, die schon im „hippokratischen Eid“ vor 2500 Jahren als Gebot für die Ärzte aufgeführt war.

Ärztliche Schweigepflicht. Sie ist in der Berufsordnung für Ärzte und im Strafgesetzbuch als Rechtspflicht aufgeführt; ihre Verletzung ist mit Strafe bedroht. Sie gilt nicht nur für alle in Heilberufen Tätigen, sondern auch für Personen, die zur Berufsvorbereitung an der berufsmäßigen Tätigkeit teilnehmen.

Das Berufsgeheimnis umfasst alles, was Ärztinnen und Ärzte bei der Ausübung ihres Berufes wahrgenommen haben, auch nichtmedizinische Belange; es muss sich also nicht um ausdrücklich anvertraute Dinge handeln.

Auch Verstorbene und ihre Hinterbliebenen haben ein schutzwürdiges Interesse, dass die Identität der Toten, vorausgegangene Krankheiten und sonstige Erkenntnisse, die erst beim Zergliedern des Leichnams gewonnen werden, gegenüber Dritten nicht genannt werden. Deshalb ist auch das Fotografieren im Präpariersaal nicht gestattet.

1.3.4 Psychische Situation

Wenngleich vor Kursbeginn nur eine Minderheit der Kursteilnehmer noch nie einen Toten gesehen hat, gaben in einer psychologisch betreuten Befragung von Kursteilnehmern doch 90% zu, zunächst mehr oder weniger große Angst vor dem Präparieren am Leichnam zu haben. Diese Angst wird im Verlauf des Kurses immer geringer; bei Kursmitte sagten bereits 84% der Teilnehmer, dass sie keine Angst mehr verspüren. Die einzelnen Präparierarbeiten werden unterschiedlich empfunden: Als besonders unangenehm erscheinen der erste Schnitt in die Haut, das Abpräparieren der Haut und des darunter liegenden Fettgewebes. Je weiter die Präparation fortschreitet, je mehr sich also das Erscheinungsbild des Körpers vom einstmaligen lebenden Menschen entfernt und zu einem anatomischen Präparat wird, das dem Bild im Anatomie-Atlas gleicht, desto größer wird das primär anatomische Interesse an den zunächst verborgenen Strukturen des Körpers. 92% der Befragten meinten am Ende des Kurses, es sei ihnen gelungen, den Toten als Arbeits- und Studienobjekt zu begreifen, ihn als ein Studienobjekt von großer Wichtigkeit zu sehen (die Zahlenangaben sind einer wissenschaftlichen Untersuchung von Püthe 1991 entnommen).

Aber so unterschiedlich die einzelnen Teilnehmer auch auf die psychische Belastung der ersten „ärztlichen“ Begegnung mit dem Menschen reagieren: Es darf nicht das Ziel des Kurses sein, eine Abstumpfung der Gefühle zu erreichen, die sich womöglich auch auf die spätere ärztliche Berufstätigkeit auswirkt. Der

Präparierkurs ist kein bloßer Pflichtkurs des Medizinstudiums, den man hinter sich bringt und nach Erhalt des Scheins „abhaken kann“, sondern er ist ein wichtiger Mosaikstein des Berufsbildes, der im ärztlichen Alltag auch noch nach Jahrzehnten zur Grundlage ärztlicher Entscheidungen gemacht wird.

1.3.5 Vorbereitung auf den Kurs

Mitzubringen sind u. a. Schutzkleidung und Präparierbesteck. Im Detail wird dies in einer einführenden Vorlesung angekündigt. Da an potenziell gesundheitsgefährdendem Material gearbeitet wird (Ausdünstungen der Fixierungsmittel, nicht hundertprozentig auszuschließende Infektionsmöglichkeit), ist aus Gründen des Arbeitsschutzes eine entsprechende Schutzkleidung erforderlich (Arbeitskittel, Gummihandschuhe, evtl. Gummischürze). Nicht nur aus hygienischen, sondern auch aus ästhetischen Gesichtspunkten (man soll die Präparierkursteilnehmer in der Mensa ja nicht allein durch den Geruchssinn identifizieren können) ist diese Investition in eine zusätzliche Schutzbekleidung empfehlenswert.

Zur Vermeidung von Verletzungen mit den Präparierinstrumenten ist ein sorgfältiger Umgang mit dem Skalpell Pflicht: Messer stets in stabilen Behältern transportieren (also nicht lose in den Kitteltaschen), frische Klingen benutzen oder die Messerschneide rechtzeitig nachschärfen, um drucklos schneiden zu können; die mit Formalin fixierten Körpergewebe in der Anatomie sind relativ hart und verlangen eine ganz andere Präparationstechnik als in der Chirurgie. Einige Körperregionen (z. B. Nacken und Hinterhaupt) sind in den oberflächlichen Schichten nach der Konservierung ganz besonders fest.

Zur praktischen Präparationsarbeit braucht es Vorkenntnisse, die in der Vorbereitung auf den Kurs und kursbegleitend erworben werden müssen. In mehreren Zwischenprüfungen werden die theoretischen und praktischen Kenntnisse über die einzelnen Körperregionen kontrolliert. Ganz unabhängig davon, ob die örtlichen Vorschriften eine Eingangsprüfung zum Präparierkurs verlangen oder nicht, ist zu bedenken: Der Prüfungsstoff der Testate umfasst in einem kurzen Semester die makroskopische Anatomie des gesamten Körpers. Man sollte sich also rechtzeitig vor Kursbeginn mit dem Lernstoff vertraut machen.

1.3.6 Weiterführende Gedanken zum Präparierkurs

Der Präparierkurs hat nicht nur das Ziel, spezielle anatomische Kenntnisse des menschlichen Körpers zu vermitteln. Er ist der – oft als sehr einschneidend in das bisherige Denken der Studierenden empfundene – praktische Eintritt in den ärztlichen Berufsstand.

„Mortui vivos docent“ (die Toten lehren die Lebenden) oder „Hic locus est, ubi mors gaudet succurrere vitae“ (hier ist der Ort, wo der Tod sich freut, dem Leben zu helfen); so lauten einige Inschriften in anatomischen Präpariersälen, die das Selbstverständnis der klassischen Anatomie wiedergeben. Zum Nachdenken soll auch der Satz anregen: „Vivitur ingenio caetera mortis erunt“ (man lebt nur durch den Geist; alles Übrige wird des Todes sein).

Der irdische Körper des Menschen, der von den Instrumenten der Präparanden zerteilt wird, behält seine Würde. Den Geist und die Seele können wir nicht sezieren oder durch das Sezieren erkennen.

Aber ein wenig vom früheren Geist des toten Menschen empfinden können die Studierenden durchaus, nämlich wenn sie nach dem Kurs bei der Beisetzung „ihrer“ Körperspender teilnehmen. Ohne viele Worte wird da etwas von der Haltung des Sezierten spürbar: über den leiblichen Tod hinaus wirken, damit andere Menschen von gut ausgebildeten Ärzten geheilt werden und weiterleben können. Für die Angehörigen der Körperspender ist es ein großer Trost, wenn die Studierenden dabei sind, die den Toten zum letzten Mal sehen durften und seinen Körper von innen gesehen haben.

Dies alles kann nur angedeutet werden, denn so groß der Reichtum an anatomischen Varietäten des Körpers auch sein mag: Die Vielfalt des Denk- und Empfindungsvermögens des Gehirns des Menschen (ob es nun um die Körperspender oder die Kursteilnehmer geht) ist weitaus größer.

Man sagt, die Anatomie sei **das** oder zumindest ein Mutterfach der Medizin. Im Präparierkurs sehen die Studierenden das Ende des irdischen Lebens, im Unterricht hören sie in der Vorlesung Embryologie vom Anfang des Lebens. Im Kurs der Histologie und mikroskopischen Anatomie werden sie mit der Feinstruktur des Körpers vertraut gemacht. Über aller Fülle der Einzelheiten, die es in der Anatomie zu erlernen gilt, darf aber im Bewusstsein der

Lernenden der große Rahmen des Lebens nicht untergehen: weder der biologische Teil, der das Werden und Vergehen des Körpers unter Einschluss seiner Krankheiten umfasst, noch die psychologischen und ethischen Aspekte, die im Lernstress des Präparierkurses bisweilen verdrängt werden.

Später, im harten Klinikalltag, ist immer wieder eine Rückbesinnung notwendig, eine Standortbestimmung, eine Überprüfung des eigenen Denkens und Urteils. Der Präparierkurs ist also wesentlich mehr als nur eine Präparierübung oder ein „Paukkurs“ in Anatomie. Er öffnet die Sicht in den Menschen mit all seinen Eigenheiten.

1.4 Leichenkonservierung

Die Konservierung dient der längeren Haltbarmachung und Lagerung des toten Körpers im Institut.

Die Leichenkonservierung besteht im Wesentlichen aus 2 Schritten:

- **Fixierung.** Durch Eiweißdenaturierung bzw. -vernetzung soll die postmortal einsetzende Autolyse vermieden werden. Die Fixierung ist also eine Methode zur Konservierung und Strukturverfestigung von Geweben und Organen im möglichst natürlichen Zustand.
- **Aufbewahrung** des Leichnams oder der Leichenteile bzw. Organe. Sie hat das Ziel, die zuvor fixierten Strukturen möglichst lange und natürlich zu erhalten.

Fixierung und Konservierung. Mit Glycerol bzw. Karion, Alkohol u. a. gemischt, ist Formaldehyd (Formalin) eine ideale Fixierungs- bzw. Konservierungsflüssigkeit. Für die Konservierung verwendet man in der Regel 8–10%iges Formalin (z. B. Gehirn), zur Aufbewahrung 4%iges Formalin.

Die Entdeckung des Formaldehyds durch den Chemiker Hoffmann (1868) brachte einen großen Fortschritt in der Konservierungstechnik. Formaldehyd wird in wässriger Lösung als Fixierungsmittel angewendet und hat ausgeprägte Vernetzungseigenschaften. Es ist ausgezeichnet konservierend, desodorierend und mikrobiozid wirksam. In höherer Konzentration ist Formaldehyd zur Konservierung ganzer Leichen bzw. Organe nicht geeignet,

da es zu stark härtet und die Gewebe brüchig macht. Bei zu geringer Konzentration insbesondere bei der Aufbewahrung der Leichen im Präpariersaal kommt es dagegen leicht zum nachträglichen Pilzbefall.

Die Fixierung der Körperspender erfolgt in zwei Abschnitten:

- **Innere Fixierung.** Zuerst wird die Fixierungs- bzw. Konservierungslösung durch die A. femoralis, A. axillaris oder A. carotis communis ein- oder beiderseits injiziert.
- **Äußere Fixierung.** Anschließend werden die Leichen in Bottichen mit Fixierungslösung oder in einem „geschlossenen Fixierungssystem“ mindestens 9 Monate lang gelagert. Letzteres ist der zukünftige Standard (z. B. Thalheimer-Langzeit-Konservierungsanlage).

MAK (maximale Arbeitsplatzkonzentration)-Werte bei der Formalinexposition. Zu ihrer Einhaltung gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Der Formaldehydanteil soll in den Fixierungslösungen so niedrig wie möglich gehalten werden (s. o.).
- Fensterbelüftungen des Präpariersaals allein reichen nicht aus, um die MAK-Werte einzuhalten, auch nicht in Verbindung mit Ventilatoren. Günstiger, aber kostenintensiver ist der Einsatz einer Laminar-Air-Strömung mit Absaugung für jeden Tisch im Präpariersaal, die als zusätzlichen Vorteil alle anfallenden Aerosole ohne Gefährdung der beteiligten Personen entfernt. Diese Methode wird mit unterschiedlichen Varianten zukunftsbestimmend für die Einrichtung eines Präpariersaales sein. Da die Austrocknung des Materials dabei stark ist, muss eine optimale Aufbewahrung (s. u.) erfolgen.

Aufbewahrung von Leichen bzw. -teilen oder Organen. Sie erfolgt in Bottichen mit Konservierungslösung, in der Thalheimer-Wand (Konservierung und Lagerung; Kühlung), in Organtanks mit Konservierungslösung, in verschlossenen Gläsern mit Konservierungslösung zumeist in Sammlungen, in mit Konservierungslösung gefüllten Gläsern mit losem Deckel (dabei können die Präparate für Selbststudienzwecke ständig entnommen werden) oder eingeschweißt in durchsichtigen Kunststofffolien.

Die **Lagerung** von Leichen im Präpariersaal erfolgt in einem mit Konservierungslösung angefeuchteten Tuch und einer darum gewickelten Folie, sodass wir eine Art „feuchte Kammer“ erhalten.

Die **Plastination** ist ein Konservierungsverfahren für verwesliche biologische Präparate, deren Strukturelemente fixiert, entwässert (vorzugsweise mit Aceton), mit Reaktionskunststoff wie Silikonkautschuk, Epoxidharz oder Polyester im Vakuum durchtränkt und anschließend gehärtet werden. Das Verfahren wurde von v. Hagens (1977) entwickelt.

Fixierung nach Thiel. Die Vorteile dieser von Walter Thiel in den frühen 1960er-Jahren entwickelten und seither ständig verbesserten Infiltrationsmethode sind: Erhaltung der Konsistenz der Körpergewebe wie beim Lebenden, Erhaltung der natürlichen Farben der Gewebe, minimale Geruchsbelästigung, unbegrenzte Haltbarkeit und Minimierung des Infektionsrisikos. Von allen Fixierungsmethoden kommt das Thiel-Verfahren den

Eigenschaften eines unfixierten Körperspenders am nächsten; es eignet sich daher besonders für Anwendungen in der ärztlichen Fort- und Weiterbildung (z. B. Operationskurse). Die Methode verwendet für die verschiedenen Organsysteme über jeweils eigene Zugangswege unterschiedliche Chemikalien, wobei für das zentrale Nervensystem ein erhöhter Aufwand zu betreiben ist, um ein gutes Ergebnis zu erzielen. Eingesetzt werden hauptsächlich Phenolderivate und Ethylenglykol sowie Nitrate und Sulfite, in geringen Spuren Formaldehyd und in nicht ätzenden Konzentrationen Morpholin.

Kosten für die Köperspenden. Die Kosten für Leichentransport, Fixierung, Friedhofs- und sonstige Gebühren sowie Personalkosten liegen in der Größenordnung von 3.000–5.000 € pro Körperspende.

2 Allgemeine Anatomie

Timm J. Filler, Franz Pera, Friedrich Anderhuber

2.1 Bauplan des menschlichen Körpers

2.1.1 Unterteilung des Körpers

Der menschliche Körper besteht aus dem Stamm (**Truncus**) und zwei Paar Gliedmaßen, Arm und Bein (**Membrum superius**, **Membrum inferius**). Der Stamm besteht aus Kopf (**Caput**), Hals (**Collum**) und Rumpf (**Truncus im engeren Sinn**, künstlerisch der **Torso**). Der Rumpf gliedert sich wiederum in Brust (**Thorax**), Bauch (**Abdomen**) und Becken (**Pelvis**). Der nach hinten gerichtete Teil des Rumpfes heißt unter Einbeziehung des Nackens (**Nucha**) Rücken (**Dorsum**). Der Arm gliedert sich in den Oberarm (**Brachium**), Unterarm (**Antebrachium**) und die Hand (**Manus**). Am Bein unterscheiden wir den Oberschenkel (**Femur**), den Unterschenkel (**Crus**) und den Fuß (**Pes**). Topografisch gliedert sich der Körper in Regionen. Systematisch beschreiben wir die Organsysteme.

2.1.1.1 Orientierung am Körper

Jede wissenschaftliche Arbeit ist auf **Eindeutigkeit** und **Verbindlichkeit** der Sprache angewiesen. Mit den anatomischen Bezeichnungen ist diese Forderung weitgehend erfüllt. Hier besteht eine hohe Übereinstimmung von Bezeichnung und Bezeichnetem.

Ein Einstieg wird durch die Begriffe für eine Lageorientierung am Körper gegeben. Hier sind verschiedene Achsen und Ebenen zu unterscheiden, die senkrecht aufeinander stehen. Es gibt 3 Hauptachsen und die durch sie definierten Hauptebenen.

Achsen (Abb. 2.1, 2.2):

- **Vertikale (= longitudinale) Achse (1)**. Sie verläuft in Längsrichtung (kraniokaudal) vom Scheitel bis zur Sohle. Sie trifft senkrecht auf die Standfläche.
- **Sagittale Achse (3)**. Sie zieht von hinten nach vorn (dorsoventral) durch die hintere und vordere Körperwand.

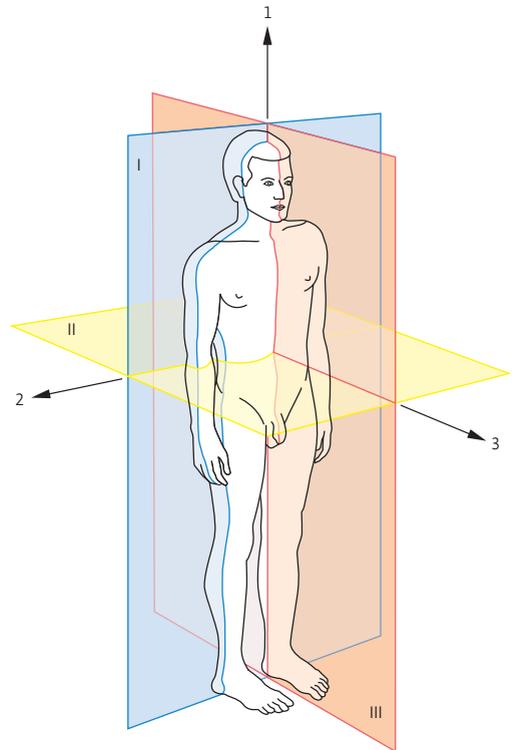


Abb. 2.1 Achsen und Ebenen im menschlichen Körper.

- **Transversale (= horizontale) Achse (2)**. Sie verläuft quer von links nach rechts und verbindet entsprechende Punkte beider Körperseiten miteinander.

Ebenen (Abb. 2.1):

- **Mediane Ebene (= Median-Sagittal-Ebene)** oder **Mittlebene (III)**. Sie verläuft vom Rücken zum Bauch und teilt den Körper vom Kopf bis zum Fuß in zwei seitengleiche Hälften (Antimeren), deshalb auch **Symmetrieachse**.
- **Sagittalebene**. Sie verläuft parallel zur vorigen durch den Körper.
- **Frontalebene (I)**. Sie befindet sich parallel zur Stirn. Sie steht senkrecht auf der vorigen und

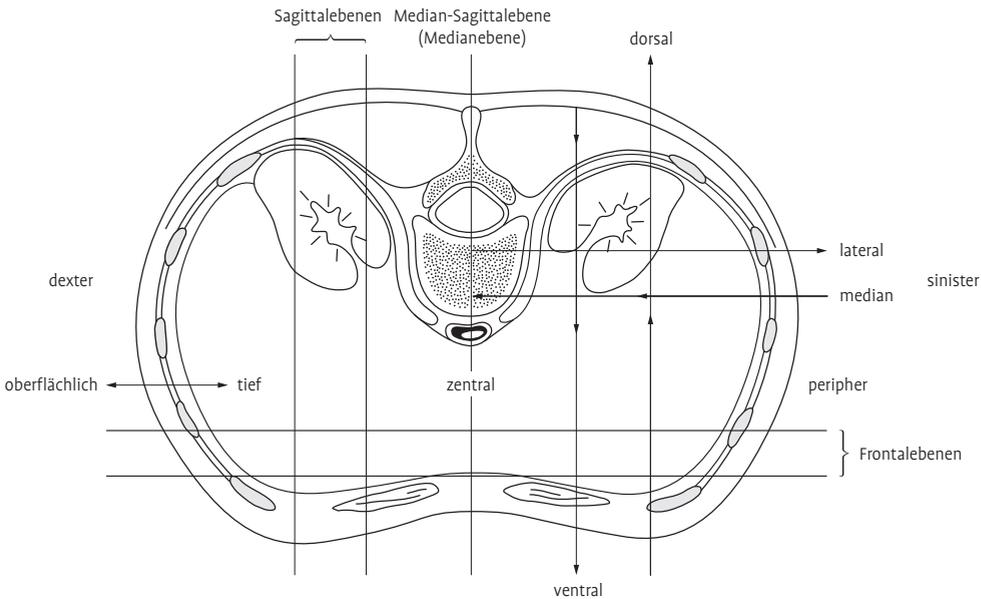


Abb. 2.2 Ausgewählte Achsen und Richtungsbeziehungen an einem Horizontalschnitt durch den menschlichen Körper.

zerlegt den Körper in einen vorderen und hinteren Abschnitt.

- **Transversalebene (II) (= Horizontalebene).** Sie verläuft quer durch den Körper und steht senkrecht auf den Sagittal- und Frontalebene. Sie gliedert den Körper in obere und untere Abschnitte.

Die Medianebene kommt als Sonderfall nur einmal, die übrigen Ebenen beliebig häufig vor.

Richtungsbezeichnungen (Abb. 2.2). Diese sind so gewählt, dass sie unabhängig von der Lage des Menschen im Raum gültig sind. So ist beispielsweise der Kopf beim liegenden Menschen auch „oben“; „rechts“ und „links“ beziehen sich auf die entsprechende Seite des zu beschreibenden Sachverhalts.

- **Bezeichnungen am Rumpf**

- cranialis, e (eingedeutscht kranial)** – schädelwärts
- caudalis, e (kaudal)** – schwanzwärts, steißwärts
- superior, ius** – oben, weiter oben
- inferior, ius** – unten, weiter unten
- dorsalis, e (dorsal)** – rückenwärts
- ventralis, e (ventral)** – bauchwärts
- posterior, ius** – hinten, weiter hinten
- anterior, ius** – vorn, weiter vorn
- medialis, e (medial)** – zur Medianebene hin, zur Mitte hin

lateralis, e (lateral) – seitlich, von der Medianebene weg

medianus, a, um (median) – in der Medianebene gelegen

dexter, dextra, dextrum – rechts

sinister, sinistra, sinistrum – links

superficialis, e – oberflächlich, oberflächlicher gelegen, der Haut näher

profundus, a, um – tief, tiefer gelegen

internus, a, um – innere

externus, a, um – äußere

centralis, e (zentral) – zum Körperinneren hin

longitudinalis, e (longitudinal) – längs verlaufend

- **Bezeichnungen an den Gliedmaßen**

proximalis, e (eingedeutscht proximal) – rumpfwärts, näher zum Rumpf hin gelegen

distalis, e (distal) – zum Extremitätenende hin, entfernter vom Rumpf

radialis, e (radial) – speichenwärts, zur Speichenseite, Daumenseite hin

ulnaris, e (ulnar) – ellenwärts, zur Ellenseite, Kleinfingerseite hin

tibialis, e (tibial) – schienbeinwärts, zur Schienbeinseite, Großzehenseite hin

fibularis, e (fibular) – wadenbeinwärts, zur Wadenbeinseite, Kleinzehenseite hin

palmaris, e (palmar) – handflächenwärts, zur Handfläche hin

dorsalis, e (dorsal) – handrückenwärts, zum Handrücken hin

plantaris, e (plantar) – fußsohlenwärts, zur Fußsohle hin

dorsalis, e (dorsal) – fußrückenwärts, zum Fußrücken hin

- **Bezeichnungen am Kopf**

frontalis, e (eingedeutscht frontal) – stirnwärts, in Richtung der Stirn

occipitalis, e (okzipital) – hinterhauptwärts

basalis, e (basal) – schädelbasiswärts

oralis, e (oral) – mundwärts, zum Mund gehörig

vestibularis, e (vestibulär) – (mund)vorhofwärts, im Mundvorhof gelegen

labialis, e (labial) – lippenwärts

buccalis, e (bukkal) – wangenwärts

lingualis, e (lingual) – zungenwärts

nasalis, e (nasal) – nasenwärts

temporalis, e (temporal) – schläfenwärts

palatinalis, e (palatinal) – gaumenwärts, zum Gaumen gehörig

pharyngealis, e (pharyngeal) – rachenwärts, zum Rachen gehörig

rostralis, e (rostral) – mundwärts

- **Richtungsbezeichnungen an Gebiss und Zähnen**

Fachausdrücke, die in der Zahnheilkunde der Orientierung dienen:

mesialis, e (mesial): der Medianebene (des Zahnbogens) zugekehrt

distalis, e (distal): dem hinteren Ende des Zahnbogens zugekehrt

apicalis, e (apical): an der Wurzelspitze (Apex), zur Wurzelspitze hin (auch apikal)

cervicalis, e (cervical): am Zahnhals, zum Zahnhals hin (auch zervikal)

occlusalis, e (occlusal): an der Kaufläche, zur Kaufläche hin (auch okklusal)

incisalis, e (incisal): an der Kaukante, zur Kaukante hin

approximalis, e (approximal): an der Kaufläche, zur Kaufläche hin (approximalwärts)

Bewegungsrichtungen und -bezeichnungen:

- **Gelenke der Extremitäten**

Flexion – Beugung des Rumpfes oder der Extremitäten um die transversale Achse

Extension – Streckung des Rumpfes oder der Extremitäten um die transversale Achse

Adduktion – Heranführen der Extremitäten an den Körper

Abduktion – Wegführen der Extremitäten vom Körper. Bei den Extremitäten erfolgt diese Bewegung um die sagittale Achse.

Außenrotation – Außendrehung der Extremitäten um ihre Längsachse

Innenrotation – Innendrehung der Extremitäten um ihre Längsachse

Supination – Umwendbewegung der Hand bzw. des Fußes, wobei die Hohlhand nach oben gerichtet bzw. der mediale Fußrand gehoben wird

Pronation – Umwendbewegung der Hand bzw. des Fußes, wobei die Hohlhand nach unten gerichtet bzw. der mediale Fußrand nach unten gesenkt wird

Zirkumduktion – Umföhrbewegung der Extremitäten

- **Kiefergelenk**

Adduktion – Heranführen des Unterkiefers an den Oberkiefer

Abduktion – Wegführen des Unterkiefers vom Oberkiefer. Beide Bewegungen erfolgen um eine transversale Achse.

Protrusion – gleichmäßige Bewegung beider Gelenkkondylen nach ventral.

Retrusion – gleichmäßige Bewegung beider Gelenkkondylen nach dorsal. Beide Bewegungen erfolgen entlang einer sagittalen Achse.

Mediotrusion – Bewegung des Unterkieferkondylus zur Mitte (Balance-, Mediotrusionsseite)

Laterotrusion – Bewegung des Unterkieferkondylus nach außen (Arbeits-, Laterotrusionsseite). Beide Bewegungen erfolgen um eine vertikale (longitudinale) Achse.

2.1.2 Gliederung des Körpers

Die **Anlage** des Menschen ist heteropolar, segmental, antimer und in dorsoventraler Richtung differenziert. Sie hat die Potenz, einen weiblichen oder einen männlichen Organismus zu bilden.

Die grundsätzlichen Charakteristika des menschlichen Körpers, die Regeln seines Körperbaus und Prinzipien seiner Gliederung nennen wir ordnende Prinzipien. Dazu gehören Polarität, bilaterale Symmetrie, Metamerie und dorsoventrale Gliederung.

Polarität. Der menschliche Körper ist polar differenziert. Damit verfügt er über eine **heteropole Hauptachse**, an der man **kranial** (kopfwärts) und

kaudal (schwanzwärts) je einen Pol unterscheidet. Senkrecht auf dieser Achse können 2 weitere Achsen errichtet werden. Die eine unterscheidet **dorsal** (rückenwärts) von **ventral** (bauchwärts), die andere rechte und linke Seite (**lateral** = seitwärts).

Bilaterale Symmetrie. Der Mensch ist, wie die meisten Wirbeltiere, bilateral symmetrisch, d. h. aus Antimeren gebaut. Unter **Antimeren** versteht man die 2 spiegelbildlich gleichen Hälften, die bei einer Schnittebene senkrecht durch die Hauptachse in dorsoventraler Richtung (**Medianebene**) entstehen. Eine genaue Analyse ergibt, dass dieses Merkmal sowohl für die Körperhälften als auch für die Extremitäten nicht streng verwirklicht ist.

- **Unpaare Organe** (Herz, Magen-Darm-Kanal, Leber, Milz, Pankreas u. a.) sind exzentrisch gelegen. Auch paarige Organe (Lungen, Nieren, Nebennieren u. a.) können eine asymmetrische Form und Lage haben.
- Die **Symmetrie** zeigt feinere Abweichungen (Stellung der Nase; Größe der Gesichtshälften; Größe der Augen; Größe, Stellung und Form der Ohren; seitliche Krümmungen der Wirbelsäule u. a.) charakterisieren das jeweilige Individuum.
- Auch die **Händigkeit** hat Symmetrieabweichungen zur Folge. Zum Beispiel haben Rechtshänder einen muskelkräftigeren rechten Arm und eine dezente Links-Skoliose (Krümmung der Wirbelsäule aus der Symmetrieebene heraus).
- Die zunehmende **Lateralisierung von Funktionen** auf eine bestimmte Körperseite im Rahmen seiner voranschreitenden Evolution ist eine weitere Besonderheit des Menschen. Händigkeit und analog Füßigkeit oder Denkprozesse (Sprache) sind beispielhaft dafür.

Metamerie. Der Mensch zeigt eine Gliederung in sich wiederholende Abschnitte längs der heteropolen Hauptachse. Diese Segmente heißen **Metamere**. Die Metamerie, deren Grundelemente die **Somiten** (Ursegmente) darstellen, ist beim Menschen nur in der Embryonalperiode eindeutig zu erkennen. Die kraniokaudal aufeinander folgenden Stücke sind zueinander homolog und bilateralsymmetrisch gebaut. Sie entstehen nicht gleichzeitig, sondern von kranial nach kaudal fortschreitend. Ausdruck der **Metamerie beim ausgebildeten Organismus** sind beispielsweise die segmental angeordneten Zwischenwirbelscheiben, Rippen, Interkostalmuskeln und einige Muskelgruppen am Rücken, Segmentalgefäße (Aa., Vv. intercostales

und lumbales) sowie Segmentalnerven (Nn. intercostales). **Nicht metamer** angelegt sind dagegen Kopf, Gehirn, Rückenmark, außerdem Leibeshöhle und Eingeweide.

Dorsoventrale Gliederung. Neben der bilateralen Symmetrie und der Metamerie gibt es eine gesetzmäßige Anordnung der Hauptorgansysteme in dorsoventraler Richtung. Dabei finden sich dorsal das Zentralnervensystem, darunter bzw. davor (bei Aufrichtung) die Wirbelsäule, die Hauptarterien, der Darm, ventral das Herz und zu beiden Seiten des Darms die Leibeshöhle, an deren dorsaler Wand beide Nieren und beide Keimdrüsen angefügt sind.

2.1.3 Geschlechtsdimorphismus

Die **komplexe Geschlechtsentwicklung** resultiert aus dem Zusammenspiel genetischer, hormoneller, somatischer und exogener Faktoren. Nicht zuletzt spielt auch die psychische Konstitution eine Rolle. **Dimorphismus** ist die Bezeichnung für das regelmäßige Auftreten von 2 unterschiedlichen Erscheinungsformen bei ein und derselben Art.

Es handelt sich um eine Sonderform des **Polymorphismus**. Bei dem Geschlechts- oder **Sexualdimorphismus** erkennt man bei der Betrachtung des Organismus oder vieler seiner Organe eine für das Weibliche und eine für das Männliche typische Gestalt (Abb. 2.3). Grundsätzlich ist die Anlage eines Organismus mit Ausnahme der Geschlechtszellen dazu in der Lage, beide Ausgestaltungen hervorbringen.

Der Geschlechtsdimorphismus des erwachsenen Menschen wird durch primäre und sekundäre Geschlechtsmerkmale bestimmt.

Primäre Geschlechtsmerkmale. Es handelt sich um die sich während der Pränatalperiode entwickelnden inneren und äußeren Geschlechtsorgane.

Sekundäre Geschlechtsmerkmale. Das sind vor allem die geschlechtsspezifischen Befunde an Körperabschnitten, die sich insbesondere durch unterschiedliche Größen- und Proportionsverhältnisse auszeichnen und mit der Pubertät entstehen.

Beim Mann sind Skelett und Muskulatur stärker ausgebildet. Der Schulterbereich ist breiter. Der

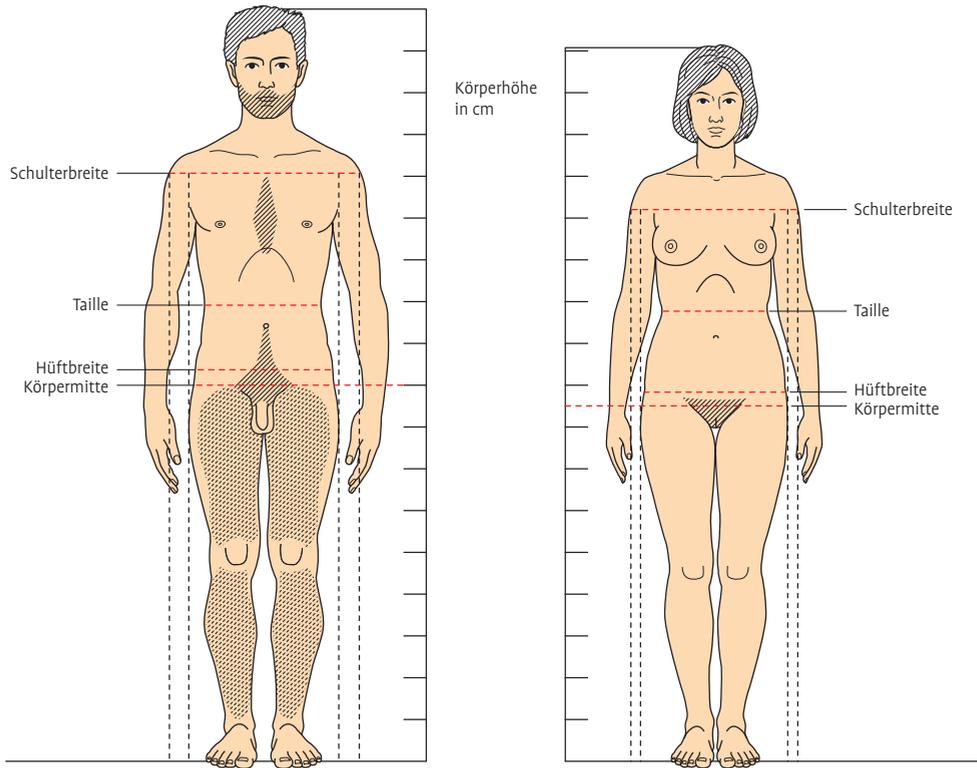


Abb. 2.3 Körpergestalt und -proportionen bei Mann und Frau als Ausdruck des Geschlechtsdimorphismus (verän-

dert nach H. Stratz und G.-H. Schumacher). Der Behaarungsmodus ist schraffiert bzw. punktiert dargestellt.

Kehlkopf ist größer („Adamsapfel“) und die Körperbehaarung intensiver.

Die Frau besitzt einen relativ langen Rumpf, breitere Hüften, geringere Schulterbreite und kürzere Gliedmaßen. Der weibliche Schädel ist kleiner, kürzer und weniger modelliert als der des Mannes. Er ähnelt mehr dem kindlichen Schädel. Das relative Hirngewicht (vor allem in Bezug auf die Anzahl der Skelettmuskelzellen) der Frau ist im Mittel größer, das absolute Hirngewicht im Mittel geringer als das des Mannes. Das vermehrte subcutane Fettpolster verleiht dem weiblichen Körper rundliche, weiche Formen. Die auffälligsten sekundären Geschlechtsmerkmale der Frau sind die Beckenmaße (Arcus pubicus) und die Brustdrüsen.

Klinik: In der Regel besteht Übereinstimmung zwischen allen an der Ausbildung des Geschlechts beteiligten Faktoren. Abweichungen dieses Zusammenspiels führen zu Störungen in der Geschlechtsfestlegung (z. B. **Intersexualität**).

2.1.4 Körperbautypen

Mit der **Typologie** wurde oft versucht, eine Korrelation zwischen körperlichen und psychischen Merkmalen herzustellen. Solche spekulativen Zusammenhänge sind mehrfach widerlegt.

Die gefundenen **Korrelationen** zwischen Morphe und Psyche sind zumeist nur über dritte Faktoren erklärlich. Hingegen können die Begriffe aus der Typologie als Deskriptoren eine orientierende Vorstellung bestimmter Konfigurierungen von Organen ermöglichen (z. B. Herzform und -lage, Thoraxform). Genauere Vorstellungen liefern allerdings Messzahlen (Halsumfang gemessen unterhalb des Kehlkopfes, Thoraxumfang gemessen am Übergang zum Processus xiphoideus, Taillenumfang gemessen zwischen Rippenbogen und Beckenkamm, Hüftumfang gemessen in der größten Ausdehnung der Glutealregion). Aufgrund der

weiten Verbreitung der Einordnung in Konstitutionstypen sind die beiden wichtigsten Einteilungen hier kurz beschrieben.

1. **Körperbautypen nach Kretschmer** (Abb. 2.4). Es werden 3 Charakterisierungen unterschieden. Nur etwa 60% aller Individuen lassen sich den Körperbautypen nach **Kretschmer** zuordnen. Unter **Dysplastiker** fasst man unbestimmbare Individuen zusammen.
 - Der **leptosome Typ** ist hager und schlank, hat lange Gliedmaßen, ein schmales Gesicht und eine scharf vorspringende Nase. Er ist zäh und ausdauernd. Den extremen leptosomen Typ nennt man **Astheniker**.
 - Der **athletische Typ** ist mittelgroß bis hochgewachsen und besitzt starke Knochen, kräftige Gelenke und eine ausgeprägte Muskulatur. Der Brustkorb ist weit, die Schulterbreite groß. Demgegenüber erscheint das Becken verhältnismäßig schmal. Die Akren sind betont. Ein kräftiger Hals trägt einen derben, hohen Schädel. Die Haut ist dick und straff. Der athletische Typ wird auch als Mischform zwischen Leptosomen und Pyknikern angesehen.
 - Der **pyknische Typ** ist erst zwischen dem 30. und 60. Lebensjahr deutlich ausgeprägt. Kennzeichnend für ihn ist das große Volumen der Körperhöhlen und die Neigung zum Fettansatz am Rumpf. Ein breiter Kopf sitzt mit einem kurzen, dicken Hals zwischen den etwas hochgezogenen Schultern. Der Rumpf hat insgesamt oft eine „Fassform“. Die Gliedmaßen sind kurz.
2. **Körperbautypen nach Sheldon** (Abb. 2.4). Es werden ebenfalls 3 Körperbautypen unterschieden. **Sheldon** leitete seine Terminologie von den 3 Keimblättern ab. Er definierte die Kombinationen der Somatypen mit Zahlenkombinationen, wobei jedes Keimblatt mit einer Ziffer von 1 bis 7 gewichtet wird, sodass für jeden Menschen ein individueller Typ bestimmt werden kann.
 - Der **ektomorphe Typ** ist schlank mit dünnen Extremitäten. Er hat einen größeren transversalen Durchmesser. Muskulatur und subkutanes Fettpolster sind gering ausgebildet (Ziffer für die Reinform: 1–1–7).
 - Der **mesomorphe Typ** ist mittelwüchsig. Er hat breite Schultern und eine stärker gewölbte Brust. Arme und Beine sind dicker (Ziffer für die Reinform: 1–7–1).

- Der **endomorphe Typ** hat einen dicken subkutanen Fettmantel und ist durch rundliche Formen gekennzeichnet. Arme und Beine sind dicker. Der Bauch tritt stärker hervor als die Brust, der sagittale Durchmesser ist vergrößert (Ziffer für die Reinform: 7–1–1)

2.1.5 Wachstum

Wachstumsprozesse werden von genetischen, endokrinen und alimentären Faktoren sowie von Umwelteinwirkungen und pathologischen Einflüssen gesteuert und geprägt. Das Körperwachstum ist aufgrund dieser vielfältigen Einflussmöglichkeiten großen Schwankungen unterworfen.

Wachstum bedeutet in erster Linie Größenzu- oder -abnahme. Liegt ein **Positivwachstum** vor, so vergrößern sich Körper- und Organgewichte bzw. die Körperlänge. Wenn im Verlaufe des Lebens die katabolischen Stoffwechselprozesse (Abbau) überwiegen, kommt es zu regressiven Vorgängen (Rückbildungsvorgänge, z. B. Involution des Thymus nach der Pubertät). Es liegt dann ein **Negativwachstum** vor. Unter **Nullwachstum** versteht man Wachstumsstillstand.

Innere Organe unterliegen zunächst im Wachstum der **Hyperplasie** (Vergrößerung durch Zellteilung), später beruht das Organwachstum zumeist auf **Hypertrophie** (Vergrößerung durch Zellvergrößerung). Die Zellen einiger Organe wie Milz und Leber behalten ihre Zellteilungsfähigkeit.

Wachstum erfolgt durch Hypertrophie (Zellvergrößerung) oder Hyperplasie (Zellvermehrung).

- **Wachstum** ist Zunahme von Masse und (wichtiger) Oberfläche. Neben dem Körperlängenwachstum sind messbare Parameter Gewicht, Kopfumfang, Knochenkernentwicklung, Dentition sowie sensomotorische, sexuelle und psychosoziale Entwicklung.
- **Entwicklung** ist Wachstum und **Differenzierung**, d. h. Spezialisierung und Erwerb neuer und erweiterter Funktionsfähigkeit, ggf. mit Verlust anderer Fähigkeiten. Entwicklung ist auf allen anatomischen Ebenen als morphologische Differenzierung zu finden. **Reifung** stellt eine gerichtete Differenzierung dar, zumeist entsprechend einem genetischen Plan unter Einfluss äußerer Faktoren.

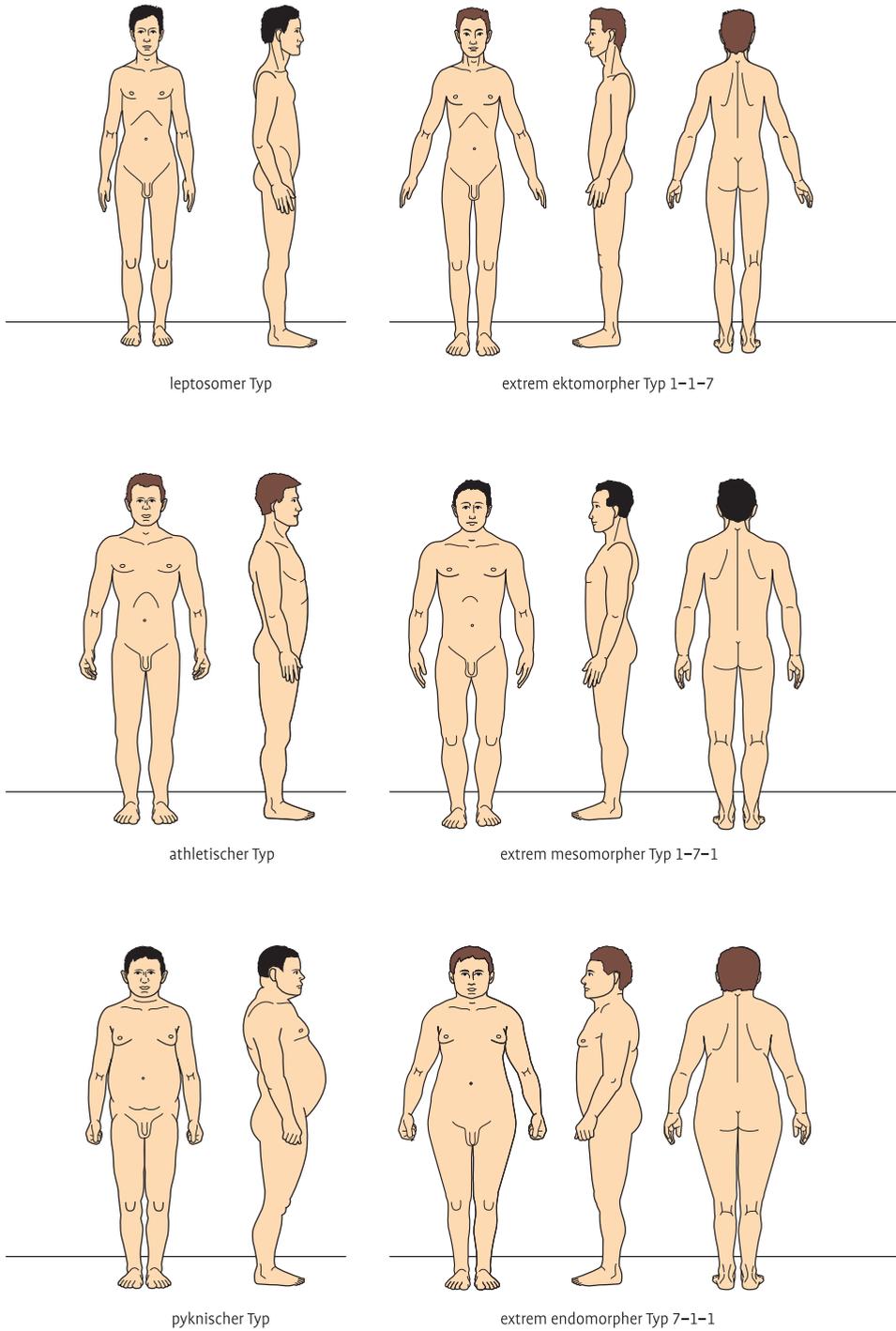


Abb. 2.4 Konstitutionstypen des Menschen. **Links:** nach Kretschmer (in Anlehnung an Kretschmer). **Rechts:** nach Sheldon (in Anlehnung an Sinclair).

2.1.5.1 Kindliches Wachstum und Entwicklung

Längenwachstum, Gewichts- und Größenzunahme bilden quantitative Aspekte der körperlichen Entwicklung.

Die Wachstumsprozesse sind begleitet von einem Gestaltwandel und Verschiebung der Verhältnisse der Körperteile zueinander. Dabei sind die Streubreite der Norm und die Änderung der Größen in der Zeit ebenso wichtig wie die absoluten Größen. Die Abhängigkeit vom Lebensalter wird in **Perzentilenkurven** dargestellt. Abweichungen von mehr als dem Doppelten der Standardabweichung gelten als abnorm, aber nicht notwendigerweise als pathologisch.

Oszillierendes Wachstum. Wachstumsprozesse können sich **phasenhaft** und **rhythmisch** vollziehen. So wachsen Kinder und Jugendliche im Sommer schneller als im Winter. Man spricht von einem **Zirkannualrhythmus**. Die endogenen und exogenen Einflüsse haben je nach Alterstufe unterschiedliches Gewicht. Die Entwicklung ist letztlich die Konvergenz aus beiden.

Für die Einteilung morphologischer Entwicklungsprozesse verwendet man bestimmte Marker. Dazu gehören Teilung und Verlagerung von Nerven- und Gliazellen sowie deren Differenzierung, die Entwicklung der verschiedenen Hirnbereiche oder die Reifung komplexer neuronaler Verbände (z. B. Herausbildung des Schlaf-Wach-Rhythmus).

Körperlänge. Bis zum Abschluss des Wachstums werden rhythmische Schwankungen mit Perioden der Fülle (**Massenwachstum**) und der Streckung (**Längenwachstum**) festgestellt. In der Reifungsperiode zwischen dem 15. und 20. Jahr finden Massen- und Längenwachstum gleichzeitig, beim weiblichen Geschlecht früher als beim männlichen, statt. Innerhalb der Schwankungsbreite bei **Normalwuchs** lassen sich **Konstitutionsunterschiede** feststellen.

Die mittlere Körperlänge beträgt in Deutschland

- bei Neugeborenen
 - ♂ 51,2 cm (Range 46,3–55,8 cm),
 - ♀ 50,0 cm (Range 46,4–54,2 cm)
- bei 18–19-Jährigen
 - ♂ 176 cm (Range 160–190 cm)
 - ♀ 164 cm (Range 150–175 cm).

Als Faustregel gilt, dass ein Säugling sein Geburtsgewicht nach 5 Monaten verdoppelt und nach 12 Monaten verdreifacht hat. Die Körpergröße eines Knaben beträgt mit 2 Jahren etwa 50% der definitiven Größe (♂ 89 cm, ♀ 87 cm).

Kopfumfang. Die Größe des Schädels ist bei Neugeborenen eine wichtige Messgröße und wird anhand des Kopfumfanges in Höhe der stärksten Ausdehnung des Hinterhauptes bestimmt. Er beträgt zur Geburt um die 34 cm, im 3. Lebensjahr bei Jungen 51 cm und bei Mädchen 50 cm, bei 18–19-Jährigen entsprechend 58 cm bzw. 55 cm.

Akzeleration. Die Akzeleration ist eine Wachstumsbeschleunigung, die seit Mitte des 19. Jahrhunderts in Europa bei Kindern und Jugendlichen aller Altersklassen beiderlei Geschlechts beobachtet wird. Sie betrifft die gesamte körperliche Entwicklung (Zunahme der Endgröße, größeres Geburtsgewicht, beschleunigtes Wachstumstempo = **Wachstumsakzeleration**) und die sexuelle Reifung (Vorverlegung der Pubertät = **Entwicklungsakzeleration**). Es wird allgemein angenommen, dass die Verbesserung der Lebensbedingungen und des sozialen Umfeldes eine entscheidende kausale Rolle spielen und sich positiv auf den Organismus auswirken; ebenfalls soll sich die sog. **Urbanisation**, die Einflüsse des städtischen Lebens auf die Kinder, bemerkbar machen.

Pubertätsakzeleration. Bei Mädchen und Knaben ist das Längenwachstum bis zum 10. Lebensjahr etwa gleich, wobei jedoch Knaben von Geburt an durchschnittlich etwas größer sind als Mädchen. Mit Beginn der Pubertät kommt es zu einem Pubertätswachstumsschub (Pubertätsakzeleration), der bei Mädchen früher einsetzt. Da das Längenwachstum bei Knaben länger (20 Jahre) anhält als bei Mädchen (18 Jahre), übertrifft die endgültige Körperhöhe der Männer die der Frauen. Durchschnittlich sind Frauen etwa 12 cm kleiner als Männer. Die angegebenen Werte beziehen sich alle auf Europa.

Knochenkernentwicklung. Ein wichtiger Indikator und Vergleichsmaßstab für **Entwicklungsprognosen** ist die Knochenkernentwicklung. Diese kann radiologisch bestimmt werden. Anhand von Atlanten lassen sich in Abhängigkeit vom Alter mit großer Vorhersagegenauigkeit die Endgrößen von Kindern bestimmen. Typischerweise wird die Handwurzel als Stelle geringer Strahlenempfindlichkeit

bei großer Knochenzahl auf kleinem Raum für die Analyse gewählt.

Dentition. Siehe Kap. 6.14.1.3.

2.1.5.2 Wachstum auf Organ- und Zellebene

Die Wachstumsprozesse können abhängig von der jeweils hauptsächlich treibenden Kraft von unterschiedlichem Charakter sein.

Proportionsverschiebungen. Während des Wachstums unterliegt der menschliche Organismus zahlreichen Proportionsverschiebungen. Die Ursache liegt darin, dass einzelne Körperabschnitte und Organe diskontinuierlich, also mit unterschiedlicher Geschwindigkeit wachsen. Daraus resultieren Veränderungen ihrer relativen Größe. Ein wichtiges Beispiel ist die **Kopfhöhe**: Beim Erwachsenen entspricht sie einem Achtel der Körperlänge, beim 6-jährigen Kind etwa einem Sechstel, beim Neugeborenen dagegen einem Viertel (Abb. 2.5).

Anpassungswachstum. Von dem vorher beschriebenen Körperwachstum unterscheidet man das Anpassungswachstum. Dieses tritt auf, wenn sich ein Organ an bestimmte Funktionszustände anpassen muss. Man differenziert dabei zwischen einem **funktionellen** (mit vorhandenen Strukturen mehr zu leistende Arbeit), einem **strukturellen** (Vergrößerung und Vermehrung spezifischer Organbau-

Tab. 2.1 Ausgewählte Lebenszeiten von Zellen

Zelle/Gewebe	Mittlere Lebenszeit
Granulozyt, Monozyt	1–1,4 d
Dünndarmepithel	1,4 d
Colonepithel	6–10 d
Alveolarepithel	8,1 d
Leberepithel	10–20 d
Lymphozyt	10–100 d (Jahre)
Epidermis	19 d
respiratorisches Epithel (Trachea)	48 d
Urothel	67 d
Erythrozyt	120 d
Osteozyt	25–30 a
Nierenepithel	kaum Maserung
Neuron	kaum Maserung
Myozyt (Skelettmuskel)	kaum Maserung
Oozyt	kaum Maserung
Gld. sudorifera	kaum Maserung
Haarfollikel	kaum Maserung

steine) und einem **biochemischen** (durch Hormone ausgelöste Wachstumsvorgänge) **Anpassungswachstum**. Ein typisches Beispiel für ein Anpassungswachstum ist das Sportlerherz, das den erhöhten Kreislaufleistungen Rechnung tragen muss (Herzmuskelhypertrophie).

Maserung. Ein ständiger physiologischer Ersatz von Zellen im Sinne einer fortwährenden Regeneration ist bei sog. Verbrauchsgeweben (Blut, Schleimhäute, Haut, Haare, Keimdrüsen etc.) zu beobachten (Tab. 2.1). Man spricht von Maserungen im Gegensatz zu Dauergeweben, die durch ihre hohe Spezialisierung ihre Teilungsfähigkeit verloren haben.

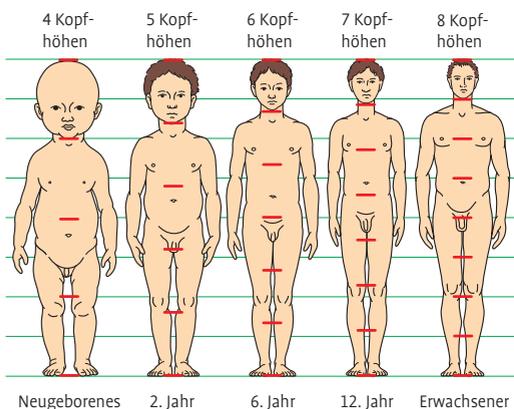


Abb. 2.5 Veränderungen der Körperproportionen und der Schädelgrößen im Vergleich zum Gesamtorganismus während des Wachstums. 5 Alterstufen sind gleich groß gezeichnet (nach Stratz).

2.2 Aufbau des Organismus

Die **Zelle** stellt die kleinste lebende Baueinheit dar. Verbände gleichartig differenzierter Zellen und ihrer zugehörigen Interzellularsubstanz werden unter dem Begriff **Gewebe** zusammengefasst. Es gibt vier Hauptgewebe: **Epithelgewebe**, **Binde- und Stützgewebe**, **Muskelgewebe** und **Nervengewebe**. Das Blut nimmt eine Sonderstellung ein: Seine Zellen sind innerhalb der flüssigen Phase des Blutplasmas frei gegeneinander beweglich.

Mehrere Gewebe vereinigen sich zu einem **Organ**, das mit einer gesetzmäßig aufgebauten Form eine bestimmte Funktion verbindet. Dabei braucht die Funktion nur an eines der zum Aufbau dienenden Gewebe gebunden zu sein. Organe, die im Dienste einer gleichgerichteten Funktion stehen, werden zu **Organsystemen, Trakten** oder **Apparaten** zusammengefasst.

2.2.1 Die Zelle

Der Begriff **Zelle** wurde durch den englischen Botaniker R. Hooke in die wissenschaftliche Literatur eingeführt. Er berichtete 1667 über den Bau von Holundermark und Kork aus winzigen „cells“. Eng verbunden mit der Entwicklung des Mikroskops vollzog sich der Erkenntnisgewinn zum Bau der Zelle. 1838 erkannte der Botaniker M.J. Schleiden die Zelle als das Grundelement des pflanzlichen Organismus. Für den tierischen Organismus bestätigte 1839 der Anatom Th. Schwann diese grundlegende Erkenntnis. Damit war eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung der modernen Biologie geschaffen. Der Pathologe R. Virchow (1821–1902) verhalf der Zellenlehre zu einem ersten Höhepunkt. Er wies nach, dass die Zelle das kleinste selbstständig lebensfähige Formelement des menschlichen Körpers ist. Seine „Zellulärpathologie“ bestimmte nachhaltig die weitere Forschung.

Jede voll funktionsfähige Zelle besteht aus einem Zellkern (**Nucleus**), der in den Zellleib (**Zytoplasma**) eingebettet ist. Kernlose Zellen vermögen nur kurze Zeit die Lebensprozesse fortzuführen. Das gilt auch für die kernlosen roten Blutzellen (Erythrozyten) und die Blutplättchen (Thrombozyten) des Menschen, die beide hochspezialisierte Zellformen mit begrenzter Lebensdauer sind. Zellleib und Zellkern stellen also eine funktionelle Einheit dar.

Bei den einzelligen Lebewesen, **Protozoen**, erfüllt die eine Zelle alle für die Erhaltung des Individuums und der Art notwendigen Aufgaben. Sie nimmt die Nahrung auf, verarbeitet sie und scheidet die Schlacken aus. Sie bewegt sich in ihrer Umwelt, bildet dafür eventuell schon eine Art von Muskelfibrillen aus, nimmt die Reize der Umwelt auf, verarbeitet diese und reagiert darauf zweckentsprechend. Durch Teilung sichert sie die Erhaltung der Art. Bei den mehrzelligen Lebewesen, den **Metazoen**, kommt es zu einer Arbeitsteilung. Zur Erfüllung der spezifischen Aufgaben ist nun für

den Erhalt des mehrzelligen Lebewesens die Herausbildung von speziell differenzierten Zellen und Zellgruppen erforderlich.

Lebenserscheinungen an Zellen:

- Stoffwechsel
- Bewegung
- Reizbeantwortung
- Wachstum und Vermehrung

Zelltod

Apoptose. Physiologischer Zelluntergang, von der Zelle selbst gesteuert („programmierter“ Zelltod), Schädigungen der Zellumgebung sollen damit verhindert werden.

Nekrose. Pathologischer Zelluntergang, schädigende Einflüsse bringen die Zelle zum Absterben, entzündliche Umgebungsreaktionen.

Weiteres über die Zelle siehe Lehrbücher der Histologie.

2.2.2 Die Gewebe

Die vier Hauptgewebe stammen aus unterschiedlichen Anlagen, den Keimblättern. Sie entstehen als erste Zellverbände des Keimlings. Diese liegen schichtweise aufeinander und bilden die Keimscheibe, die zunächst 2, später 3 Keimblätter umfasst: **Ektoderm, Mesoderm, Entoderm**. Die Entwicklung der Keimblätter wird **Gastrulation** genannt.

Primäre Keimblätter (Abb. 2.6) sind **primäres Entoderm** und **Ektoderm**. Sie gehen aus dem Embryoblasten hervor und bilden die Keimscheibe. Das Entoderm ist der Blastozystenhöhle (später primärer Dottersack) und das Ektoderm der Amnionhöhle zugewandt. In der 3. Woche entsteht das 3. Keimblatt, das **Mesoderm**, indem Zellen aus einer Verdickung des Ektoderms (Primitivstreifen) zwischen Ektoderm und Entoderm einwandern. (Abb. 2.7) Damit wird auch das primäre Entoderm durch das definitive ersetzt.

Die Bildung von Organanlagen beruht wesentlich auf der Interaktion von Zellen verschiedener Keimblätter. Da Organe aus mehreren Geweben bestehen, können sie nicht auf ein Keimblatt zurückgeführt werden, doch gilt folgende Orientierung:

- Aus dem **Ektoderm** entstehen Gewebe zur Abgrenzung und Kommunikation mit der Umwelt: Epidermis, Nervensystem, Teile von Sinnesorganen.

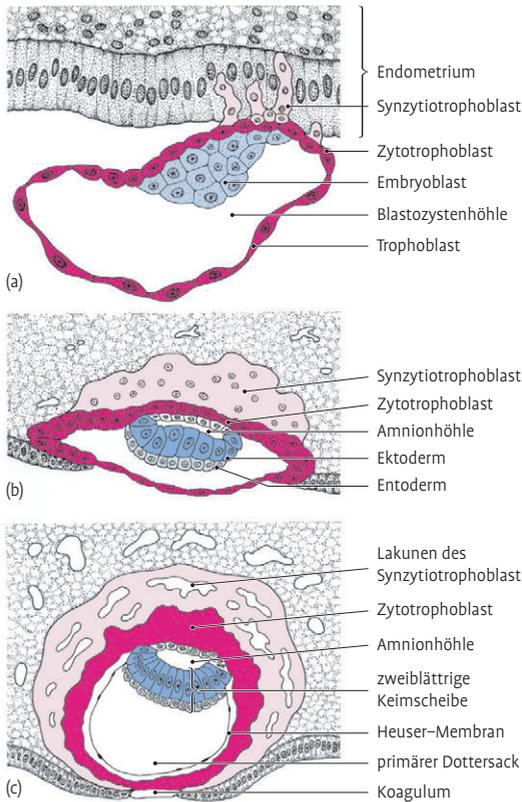


Abb. 2.6 Implantation, zweiblättrige Keimscheibe (modifiziert nach J. Langman); hell-, dunkelrot: Trophoblast; blau: Embryoblast bzw. Ektoderm der zweiblättrigen Keimscheibe. **a:** Synzytiotrophoblast durchdringt endometriales Epithel; **b:** Synzytiotrophoblast im soliden Stadium; primäres Ektoderm, Entoderm sowie Amnionhöhle sind entstanden; **c:** Implantation nahezu vollendet (Koagulum), Synzytiotrophoblast im lakunären Stadium (Histotrophe), primärer Dottersack gebildet.

- Aus dem **Entoderm** werden die (ebenfalls abgrenzenden) Epithelien des Magen-Darm-Kanals mit Abkömmlingen (Bronchialbaum, Alveolarepithel) und Anhangsorganen (Drüsen).
- Aus dem **Mesoderm** entwickeln sich Gewebe für viele Organe, z. B. Binde- und Stützgewebe, glattes und quer gestreiftes Muskelgewebe und auch die serösen Häute.

2.2.2.1 Epithelgewebe

Das Epithel- oder Grenzflächengewebe bedeckt kontinuierlich die äußeren und inneren Oberflä-

chen des Körpers und stellt somit die Verbindung mit der Umwelt her. Epithelien sind in der Lage, Stoffe aufzunehmen (**Resorption**), Stoffe zu bilden und abzugeben (**Sekretion**). Sie vermitteln also den **Stoffaustausch** zwischen Körper und Umwelt und zwischen einzelnen Teilen des Körpers selbst. Zur **Reizaufnahme** ist das Epithel mit dem Nervensystem eng verbunden.

Epithelien können aus allen 3 Keimblättern entstehen: Die innere Auskleidung der Blutgefäße (Endothel) und das Epithel der serösen Häute (Mesothel) sind beispielsweise mesodermaler Herkunft.

Zell-Zell-Kontakte

Typisch für Epithelien ist ein relativ geschlossener Zellverband mit geringer Ausbildung des Interzellularraumes. Der Zusammenhalt der Zellen und die von einem Grenzflächengewebe zu erbringenden **Barriereleistungen** erfordern die Ausbildung von Zell-Zell-Kontakten unterschiedlicher Art.

Zonulae occludentes (Tight junctions). Ist eine weitgehende oder vollständige Abdichtung des Interzellularraumes zur Verhinderung von Austauschprozessen zwischen dem Interzellularraum des Epithelverbandes und dem umgebenden Extrazellularraum notwendig, so kann dies durch die Ausbildung von Zonulae occludentes erreicht werden. In einer Zonula occludens sind die Plasmalemmata der benachbarten Epithelzellen so untereinander verbunden, dass zwischen ihnen kein Interzellularraum mehr existiert.

Zonulae adhaerentes. Der mechanisch belastbaren Verbindung von Epithelzellen dienen Haftzonen (Zonulae adhaerentes). Zwischen die parallel verlaufenden Plasmalemmata ist Kittsubstanz eingelagert. An vielen Epithelien sind die Zonulae occludentes und adhaerentes hintereinander gestaffelt und bilden so **Haft- und Verschlusszonen** aus.

Desmosomen. Während sich eine Zonula adhaerens über die gesamte Zirkumferenz einer Zelle erstreckt, teilen die **Maculae adhaerentes** oder Desmosomen ähnlich gebaute punktförmige Haftplatten dar, die ebenfalls mechanisch stark belastbare Zell-Zell-Verbindungen darstellen, über die mechanische Kräfte innerhalb des Gewebsverbandes übertragen werden können. Die zwischenzellige Kittsubstanz ist für gelöste Substanzen durchgängig, sie behindert also den Stoffaustausch im Interzellularraum nur wenig.

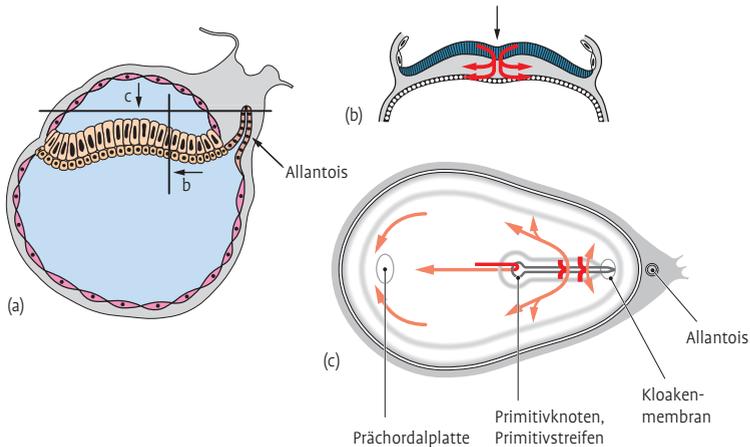


Abb. 2.7 Gastrulation(modi fiziert nach J. Langman). **a:** Zweiblättrige Keimscheibe im Sagittalschnitt; Schnittebenen für (b, c) gekennzeichnet. **b:** Transversalschnitt: Rote Pfeile zeigen Wanderungsweg der Zellen des primären Ektoderms, die das Mesoderm und das definitive Entoderm bilden. **c:** Aufsicht auf das Ektoderm: Zellen

verlassen durch Primitivrinne und -grube das Ektoderm und bilden zwischen diesem und dem Entoderm das Mesoderm; Prächordalplatte und Kloakenmembran bleiben Zonen mit direktem Kontakt zwischen Ektoderm und Entoderm.

Nexus. Mit der Gefrierätztechnik stellen sich Nexus (**Gap junctions**) als fleckförmige Areale mit regelmäßig angeordneten Partikeln dar. Der an diesen Stellen etwa 2 nm breite Interzellularspalt wird durch Proteine überbrückt, welche die Grundlage für Poren bilden, über die zwischen den benachbarten Zellen Ionen und niedermolekulare Substanzen ausgetauscht werden können. Auf diese Weise ist eine **elektrotonische Erregungsübertragung** innerhalb des Epithelzellverbandes möglich. Der Stoffaustausch zwischen den benachbarten Interzellularräumen wird durch Nexus nicht behindert.

Polarisierung

Für die meisten Epithelzellen ist eine **Polarisierung** nachzuweisen. So kann durch Ausbildung von **Mikrovilli** die der freien Oberfläche zugewandte Seite besonders auf Resorption spezialisiert sein. Durch Einfaltungen des basalen Plasmalemmas wird mitunter eine sehr deutliche Vergrößerung der Zelloberfläche erreicht, die auf gesteigerte Austauschvorgänge hinweist.

Basallamina. An der Grenze zum Nachbargewebe bilden Epithelien regelmäßig eine Basallamina aus. An ihr können elektronenmikroskopisch eine elektronendurchlässige **Lamina rara**, die den Zellen zugewandt ist, und eine elektronendichtere **Lamina densa** unterschieden werden. Am Aufbau

der Basallamina sind u. a. die Glykoproteine Laminin und Fibronectin sowie Kollagen Typ IV beteiligt, die einen feinnetzigen Fibrillenfilz bilden. Die Basallamina ist für gelöste Stoffe nahezu frei durchgängig, erst Moleküle über 10 nm werden beim Durchtritt behindert. Die Basallamina hat stabilisierende Wirkung auf das aufsitzende Epithel.

Die Einteilung der Epithelien erfolgt nach der Form ihrer oberflächlichen Zellen und nach der Beziehung der beteiligten Zellen zur Basallamina.

Einteilung

Die Epithelien können einschichtig, mehrreihig (mehrstufig) und mehrschichtig sein. Bei **einschichtigen** und **mehrreihigen Epithelien** sitzen alle Zellen der Basallamina auf. Die Zellen des mehrreihigen Epithels sind verschieden hoch. Die kürzeren erreichen die freie Oberfläche nicht. Dadurch sind auch die Zellkerne unterschiedlich weit von der Basallamina entfernt und bilden parallel zu ihr mehrere Reihen aus. Beim **mehrschichtigen Epithel** haben nur die Zellen der basalen Schicht Kontakt mit der Basallamina.

Plattenepithel. Einschichtiges Plattenepithel (Abb. 2.8 a) besteht aus polygonalen Zellen, die niedriger als breit sind. Es findet sich an inneren Oberflächen, z. B. als Auskleidung der Lungenalveolen, der Körperhöhlen und der Gefäße, die me-

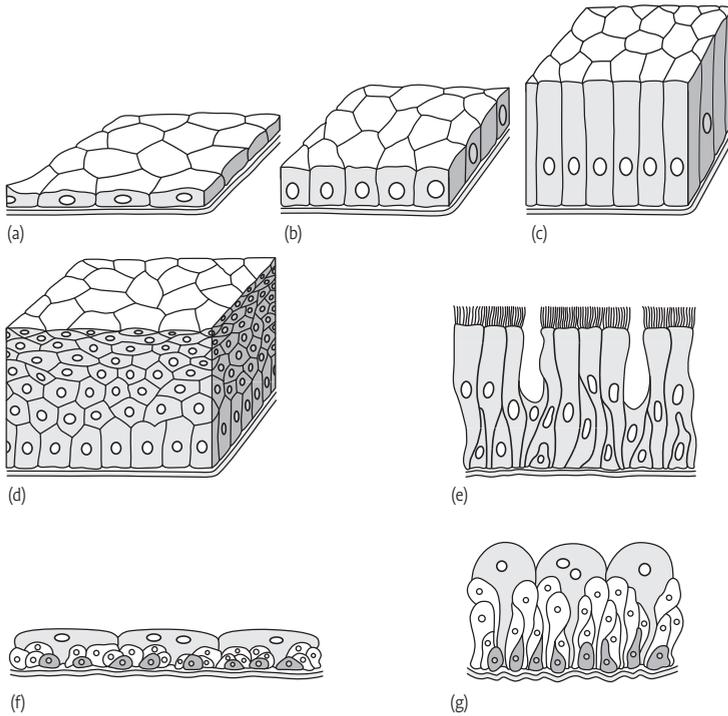


Abb. 2.8 Schematische Darstellung von Epithelformen. **a**: einschichtiges Plattenepithel, **b**: einschichtiges kubisches Epithel, **c**: einschichtiges Zylinderepithel, **d**: mehrschichtiges Plattenepithel, **e**: mehrreihiges Flimmerepithel, **f**: Übergangsepithel, gedehnt, **g**: Übergangsepithel, ungedehnt.

chanisch nicht stark beansprucht werden. Ist das Epithel besonders flach, so können die Zellkerne die freie Zelloberfläche vorwölben.

- **Endothel**: einschichtiges Plattenepithel, das die Gefäße auskleidet.
- **Mesothel**: einschichtige Auskleidung der serösen Räume des menschlichen Körpers, also der Pleura-, Perikard- und Peritonealhöhle.

Geschichtetes Plattenepithel (Abb. 2.8 d). Die basale Zelllage ist isoprismatisch oder zylindrisch (**Stratum basale** oder **cylindricum**). Von ihr aus erfolgt die dauernde Erneuerung der Zellen. Mit dem Vorrücken der Zellen gegen die äußere Oberfläche ändern die Zellen ihre Gestalt. Die folgende Zellschicht zeichnet sich durch multiforme Zellen (**Stratum spinosum** oder **multiforme**) aus, die ebenso wie die basalen Zellen durch zahlreiche Desmosomen zu einem mechanisch belastbaren Verband zusammengeschlossen sind. Die oberflächennahen Zellschichten (**Stratum superficiale**) platten immer mehr ab und geben so dieser Epithelform den Namen. Oberflächennah werden die Desmosomen instabil, und so werden die oberflächlichen Zellen fortlaufend abgestoßen. Das gegen mechanische Insulte widerstandsfähige mehrschichtige Plattenepithel findet man unter an-

derem in der Mundhöhle, in der Speiseröhre, in der Scheide und auf der Vorderfläche der Hornhaut.

Mehrschichtiges verhorntes Plattenepithel. Es ist noch höheren mechanischen Belastungen gewachsen. Bei ihm schließt sich an das Stratum spinosum eine Zellschicht an, in der die Zellen in Vorbereitung des Verhornungsprozesses Granula enthalten (**Stratum granulosum**). Mit der Verhornung verlieren die Zellen ihre Zellorganellen und letztlich auch den Zellkern. Das **Stratum corneum** ist aus leblosen Hornschüppchen zusammengesetzt, die zunächst noch durch Desmosomen zusammengehalten werden. Die Höhe der Hornschicht ist von der mechanischen Beanspruchung abhängig. Mehrschichtiges verhorntes Plattenepithel überzieht als äußerste Schicht der Haut die gesamte Körperoberfläche.

Isoprismatisches (kubisches) Epithel. Dieses steht zwischen dem Platten- und dem hochprismatischen Epithel (Abb. 2.8 b). Man findet es auf der Vorderfläche der Linse und in einigen Drüsen und Drüsenausführungsgängen.

Hochprismatisches Epithel (Zylinderepithel).

- Einschichtiges hochprismatisches Epithel (Abb. 2.8 c) ist aus Zellen zusammengesetzt, die

mit einer schmalen Basis der Basallamina aufsitzen und deren Höhenausdehnung deutlich größer ist (Abb. 2.8 e). Es kommt u. a. im Magen-Darm-Kanal und in vielen Drüsen vor. Alle seine Zellen erreichen die freie Oberfläche. Im Magen-Darm-Kanal trägt es einen Bürstensaum, der sich elektronenoptisch in dicht gelagerte Mikrovilli auflösen lässt. Er vergrößert die Resorptionsfläche der Zellen.

- **Einschichtiges hochprismatisches Epithel mit Flimmerhaaren** kommt im Uterus, in den Eileitern und in den kleinen Bronchien vor.
- **Mehrschichtiges hochprismatisches Epithel** (Abb. 2.8 e): Alle Zellen sitzen der Basis auf, doch nur die längsten, die zugleich den höchsten Differenzierungsgrad zeigen, erreichen die Oberfläche. Je nach Länge der Zellen liegen die Kerne in verschiedener Höhe. Kerne der längsten Zellen haben die oberflächlichste Lage. Die bis zur Oberfläche reichenden Zellen tragen häufig einen Flimmerbesatz, so in den Atemwegen mit Ausnahme der kleineren Verzweigungen. Als zweireihiges Epithel ohne Flimmerhaare kommt es in vielen Drüsenausführungsgängen vor.
- **Mehrschichtiges hochprismatisches Epithel** (mehrschichtiges Zylinderepithel): Nur die basalen Zellen sitzen der Basallamina auf. Die oberflächliche Lage besteht aus Zylinderzellen. Es kommt relativ selten vor. Man findet es am Übergang von geschichtetem Plattenepithel zu mehrreihigem Zylinderepithel und im Scheitel der Bindehaut (Fornix conjunctivae).

Übergangsepithel. Kleidet die ableitenden Harnwege aus (Urothel) und ist in besonderem Maße an deren Volumenschwankungen angepasst. Es wird unterschieden zwischen **Basal-, Intermediär- und Deckzellen**. Die Letzteren sind nicht selten zweikernig, sie bilden an der Oberfläche des Epithels durch stark entwickelte Zonulae occludentes eine dichte Barriere. Im entspannten Zustand liegen die Zellkerne in 5–6 Reihen übereinander. Bei Dehnung flacht das Epithel ab und die Zahl der Kernreihen geht auf 2–3 zurück. Es tritt also eine erhebliche Verlagerung der Zellen ein (Abb. 2.8 f, g).

Differenzierungen des Epithels

Für bestimmte Aufgaben finden sich an den Epithelien besondere Oberflächenbildungen. So tragen die Zylinderzellen des Atmungsapparates (Abb. 2.8 e) **Flimmerhaare**, die alle nach einer

Richtung schlagen und eingeatmete staubartige Fremdkörper wieder nach außen befördern. Das auf Stoffaufnahme, Resorption, besonders eingestellte Darmepithel trägt auf der freien Oberfläche einen aus dichtgelagerten stäbchenförmigen Mikrovilli bestehenden **Bürstensaum**. Dadurch ist für das Darmepithel eine erhöhte Resorptionsfähigkeit gewährleistet. Um die Möglichkeit der Stoffaufnahme weiter zu erhöhen, kann die Oberfläche als **Zotte** vorgebuchtet werden (Abb. 2.9).

Eine weitgehende **Einschränkung** der Stoffabgabe, insbesondere des Wassers, wird am mehrschichtigen verhornten Plattenepithel durch die Hornsubstanz erreicht, die zugleich widerstandsfähig gegen chemische und physikalische Einflüsse ist.

Die Stoffabgabe, **Sekretion**, kann durch Vergrößerung der Oberfläche erleichtert werden. Sie erfolgt durch Einsenkung des sezernierenden Epithels in die Tiefe, also in die bindegewebige Unterlage hinein, in Form von **Schläuchen** und **Bläschen** (Drüsen, s. Abb. 2.9 und 2.10).

Drüsen

Bestimmte Epithelien haben die Fähigkeit, Stoffe aus dem Blut aufzunehmen, in der Zelle zu verarbeiten, zu speichern und schließlich als spezifisches Produkt auszuschleiden. Die für jede Drüse charakteristischen Produkte werden als **Sekrete** bezeichnet, wenn sie im Organismus bestimmte Aufgaben zu erfüllen haben, als **Exkrete**, wenn sie als Stoffwechselschlacken ausgeschieden werden.

Endoepitheliale Drüsen. Die sezernierenden Zellgruppen liegen im Oberflächenepithel. Die einfachste Drüse ist die einzellige. Sie wird in Form der **Becherzelle** an vielen inneren Oberflächen des Körpers gefunden. In ihrem bauchigen, der Oberfläche zugewandten Teil speichert sie die Vorstufen des Sekretes in Form von Prämuzinkörnern oder Prosekretgranula. Der Kern liegt vom Zytoplasma umgeben im basalen Teil. Die Abgabe der Prosekretgranula erfolgt nach Anlagerung an das luminal Plasmalemm, welches eröffnet wird, sodass der Schleim ausgestoßen werden kann. Nach der Sekretabgabe wird die Integrität des Plasmalemmes wiederhergestellt, und die Zelle beginnt mit der Neubildung von Sekret.

Hypo- oder exoepitheliale Drüsen. Bei Vergrößerung der sezernierenden Oberfläche finden die Drüsen im Epithel keinen ausreichenden Platz. Sie senken sich in das daruntergelegene Bindegewebe

ein. Die in die Tiefe gerückten Drüsen bilden einen ausführenden, nicht sezernierenden Abschnitt (**Ausführungsgang**) und einen das spezifische Sekret liefernden Abschnitt, **Drüsenendstück**, aus.

Exokrine Drüsen. Sie geben ihr Sekret mit oder ohne Ausführungsgang auf eine Oberfläche (z. B. Darmlumen, Haut) ab.

Endokrine Drüsen (inkretorische oder Drüsen mit innerer Sekretion). Sie geben das Sekret direkt an das Blut oder die Lymphe ab (Inkret, Hormon). Sie haben keine Ausführungsgänge.

Drüsenformen. Es gibt **einfache** (a), **verzweigte** (b) und **zusammengesetzte** (c) Drüsen (Abb. 2.10). Das sezernierende Endstück (in Abb. 2.10 punktiert) kann schlauchförmig, **tubulös** (a–d), beerenförmig, **azinös** (e), und bläschenförmig, **alveolär** (f, g), sein. Mischformen sind die **tubuloazinösen** (e) und die **tubuloalveolären** (f) Drüsen. Auch diese können wieder verzweigt und zusammengesetzt sein. Die zusammengesetzten Drüsen können Ausführungsgänge I., II. und III. Ordnung besitzen.

- **Tubulöse Drüsen** sondern meist ein dünnflüssiges Sekret ab und haben eine feine Drüsenlichtung (Lumen). Hierher gehören die Magen-, Darm-, Uterus- und Schweißdrüsen. Ihre End-

stücke können gerade verlaufen (Glandulae intestinales im Dün- und Dickdarm) oder stark geknäuelt sein (Schweißdrüsen).

- **Alveoläre Drüsen.** Eine Reihe davon sondert ein dickflüssiges Sekret in Form von Schleim ab. Die Endstückzellen sind nicht besonders hoch, der Kern ist oft abgeplattet, das Lumen ist weit. Auch sie kommen einfach, verzweigt oder zusammengesetzt vor.

- **Gemischte Drüsen:**

- Tubuloalveoläre Drüsen sind die Pylorus-, die Duodenal-, manche Schleim- und die Prostata Drüsen.

- **Tubuloazinöse Drüsen** sind beispielsweise die Gl. sublingualis und submandibularis.

Abschnitte der zusammengesetzten Drüsen werden durch (interlobuläres) Bindegewebe zu kleineren und größeren **Läppchen** zusammengefasst. In diesen bindegewebigen Septen liegen die größeren Ausführungsgänge sowie Blut- und Lymphgefäße.

Die Drüsenzellen können das **Sekret** direkt oder mittels feiner Sekretkanälchen in das Lumen ausschleiden. Diese können zwischen benachbarten Zellen (interzellulär, z. B. Gl. parotis, Gl. lacrimalis) oder in der Zelle liegen (intrazelluläre Sekretkapillaren, z. B. bei den Belegzellen des Magens).

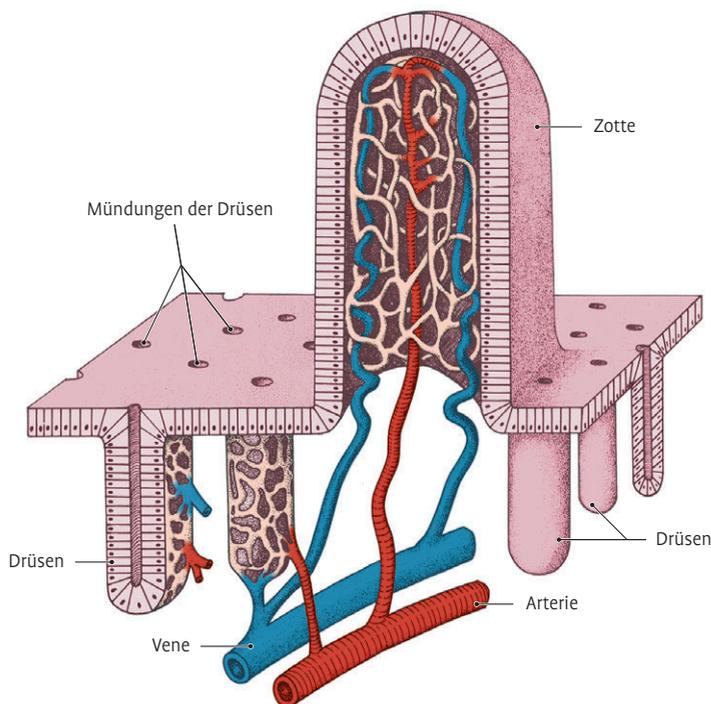


Abb. 2.9 Schema einer Darmzotte und mehrerer Drüsen mit Blutversorgung. Einschichtiges Zylinderepithel bedeckt die gesamte Oberfläche.

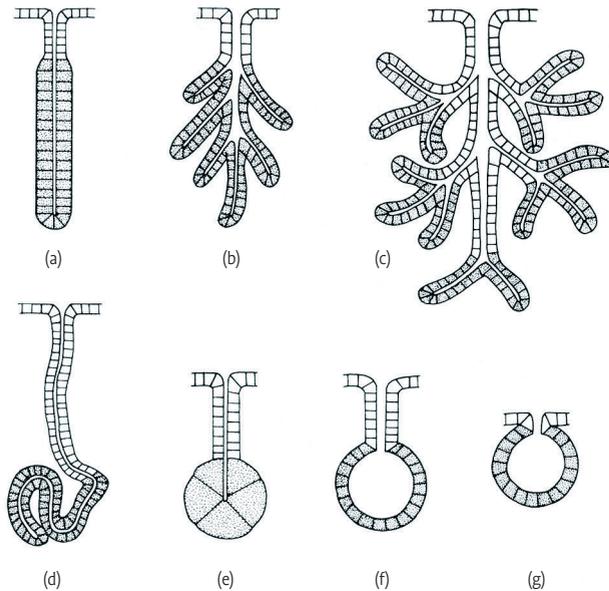


Abb. 2.10 Schema der verschiedenen Drüsenformen. **a:** einfache tubulöse Drüse, **b:** verzweigte tubulöse Drüse, **c:** zusammengesetzte tubulöse Drüse, **d:** tubulöse Knäueldrüse, **e:** tubuloalveoläre Drüse, **f:** einfache alveoläre Drüse, **g:** einfache alveoläre Drüse. Die sezernierenden Abschnitte sind punktiert.

Die Drüsenzellen werden durch eine Basalmembran vom umliegenden Bindegewebe getrennt. Zwischen den sezernierenden Endstücken mancher Drüsen (z. B. der apokrinen Schweißdrüsen, der Speicheldrüsen) und der Basalmembran liegen kontraktionsfähige myofibrillenhaltige modifizierte Epithelzellen (**Myoepithelzellen**). Ihre Kontraktionen dienen der **Sekretbeförderung**, indem sie die Endstücke mit ihren Fortsätzen kralenartig umfassen und ausdrücken.

Sekretbildung. Das Sekret entsteht in den Drüsenzellen über Vorstufen (**Prosekret**) in Form von membranumgebenen Körnchen und Tropfen und wandert innerhalb der Zelle zu jenem Teil, an dem die Ausscheidung (**Extrusion**) stattfinden soll (Apikal-, Marginalteil), oder es füllt die Zelle allmählich ganz aus. An der Sekretbildung sind das endoplasmatische Retikulum und der Golgi-Apparat beteiligt.

Sekretionsformen:

- **Merokrine (ekkrine) Sekretion:** Die Membran der Sekretvesikeln fusioniert mit dem Plasmalemma, danach Eröffnung der Vesikel und Entleerung des Sekretes in den Extrazellulärraum, ohne weitere Zerstörung von Zellbestandteilen. Die Zelle kann umgehend wieder mit der Neusynthese von Prosekret beginnen (häufigste Sekretionsform).
- **Apokrine Sekretion:** Das Prosekret wird im apikalen Teil der Zelle angesammelt und zusammen mit Anteilen des Plasmalemmas abge-

schnürt. Bei diesem Sekretionsmodus, wie er in der Milchdrüse für die Abgabe des Milchfettes und in den Duftdrüsen genutzt wird, können die Drüsenzellen nach einer Regenerationsphase wieder tätig werden.

- **Holochrine Sekretion:** Im Laufe der Prosekretbildung wird der gesamte Bestand an Zellorganellen einschließlich des Zellkernes in Sekret umgewandelt. Die Zelle wird schließlich als Ganzes abgegeben.

Je nach Beschaffenheit des Sekretes werden **verschiedene Drüsen** unterschieden:

- **Seröse Drüsen** erzeugen ein dünnflüssiges, eiweißhaltiges und enzymreiches Sekret. Ihre Lumina sind eng, die kugeligen Zellkerne sind aus der Zellmitte etwas zur Basis verschoben. Die Zellgrenzen sind schwer zu erkennen, das Zytoplasma ist apikal granuliert. Zwischen den Zellen liegen interzelluläre Sekretkanälchen (**Sekretkappillaren**). Seröse Drüsen sind: Ohrspeicheldrüse, Pankreas, Tränendrüse, EBNER-Spüldrüsen.
- **Muköse Drüsen** erzeugen einen zähflüssigen Schleim. Ihre Lichtungen sind relativ weit, das Zytoplasma erscheint wabig. Die platten Zellkerne liegen im basalen Teil der Zelle. Rein muköse Drüsen sind z. B. die Gl. palatinae.
- **Gemischte Drüsen** bestehen aus nebeneinander liegenden serösen und mukösen Endstücken, die ungleichmäßig verteilt sein können. So überwiegen in der Gl. submandibularis die serösen, in der Gl. sublingualis die mukösen Anteile.

Regeneration des Epithels

Bei den mehrreihigen und mehrschichtigen Epithelien erfolgt sie von den basalen Zellen aus. In den einschichtigen Epithelien werden verloren gegangene Zellen meist durch mitotische Aktivität der Nachbarzellen ersetzt. An einigen Formen, z. B. im Darm, ist die Regenerationsfähigkeit auf bestimmte Areale begrenzt. Zellverlust kann dann durch Wanderung der Zellen zum Defekt ausgeglichen werden.

Bei großen Epitheldefekten an der Oberfläche schieben sich die Nachbarzellen über den Defekt, vermehren sich durch Mitosen und epithelisieren die Wundfläche. Das Epithel ist frei von Blut- und Lymphgefäßen. Seine Ernährung erfolgt über ein interzelluläres Spaltensystem durch Diffusion aus dem umliegenden gefäßführenden Bindegewebe. Bei mehrschichtigen Epithelien kommt den basalen Zellen eine besondere Bedeutung zu.

2.2.2.2 Binde- und Stützgewebe

Für das Binde- und Stützgewebe ist charakteristisch, dass die **Interzellulärsubstanz** eine dominierende Ausbildung erfährt. Die Zellen nehmen nur einen relativ bescheidenen Anteil am Gesamtvolumen ein (Abb. 2.11). Die Zusammensetzung und die Ausprägung der Interzellulärsubstanz zeigen eine eindeutige Anpassung an die unterschiedlichen Aufgaben, welche die verschiedenen Formen des Binde- und Stützgewebes zu erfüllen haben. Anhand der Zellen und der Interzellulärsubstanz unterscheidet man folgende Hauptgruppen: **embryonales** Bindegewebe oder **Mesenchym**, **gallertiges**, **retikuläres**, **lockeres**, **straffes Bindegewebe**, **Fett-**, **Knorpel-** und **Knochengewebe**.

Bindegewebe

Diese Gewebe bestehen aus **Zellen** und **Interzellulärsubstanz**. Zu den spezifischen Bindegewebszellen werden die Mesenchymzellen, Retikulumzellen und Fibroblasten gerechnet. Die Interzellulärsubstanz besteht aus einem ungeformten (**Grundsubstanz**) und einem geformten Anteil, den **Fasern**. Zwei Hauptfasertypen kommen vor: kollagene und elastische Fasern. Die retikulären Fasern sind eine Sonderform der Kollagenfasern.

Embryonales, gallertiges, retikuläres Bindegewebe und Fettgewebe werden als zellreiche Formen den faserreichen Bindegewebsarten gegenübergestellt. Zusammen mit dem Chordagewebe werden Knorpel- und Knochengewebe als Stützgewebe bezeichnet.

Embryonales Bindegewebe oder Mesenchym

(Abb. 2.12 a). Die Mesenchymzellen entsenden Ausläufer nach allen Seiten und nehmen Kontakt zu den Nachbarzellen auf. Auf diese Weise entsteht ein dreidimensionales Zellgitter, dessen Interzellulärraum homogen erscheint und nur **ungeformte Interzellulärsubstanz** enthält. Das Mesenchym ist das typische Füllgewebe des embryonalen Körpers, es bildet die Grundlage für die Entwicklung aller Arten des Binde- und Stützgewebes.

Gallertiges Bindegewebe (Abb. 2.12 b). Es ist eine Sonderform des Mesenchyms und kommt in typischer Ausbildung in der Nabelschnur vor. Die Interzellulärsubstanz enthält **saure Proteoglykane** und **kollagene Mikrofibrillen**.

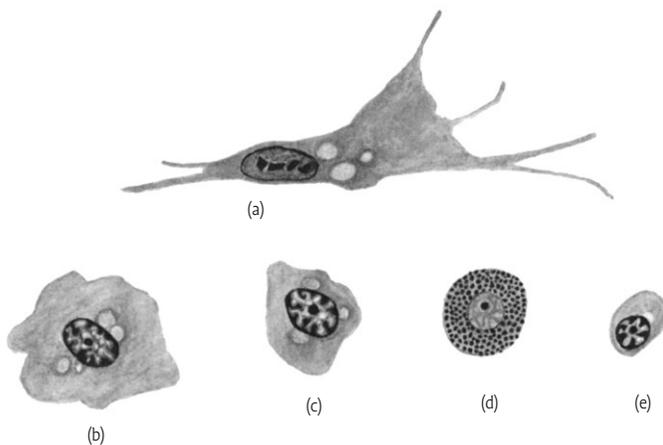


Abb. 2.11 Zellen des lockeren Bindegewebes in schematischer Darstellung. **a:** Fibroblast, **b** und **c:** Histiozyten, **d:** Mastzelle, **e:** Plasmazelle.

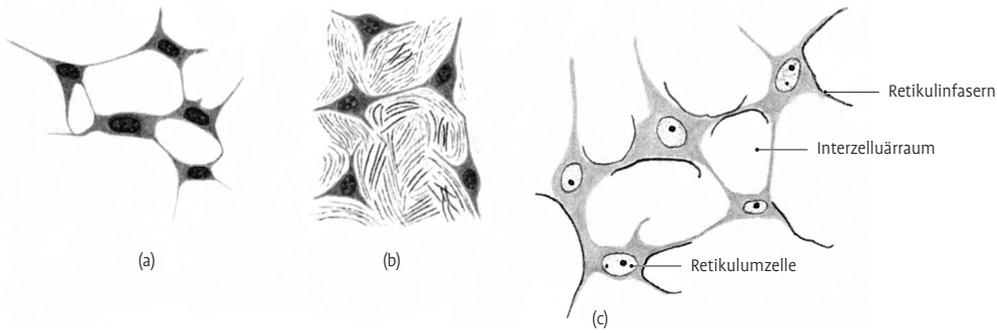


Abb. 2.12 **a:** Mesenchym, Vergr. 350x. **b:** Gallertiges Bindegewebe, Vergr. 350x. **c:** Retikuläres Bindegewebe, Vergr. 350x.

Retikuläres Bindegewebe (Abb. 2.12 c). Wie in den beiden vorherbesprochenen Formen bilden die Retikulumzellen ein dreidimensionales Netzwerk aus, dabei bleibt jedoch die Individualität der Einzelzellen gewahrt. Aufgrund ihrer Form werden sie als **Retikulumzellen** bezeichnet. Sie sind zur Bildung von **retikulären Fasern** befähigt, die ebenfalls ein dreidimensionales Netzwerk aufbauen und dabei an den Zellausläufern orientiert sind. Mit Versilberungstechniken gelingt es, im mikroskopischen Bild das Fasernetz darzustellen, da die Fasern ein **argyrophiles** (gr. argyros = Silber; philos = liebend) Verhalten zeigen. Das retikuläre Bindegewebe erlangt durch die Ausbildung des Fasernetzes eine gewisse mechanische Stabilität bei erhaltener Verformbarkeit. Es kann auf diese Weise als Grundgewebe im Knochenmark und in lymphatischen Organen wie Lymphknoten und Milz wirken. Es wird dort von den eingelagerten Zellen meist so überdeckt, dass es nur nach deren Entfernung überschaubar ist. Sehr häufig tritt es als Begleitgewebe von Nerven, Gefäßen und anderen Strukturen auf. So lassen sich beispielsweise die argyrophilen Fasernetze an den Harnkanälchen gut zur Darstellung bringen. Es erlangt aber auch als Verschiebeschicht, so am Darm in der Lamina propria, erhebliche Bedeutung.

Lockeres Bindegewebe (Abb. 2.13). Diese Gewebsform ist im Körper weit verbreitet. Es füllt die Räume zwischen Organen aus und dient dem Zusammenhalt von Organteilen. Im Verhältnis zu den bisher beschriebenen Bindegewebsformen enthält es bedeutende Anteile an **geformter Interzellularsubstanz**, also an **kollagenen** und **elastischen Fasern**. Die zelluläre Grundlage wird von **Fibroblasten** gebildet. Diese stehen untereinander in Verbindung

und sind als aktive Zellen ausgewiesen. Sie synthetisieren **Kollagen vom Typ I** (siehe Lehrbücher der Biochemie), das als Tropokollagen in den Interzellularraum abgegeben wird und dort zu kollagenen Mikrofibrillen aggregiert, welche zu **kollagenen Fasern** zusammengeschlossen werden. Als zweite geformte Interzellularsubstanz bilden die Fibroblasten elastisches Material, das von den Zellen in Form von **Elastin** und **Glykoproteinnikrofibrillen** in den Interzellularraum abgegeben wird. Dort bilden sich schließlich die reifen **elastischen Fasern**. Die elastischen Fasern sind reversibel auf das Doppelte ihrer Ruhelänge dehnbar. Fallen die sie beanspruchenden Zugkräfte weg, so verkürzen sie sich wieder auf ihre Ruhelänge. Die kollagenen Fasern sind nicht dehnbar. Im entspannten Gewebe nehmen sie bedingt durch die elastischen Fasern eine gewellte Form an, die im mikroskopischen Präparat an Haarlocken erinnert. Bei Dehnung des Gewebes werden sie gestreckt und verhindern eine Überdehnung der elastischen Fasern. Kollagene und elastische Fasern bauen im lockeren Bindegewebe eine **dreidimensionale Gitterstruktur** auf, die reversible Verlagerungen in allen Richtungen des Raumes erlaubt.

Die ungeformte Interzellularsubstanz (**Grundsubstanz**) des lockeren Bindegewebes besteht aus sauren Glykosaminoglykanen und Glykoproteinen. Sie wird ebenfalls in den Fibroblasten synthetisiert. Sie interagiert mit den Fasern und trägt zur Ausbildung von kollagenen Faserkomplexen bei. Die zahlreichen Zuckergruppen ermöglichen außerdem ein hohes **Wasserbindungsvermögen** und damit auch die Aufnahme großer Mengen an gelösten Substanzen ins Bindegewebe. Sie tragen damit wesentlich zum **Gewebsturgor** bei. Die Eigenschaften des lockeren Bindegewebes

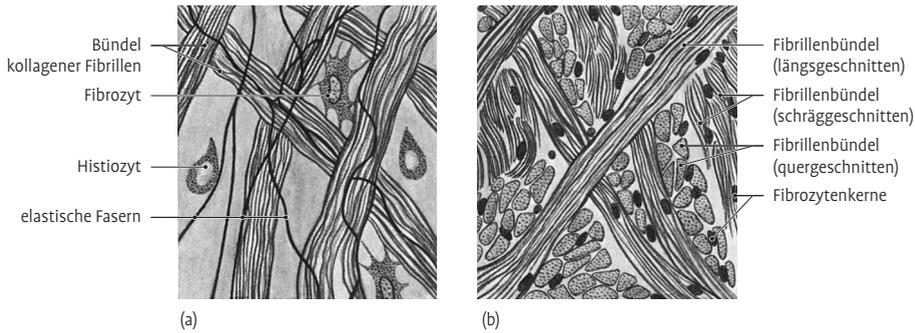


Abb. 2.13 Faserreiches Bindegewebe . **a:** lockeres Bindegewebe, **b:** straffes netzartiges Bindegewebe.

sind ganz wesentlich durch die Volumenanteile an geformter und ungeformter Interzellularsubstanz bestimmt. Da im Alter sowohl die elastischen Fasern als auch die ungeformte Grundsubstanz vermindert sind, verliert das lockere Bindegewebe an Elastizität und Turgor.

Aufgrund seiner Eigenschaften eignet sich das lockere Bindegewebe für die verschiebliche Verbindung von Organen und Organstrukturen, es stellt den größten Teil des **interstitiellen Bindegewebes** (Stroma) der Organe und des Begleitgewebes von Nerven und Blutgefäßen.

Neben Fibroblasten als ortständigen oder fixen Zellen kommen im lockeren Bindegewebe verschiedene Formen „freier“ Zellen vor (s. Abb. 2.11) Diese Zellen sind nicht ortsgebunden. Sie wandern aus den Gefäßen in das Gewebe ein und können es auch wieder verlassen:

- **Histiozyten** stellen die größte Zellform dar. Sie wandern als **Monozyten** aus dem Blut in das Gewebe ein und werden in wechselnder Zahl und Form angetroffen. Zum Teil sind sie abgerundet („ruhende Wanderzellen“), zum Teil zeigen sie zahlreiche Fortsätze, wenn sie sich auf entsprechende Reize hin amöboid bewegen. Histiozyten besitzen eine ausgeprägte **Phago- und Pinozytosebereitschaft (Makrophagen)**. Ihre Phagozytoseaktivität wird auch zum Nachweis im histologischen Präparat genutzt. Angebotene Farbstoffe, z. B. Trypanblau, werden rasch aufgenommen und markieren die Zellen. Die Histiozyten sind dem **Monozyten-Makrophagen-System** zuzurechnen.
- **Mastzellen** oder **Gewebsbasophile** sind zumeist rundlich, oval oder spindelförmig. Gelegentlich bilden sie auch lange Ausläufer. Oft liegen sie in der Nähe von Blutgefäßen. Sie enthalten

zahlreiche Granula, die sich mit basischen Farbstoffen metachromatisch färben. In den Granula wird **Heparin** gespeichert, ein sulfatiertes Glykosaminoglykan, welches hemmend auf die Blutgerinnung wirkt. Außerdem kommt in ihnen **Histamin** vor, ein Gewebshormon, welches Kapillaren weit stellt und deren Durchlässigkeit erhöht.

- Außerdem werden im lockeren Bindegewebe in unterschiedlicher Anzahl regelmäßig **neutrophile** und **eosinophile Granulozyten** sowie **Lymphozyten** und **Plasmazellen** angetroffen. Näheres siehe Histologie-Lehrbücher.
- **Chromatophoren** oder **Pigmentzellen** sind in einigen Anteilen des lockeren Bindegewebes anzutreffen. Sie entstammen ursprünglich dem Neuralleistenektoderm. Sie besitzen die Fähigkeit zur **Melaninbildung**, eines Pigmentes von schwarzbrauner Eigenfarbe.

Straffes Bindegewebe. In dieser Bindegewebsform treten die geformten Bestandteile der Interzellularsubstanz, also **kollagene** und **elastische Fasern**, in den Vordergrund. Sie nehmen den größten Volumenanteil ein. Die Fibroblasten, also die zelluläre Komponente, tritt demgegenüber zurück. Die funktionelle Beanspruchung bestimmt die Anordnung der Fasersysteme und den Mengenanteil an kollagenen bzw. elastischen Fasern.

Wirken die Zugkräfte aus verschiedenen Richtungen auf das straffe Bindegewebe ein, so erfolgt eine **geflechtartige** Anordnung der Fasern in Form eines Scherengitters. Bei den formstabilisierenden **Muskelfaszien** und **Organkapseln** dominieren die kollagenen Fasern, ebenso in den **Aponeurosen**. Das gemischte Vorkommen von kollagenen und elastischen Fasern im straffen Bindegewebe er-

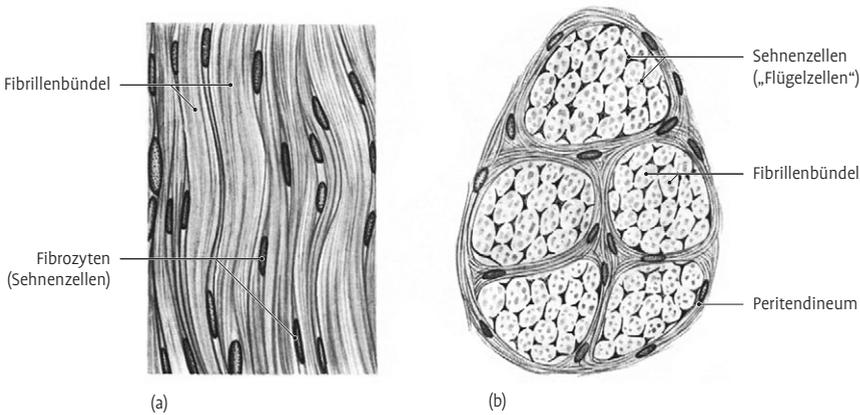


Abb. 2.14 a: Längsschnitt einer Sehne, Vergr. 500×; **b:** Querschnitt einer Sehne, Vergr. 300×.

laubt zusätzlich eine reversible Formveränderung. Eine solche Bauweise wird in der **Lederhaut** angetroffen. Ähnlich verhalten sich Hüllen von Organen mit stark wechselndem Volumen (z. B. Pleura pulmonalis). Die kollagenen Fasern wirken einer Überdehnung entgegen, während die elastischen die Rückführung in die Ruhelage bewirken. Eine einseitige Zugbelastung führt zu einer **parallelen** Anordnung der Fasersysteme. Sie ist bei Sehnen und Bändern ausgeprägt. Die Zellen und ihr Kern erscheinen im Längsschnitt lang ausgezogen, im Querschnitt (Abb. 2.14) haben sie ein sternförmiges Aussehen. Sie werden als **Tendozyten** oder auch häufig als **Flügelzellen (Pterogyozyten)** bezeichnet, weil sie mit flügelartigen Fortsätzen den Raum zwischen den Faserbündeln ausfüllen.

Geringe Anteile an elastischen Fasern führen im Ruhezustand einen gewellten Verlauf der kollagenen Fasern herbei und verhindern die ruckartige Übertragung der bei der Muskelkontraktion auftretenden Kräfte auf den Knochen.

In den sog. **gelben Bändern** (Ligamentum nuchae, Ligamenta flava) stellen die elastischen Fasern den größten Volumenanteil. Die in ihnen ebenfalls vorkommenden kollagenen Fasern wirken einer Überdehnung entgegen. Innerhalb des parallelfasrigen Bindegewebes übernimmt lockeres gefäßführendes Bindegewebe Versorgungsaufgaben und ermöglicht die Verschieblichkeit von Gewebskomponenten gegeneinander.

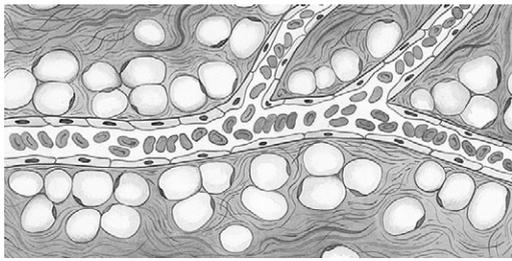
Fettgewebe

Nach der Verteilung der Fette innerhalb der Zellen wird zwischen weißem bzw. univakuolärem und

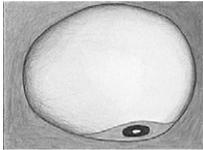
braunem bzw. multivakuolärem Fettgewebe unterschieden.

Weißes oder univakuoläres Fett. Die Zellen dieses Fettgewebes (**Adipozyten**) enthalten einen großen Fetttropfen, der das Zytoplasma mit den Zellorganellen und dem Zellkern an das Plasmalemm verdrängt. Die Aufnahme der Fette erfolgt entweder in Form von Fettsäuren und Glycerol über Pinozytose, wobei die Anteile über das Blut angeflutet werden, oder der Adipozyt synthetisiert Fettsäuren und Glycerol aus Glukose neu. Die aufgenommenen oder synthetisierten Fette bilden zunächst kleine Fetttropfchen, die zu einer einzigen großen Fettvakuole verschmelzen. Wenn unter Bedingungen des Energiebedarfes der Körper auf die Fettdepots zurückgreift, so werden im Adipozyten kleine Fetttropfchen ausgegliedert, das Fett am Plasmalemm in Glycerol und Fettsäuren aufgespalten und über den Interzellularraum in das Blut abgegeben. Nicht jedes weiße Fettgewebe speichert bei Kalorienmangel in gleicher Weise. Dem verhältnismäßig abgabebereiten **Speicherfett** steht das sogenannte **Baufett** gegenüber, das nur unter extremen Hungerbedingungen abgebaut wird (z. B. Fettgewebe an Hand- und Fußsohle, retrobulbäres Fettgewebe der Orbita, Bichat-Wangenfettpfropf u. a.). Jeder Adipozyt wird von einer Basallamina umgeben, in die von außen retikuläre Fasern einstrahlen.

Bei üblicher Herstellung mikroskopischer Präparate wird das Fett aus den Zellen durch fettlösende Substanzen (Alkohol, Äther, Xylol) herausgelöst. Der herausgelöste große Fetttropfen hinterlässt in der Zelle eine einzige große Vakuole, die vom randständigen Zytoplasma und dem Kern



(a)



(b)

Abb. 2.15 a: Den Blutgefäßen anliegende Fettzellen aus dem großen Netz des Menschen. **b:** Stärker vergrößerte univakuoläre Fettzelle („Siegelringzelle“).

umgeben wird („Siegelringzellen“, Abb. 2.15). Das Fettgewebe zeigt eine **sehr gute Gefäßversorgung**, diese ist die Basis für einen ständigen Umbau des Fettgewebes auch bei ausgeglichenem Kalorienangebot durch die Nahrung. In der Umgebung der Gefäße enthält der Interzellularraum kollagene Fasern und reichlich Grundsubstanz. Diese bedingt ein beträchtliches **Wasserbindungsvermögen** und seine Bedeutung für den Wasser- und Salzhushalt des Körpers. Die Adipozyten sind zu **Fettlappchen** zusammengeschlossen. Jedes Fettlappchen hat seine eigene Gefäßversorgung und wird von kollagenen Faserzügen umschlossen, die bei mechanischer Belastung zwar eine Verformung zulassen, aber nach Wegfall der deformierenden Kräfte für eine Rückkehr zur Ausgangsform sorgen. Das Fettgewebe übernimmt so Polsterfunktion im Körper. Die größeren Blutgefäße verlaufen in lockeres Bindegewebe eingebettet in den Zwickeln zwischen den Fettgewebslappchen.

Braunes oder plurivakuoläres Fett. Die Fette sind stets in vielen kleineren Vakuolen in den Zellen verteilt. Der Zellkern liegt zumeist zentral. Im Zytoplasma findet man zahlreiche Mitochondrien mit gut ausgebildeten Cristae mitochondriales. Dieses Gewebe ist weit besser mit Nerven und Gefäßen versorgt als das weiße Fettgewebe. Es ist insbesondere beim Neugeborenen und jungen Säugling durch schnelle Energiebereitstellung an der **Thermoregulation** beteiligt.

Stützgewebe

Knorpelgewebe. Das menschliche Skelett wird embryonal in großen Teilen knorpelig angelegt. Aus dem Mesenchym entsteht zunächst eine Anhäufung von Zellen. Die glykogenreichen Zellen liegen dicht beieinander. Mit der Bildung von Interzellularsubstanz rücken diese Blastemzellen auseinander. Schwach basophile Grundsubstanz und kollagene Fibrillen umschließen im Vorknorpel die Höhlen mit den teilungsfähigen Zellen, die man nun als **Chondroblasten** bezeichnen kann. Der sehr zellreiche **Vorknorpel** verändert sein Aussehen durch zunehmende Produktion von Interzellularsubstanz und durch Mitosen, bei denen die Tochterzellen zunächst in einer **Knorpelhöhle** verbleiben und später durch Abgabe von Grundsubstanz und kollagenem Fasermaterial Trennwände aus Interzellularsubstanz zwischen sich aufbauen. Im Inneren des Knorpels werden Zellgruppen aufgebaut, die durch größere Anteile der Interzellularsubstanz mit höherem Faseranteil voneinander getrennt werden. Während der Entwicklung erfolgt das **Knorpelwachstum** also zum Teil **interstitiell** bzw. intussuszeptionell. An der Oberfläche des knorpeligen Skelettstückes differenziert sich unterdessen das **Perichondrium** (Knorpelhaut). Sein dem Knorpel anliegendes **Stratum generativum** ist mitotisch aktiv. Die dort vorhandenen Chondroblasten sorgen mit ihrer Vermehrung für das **appositionelle Wachstum** des Knorpels, in dem die Tochterzellen nach allen Seiten ungeformte Grundsubstanz und kollagene Fasern bilden und sich damit in ihre Knorpelhöhlen einschließen. Das knorpelferne **Stratum fibrosum** des Perichondriums ist nerven- und gefäßhaltig, erfüllt also Aufgaben bei der Ernährung des Knorpelgewebes, das im erwachsenen Organismus gefäßfrei ist. Zum anderen ist es für die Biegefestigkeit und für die Verankerung der Fasersysteme des Knorpels von ausschlaggebender Bedeutung. Die nicht vom Periost überzogenen Gelenkknorpel werden von der **Gelenkschmiere (Synovia)** ernährt. Die Regenerationsfähigkeit des Knorpelgewebes ist beim Erwachsenen eingeschränkt.

- **Hyaliner Knorpel** (Abb. 2.16 a). Er kommt im Respirationsapparat (Nase, Kehlkopf, Luftröhre, große Bronchien), in den Wachstumsfugen (Epiphysenfugen), als Rippen- und Gelenkknorpel vor. Hyaliner Knorpel ist schneidbar, elastisch, weniger zugfest ($0,35 \text{ kp/mm}^2$) als druckfest ($1 \text{ bis } 2 \text{ kp/mm}^2$). In dünner Lage ist er durchscheinend (gr. hyalos), in dicker bläulich-weiß.

Die flüssigkeitsreichen Knorpelzellen, **Chondrozyten**, enthalten Glykogen. Sie liegen einzeln, zu zweien oder in größeren Gruppen in Höhlen der Interzellularsubstanz, den Knorpelhöhlen. Zwei oder mehr in einer Knorpelhöhle liegende Zellen sind durch Teilung aus einer Zelle hervorgegangen (**isogene Zellen**).

Die Knorpelzellen umgibt ein stark **basophiler Knorpelhof**, in dem die stark basophile Grundsubstanz im Interzellularraum dominiert. Jede Knorpelzelle ist in der Interzellularsubstanz mit einer Wicklung zugesteter, kollagener Fibrillen

umgeben. Zwei oder mehr Zellen werden durch ähnliche Wicklungen zusammengefasst, mehrere Zellen wiederum durch neue Wicklungen. Es entstehen dadurch kugelförmige, druckelastische Polster, die den **Chondronen** entsprechen (Knorpelkugeln, **Territorien**, Abb. 2.16 b). Nahe der Knorpeloberfläche biegen die kollagenen Fibrillen bogenförmig um und bilden die tangential verlaufenden Fasern des Perichondrium. Zwischen den Chondronen, in der weniger basophilen **interterritorialen** Grundsubstanz, liegen durchlaufende Züge kollagener Fibrillen.

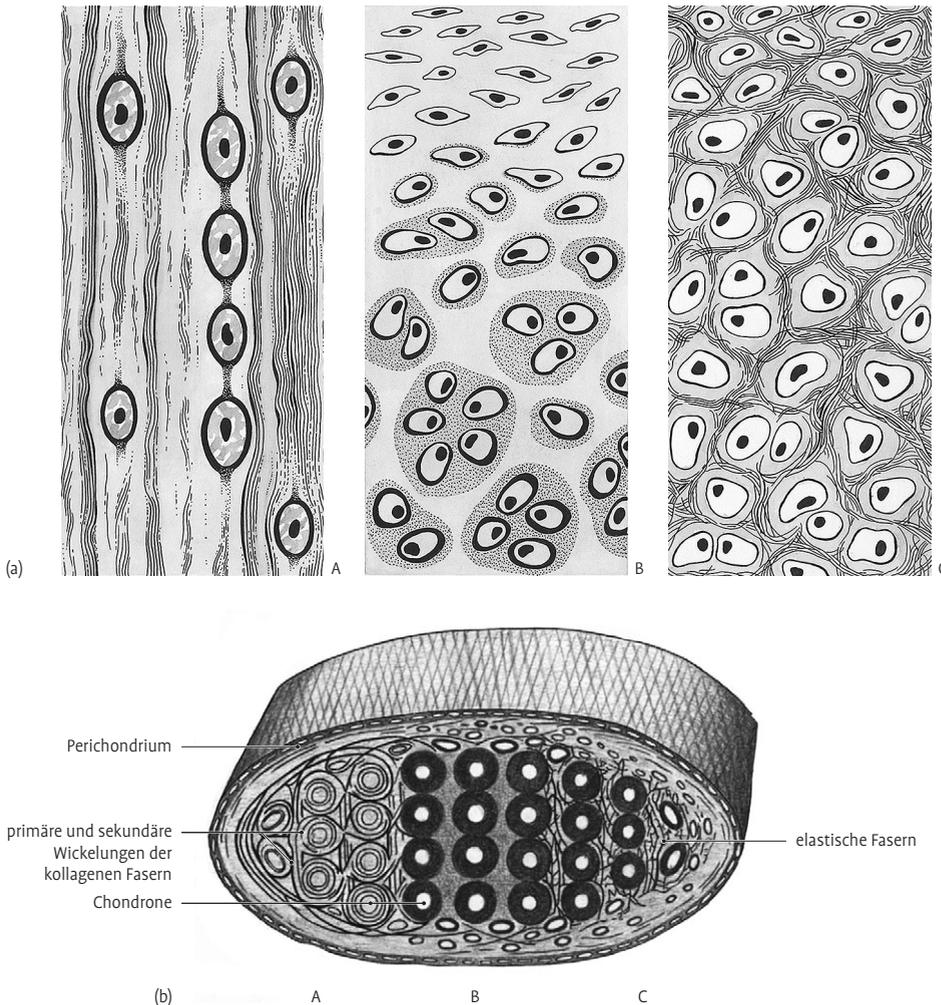


Abb. 2.16 a: Verschiedene Knorpelformen. A = Faserknorpel aus einem Discus intervertebralis, B = hyaliner Knorpel aus der Trachea, C = elastischer Knorpel aus der Ohrmuschel. **b:** Funktionelle Struktur des Knorpels

nach Benninghoff. A = Wicklungen verschiedener Ordnung der kollagenen Fasern, B = hyaliner Knorpel (kollagene Faserwicklungen verdeckt), C = eingelagerte elastische Fasern beim elastischen Knorpel.

Chondrone sind die funktionellen Bauelemente des Knorpels. Ihre Zahl und Anordnung ist, je nach Beanspruchung des Knorpels, verschieden. Gegen die Oberfläche hin werden die Knorpelzellen zunehmend flacher und gehen kontinuierlich in die Zellen der Knorpelhaut (Perichondrium) über.

Die Grundsubstanz des hyalinen Knorpels verhält sich aufgrund ihres Reichtums an **Hyaluronsäure** und **Chondroitinsulfat** stark **basophil**, sie zeigt ein hohes **Wasserbindungsvermögen**. Die Grundsubstanz bindet an die kollagenen Fasern und schließt sie zu Faserbündeln zusammen. Darauf beruht zum erheblichen Teil die Festigkeit des Knorpels. Die kollagenen Fasern sind an gewöhnlichen mikroskopischen Präparaten lichtdurchlässig und nicht sichtbar, da Fasern und Grundsubstanz den gleichen Lichtbrechungsindex aufweisen. Geht im Alter oder bei Abnutzung des Knorpels ihre Verbindung mit den sauren Mukopolysacchariden verloren so werden sie sichtbar („demaskiert“). In kleinen Feldern nun sichtbare Kollagenfasern bezeichnet man als „**Asbestfasern**“. Schließlich enthält die Grundsubstanz auch Mineralien. Im Alter und bei Ernährungsstörungen des Knorpels verlieren Zellen und Grundsubstanz Wasser; die Chondroitinschwefelsäuren werden stellenweise abgebaut. Zugrunde gegangene Zellen sind noch einige Zeit als „Schatten“ zu sehen. Relativ früh beginnt auch die Verkalkung des hyalinen Knorpels und sein Ersatz durch Knochen (Rippenknorpel, ein Teil der Kehlkopfknorpel).

- **Elastischer oder Netzknorpel** (Abb. 16 a). Im Unterschied zum hyalinen Knorpel enthält er noch zusätzlich ein Netzwerk von **elastischen** Fasern. Sie umgeben die meist ein- bis zweizelligen Chondrone und strahlen in die Knorpelhaut ein. Elastischer Knorpel ist gelblich und biegsamer als der hyaline. Er verkalkt selten. Vorkommen: Ohrmuschel, Kehildeckel, Teile des Gießbeckenknorpels, Cartilago corniculata, Cartilago cuneiformis, kleine Bronchien.
- **Faser- oder Bindegewebsknorpel** (Abb. 16 a). Die von einem feinen Hof von Knorpelgrundsubstanz umgebenen, meist einzeln vorkommenden Knorpelzellen liegen zwischen Bündeln gut sichtbarer **kollagener** Fibrillen. In seiner Struktur nähert sich der Faserknorpel dem **straffen Bindegewebe** und besitzt auch ähnliche mechanische Eigenschaften (vor allem

Zugfestigkeit). Er kommt in Zwischenwirbelscheiben und in der Schambeinfuge vor. In den Disci und Menisci der Gelenke und in den Pfannenlippen (Labra articularia) kommt Faserknorpel nur stellenweise vor. Die übrigen Anteile bestehen aus einem sehnartigen, faserigen Bindegewebe.

Knochengewebe

Der Knochen ist, vom Zahnbein und Zahnschmelz abgesehen, das härteste Gewebe. Gesunder Knochen ist nicht schneidbar, kaum biegsam, dagegen druck- und zugfest (Druckfestigkeit 14–16 kp/mm²). Seine Widerstandsfähigkeit gegen Reibung ist gering. Gelenkflächen werden deshalb durch hyalinen Knorpel geschützt.

Im Gegensatz zu Knorpel ist der Knochen reich an Blutgefäßen. Er hat einen intensiven Stoffwechsel, ist stets im Umbau begriffen und passt seine Struktur allen Veränderungen der funktionellen Beanspruchung rasch an, biologische Plastizität. Knochenbrüche heilen gewöhnlich gut.

Die chemische Zusammensetzung des Knochens ist vom Lebensalter abhängig. Im Durchschnitt besteht er zu einem Drittel aus Wasser und zu zwei Dritteln aus einem organischen (ca. 23 %) und einem anorganischen Anteil (ca. 44 %). Im organischen Anteil überwiegen die kollagenen Fasern.

Durch Glühen des Knochens lassen sich die organischen Anteile entfernen. Der nur aus anorganischen Substanzen bestehende geglühte Knochen behält die ursprüngliche Form, verliert aber die Elastizität und wiegt weniger. Er bricht leicht. Der anorganische Anteil besteht aus Salzen (Kalziumphosphat 85 %, Kalziumkarbonat 10 %, Magnesiumphosphat, Kalziumfluorid, Kalziumchlorid und Alkalisalzen). Sie sind in Form von Mikrokristallen in die Grundsubstanz eingebettet und bedingen die Härte des Knochens.

Normaler Knochen lässt sich mit einem herkömmlichen Mikrotom nicht schneiden (dickere Schnitte können mit einem Hartschnittmikrotom gewonnen werden), jedoch durch Schleifen zu transparenten, dünnen Präparaten verarbeiten (Knochenschliff). Entkalkter Knochen ist biegsam und schneidbar. Im Alter sinkt der Wassergehalt des Knochens. Die anorganischen Komponenten nehmen zu. Das Skelett alter Menschen ist mechanischen Beanspruchungen weniger gewachsen und bricht leichter (siehe auch Kap. 4.1).

2.2.2.3 Muskelgewebe

Die Eigenschaft der Bewegung kommt im Prinzip allen Zellen zu. Im Muskelgewebe ist die **Kontraktibilität** zum dominierenden Merkmal der hochspezialisierten Zellen geworden. In ihnen liegen die kontraktilen Proteine **Aktin** und **Myosin** (Myofilamente) in besonderer Menge und Anordnung vor. Aus ihnen bauen sich die **Myofibrillen** auf.

Die Mehrzahl der Muskelzellen ist **mesodermaler Herkunft**. Sie entstehen aus einkernigen Myoblasten. Nur der M. sphincter pupillae, der M. dilatator pupillae und die „Myoepithelzellen“ der Endstücke mancher Drüsen entstehen aus dem Ektoderm.

Nach Struktur und Funktion unterscheidet man: **glatte Muskulatur, quer gestreifte Skelettmuskulatur** und **Herzmuskulatur**.

Glatte Muskulatur (Abb. 2.17a)

Glatte Muskelzellen (**Myozyten**) sind meist langgestreckt (Länge: 15 µm in Blutgefäßen, 800 µm im Uterus am Ende der Schwangerschaft), meist spindelförmig und seltener verzweigt. In der Mitte der Zellen liegen die länglichen Kerne. Die Breite der Zellen schwankt zwischen 5 und 20 µm. Die **Myofilamente** nehmen den größeren peripheren Abschnitt der Zellen ein und sind parallel zur Längsachse der Myozyten angeordnet. Die Myosinfilamente besitzen auf ihrer gesamten Länge Bindungsarme für Aktin, welches andererseits am Plasmalemm (**Sarkolemm**) verankert ist. Bei Verkürzung gleiten die Aktinfilamente an den dicken Myofilamenten entlang. Die Verkürzung wird auf das Sarkolemm übertragen. Dem Sarkolemm liegt außen eine Basallamina auf, in die retikuläre Fasern einstrahlen. Auf diese Weise werden die glatten Muskelzellen untereinander und mit der Umgebung verbunden.

Die glatten Muskelzellen kontrahieren im Verhältnis zur Skelett- und Herzmuskulatur **langsam**. Sie können aber ohne größeren Energieaufwand einen Tonus über längere Zeit aufrechterhalten.

Die Tätigkeit der glatten Muskulatur ist **vom Willen unabhängig**. Man findet sie im Magen-Darm-Kanal von der unteren Hälfte der Speiseröhre bis zum After, in der Gallenblase, in den tiefen Atemwegen, in den ableitenden Harnwegen, in den Geschlechtsorganen, in der Wand der Gefäße, in den inneren Augenmuskeln (M. ciliaris, M. sphincter pupillae und M. dilatator pupillae), in der Haut und in den Organkapseln.

Hypertrophie des glatten Muskelgewebes. Bei zu starker Beanspruchung, z. B. bei mangelhafter Durchgängigkeit der Hohlorgane (Magen, Darm) oder bei Abflussbehinderung (Harnblase bei Hyperplasie der Prostata), beim Uterus in der Schwangerschaft, nehmen die glatten Muskelzellen rasch an Länge und Breite zu. Die **Regenerationsfähigkeit** des glatten Muskelgewebes ist mäßig.

Quer gestreifte Skelettmuskulatur (Abb. 2.17a)

Der größte Anteil der Weichteile des menschlichen Körpers besteht aus Skelettmuskulatur. Ihr Grundelement ist die vielkernige, 10–100 µm dicke und bis über 10 cm lange **Muskelfaser**. Jede Skelettmuskelfaser enthält Hunderte elliptischer Zellkerne. Im Gegensatz zu glatten Muskelzellen liegen die **Kerne randständig**. Sie sind in der Längsachse der Muskelfaser angeordnet. Umhüllt wird jede Muskelfaser von einem 0,1 µm dicken Häutchen, dem **Sarkolemm**. Dieses besteht aus dem Plasmalemm der Muskelfaser, einer schwachen Basalmembran und aus Gitterfasern.

Die rote Farbe der Muskulatur entsteht durch einen dem Hämoglobin des Blutes nahestehenden Farbstoff (**Myoglobin**). Je nach Gehalt an Myoglobin und abhängig vom Verhältnis Sarkoplasma : Myofibrillen ändert sich die Farbe der Muskelfasern.

- **Typ-I-Fasern** (= rote Fasern) sind zu langandauernden und kräftigen Kontraktionen befähigt, die aber relativ langsam ablaufen.
- **Typ II-Fasern** sind reich an Myofibrillen und besitzen weniger Myoglobin (= weiße Fasern). Sie kontrahieren schnell und gewinnen die dazu notwendige Energie vor allem aus der Glykolyse, während rote Muskelfasern die Energiegewinnung auf oxidativem Wege absichern.

Die 0,5–1 µm dicken **Myofibrillen** zeigen eine deutliche **Querstreifung**. Sie kommt dadurch zustande, dass helle **I-** mit dunklen **A-Streifen** periodisch abwechseln. Die parallelen Fibrillen sind so angeordnet, dass gleiche Streifen nebeneinander liegen. Die anisotropen doppelbrechenden A-Streifen werden in ihrer Mitte durch einen schmalen **H-Streifen** (Hensen-Streifen), die isotropen I-Streifen durch einen anisotropen **Z-Streifen** unterteilt (Abb. 2.17 b). Der zwischen zwei Z-Streifen gelegene, etwa 2 bis 3 µm lange Abschnitt der Myofibrille wird **Sarkomer** genannt. Bei gut erhaltenen und gefärbten Präparaten ist innerhalb des H-Streifens noch ein **M-Streifen** zu erkennen. Die

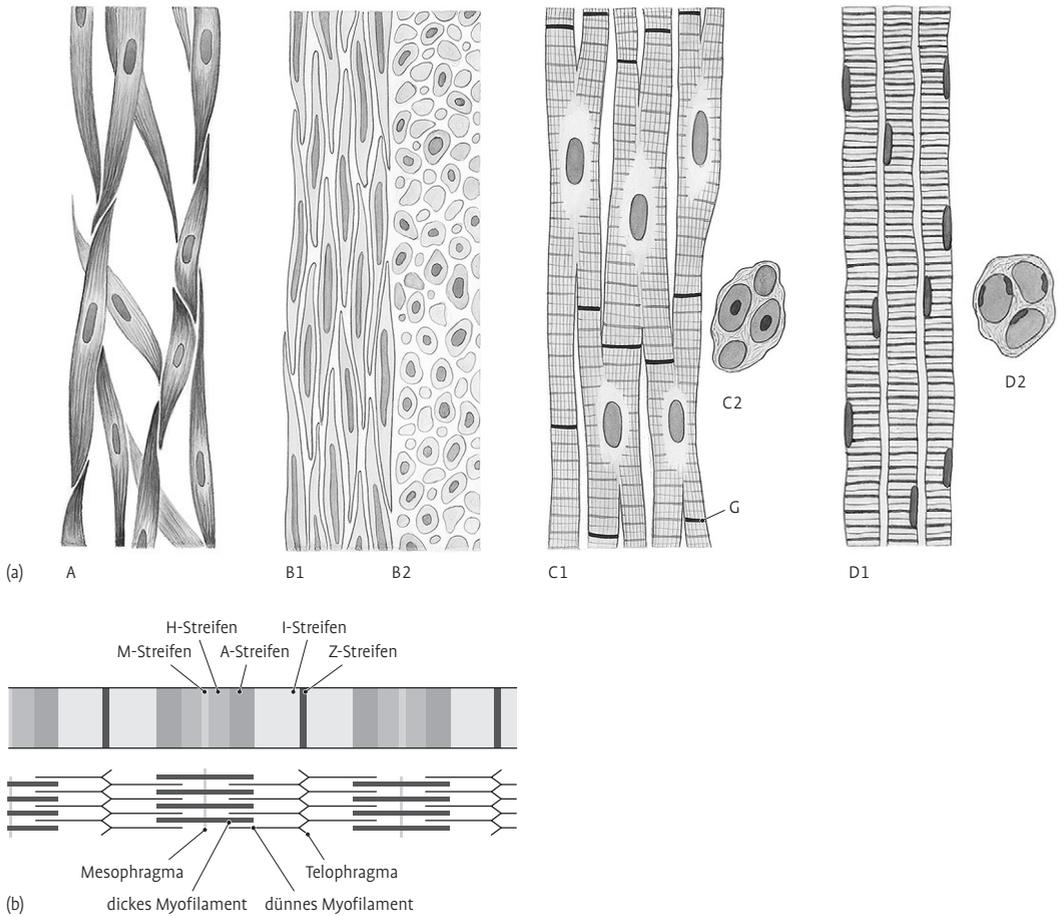


Abb. 2.17 a: Darstellung der Muskelgewebe bei lichtmikroskopischer Betrachtung. A = glatte Muskelzellen in netzartiger Anordnung (200 \times), B = glatte Muskulatur der Darmwand im Längs- (B1 300 \times) und im Querschnitt (B2 300 \times), C = Herzmuskulatur im Längs- (C1 300 \times) und im Querschnitt (C2 300 \times), D = quer gestreifte Ske-

lettmuskulatur im Längs- (D1 200 \times) und im Querschnitt (D2 200 \times). Bei c = Herzmuskel ist die Lage der Glanzstreifen (G) gut erkennbar, ebenso die Verzweigung der Kardiomyozyten. **b:** Schema zur Querstreifung einer Myofibrille in Anlehnung an Watzka. Oben: lichtmikroskopisches Bild, unten: Zuordnung der Myofilamente.

Abfolge für ein Sarkomer ist also **Z-I-A-H-M-H-A-I-Z**. Siehe auch Kap. 4.1.2.

Herzmuskulatur (A bb. 2.17a)

In den Herzmuskelzellen sind die kontraktile Elemente ähnlich wie im Skelettmuskel aufgebaut. Die Herzmuskulatur ist wie diese quer gestreift. Die Myofibrillen sind ebenso aus Sarkomeren zusammengesetzt. Die zeitlichen Abläufe bei der Kontraktion sind wesentlich schneller als beim glatten Muskelgewebe, aber deutlich langsamer als beim Skelettmuskel.

Die Herzmuskelzellen verzweigen sich. Sie sind untereinander durch **Glanzstreifen (Disci intercalati)** verbunden. Im Verlauf der Glanzstreifen und im Anschluss daran kommen **Nexus** vor, in denen die Erregung von einer Herzmuskelzelle auf die andere übertragen wird.

In den Herzmuskelzellen liegt der **Zellkern zentral** und wird von einem myofibrillenfreien Sarkoplasmahof umgeben. Nicht selten kommen zweikernige Zellen vor. Als Zeichen erhöhter Abbauvorgänge treten Lipofuszingranula in Erscheinung, sie können bei Verbesserung der Stoffwechselsituation vollständig abgebaut werden. Im Alter

und bei Krankheiten können sie jedoch größere Areale in den Zellen einnehmen.

Im Gegensatz zur Skelettmuskulatur sind die **Herzmuskelzellen verzweigt**, sodass jede von ihnen mit mehr als zwei Nachbarzellen in Verbindung steht. Dadurch wird der besondere Aufbau des Herzens als Hohlmuskel und Blutpumpe möglich. Zwischen den Herzmuskelzellen befindet sich verhältnismäßig reichlich lockeres Bindegewebe und eine große Zahl von Blutkapillaren.

Ausdifferenzierte Herzmuskelzellen sind **nicht mehr teilungsfähig**. Bei höherer Leistungsanforderung ist eine Anpassung nur durch **Hypertrophie**, also Vermehrung der Myofibrillen und Zellorganellen, möglich. Untergegangene Herzmuskelzellen können nur durch Bindegewebe ersetzt werden.

Der **Erregungsbildung und -leitung** im Herzen dient ein **System modifizierter Muskelzellen**. Diese sind reich an Glykogen und Sarkoplasma und beinhalten nur wenige Myofibrillen. Die Zellen sind oft um ein Mehrfaches dicker als die Arbeitsmuskelzellen.

2.2.2.4 Nervengewebe

Erregbarkeit, Erregungsleitung und Erregungsverarbeitung sind vorwiegend an Nervenzellen (**Neurozyten, Neuronen, Ganglienzellen**) gebunden. Sie bilden in ihrer Gesamtheit das Nervengewebe. Mit den Nervenzellen eng verknüpft ist das Gliagewebe (**Neuroglia**).

Nervenzellen

Nervenzellen und die Mehrzahl der Gliazellen gehen aus dem äußeren Keimblatt, dem Ektoderm, hervor, in dem bereits im 2. Embryonalmonat die Vorstufen (**Neuroblasten** und **Glioblasten**) entstehen. Die Nervenzellen bestehen aus dem kernhaltigen Teil der Zelle (**Perikaryon, Soma, Zellleib**) und Fortsätzen (Abb. 2.18). Mit ihren Zellleibern bilden die Nervenzellen die graue Substanz (**Substantia grisea**) im Gehirn und im Rückenmark. Ihre Verteilung ist entweder diffus oder sie bilden dichtere, abgrenzbare Anhäufungen (Kerne, **Nuclei**). Außerhalb des ZNS kommen Anhäufungen von Perikaryen in den Kopf- und Spinalganglien, in den Grenzstrang- und intramuralen Ganglien des vegetativen Nervensystems und in den Sinnesorganen vor.

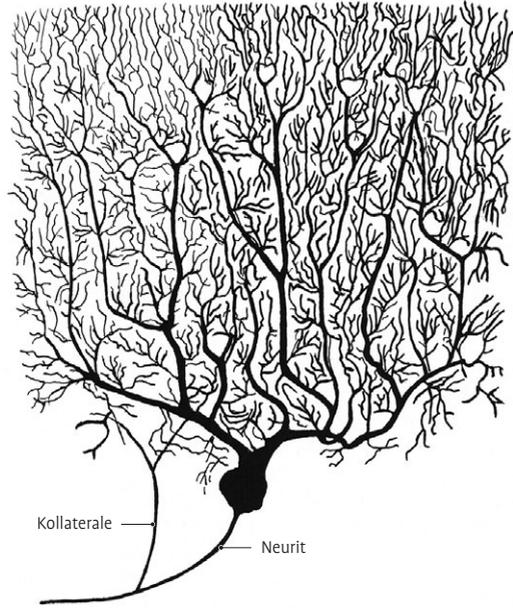


Abb. 2.18 Darstellung einer Purkinje-Zelle des Kleinhirns mit Silberimprägnation.

Größe und **Form** schwanken beträchtlich. Sie sind abhängig von der Lage und der Funktion der Zellen sowie von der Zahl und Länge der Fortsätze. Das Perikaryon kann kugelförmig (z. B. bei Spinalganglienzellen) oder mehr oder minder stark verzweigt sein. Die Körnerzellen des Kleinhirns sind sehr klein (5 µm), die multipolaren Vorderhornzellen im Rückenmark haben dagegen Perikarya in der Größenordnung von 150 µm und mehr. Sie gehören mit den Spinalganglienzellen und der Eizelle zu den größten Zellen des Körpers. Berücksichtigt man nicht nur die Perikarya der Nervenzellen, sondern auch ihre Fortsätze, so ergeben sich z. B. bei den motorischen Vorderhornzellen des Rückenmarkes, deren Neuriten die Muskeln der Hand oder des Fußes erreichen, Längen von 1 m und mehr.

In den Nervenzellen findet man häufig **Pigmente**. Die Zellen der Substantia nigra (Nucleus niger) des Mittelhirns enthalten **Melanin**, die des Nucleus ruber **Eisen**. Diese Kerne des Gehirns sind deshalb bereits makroskopisch durch ihre Färbung erkennbar. **Lipofuszin** findet sich besonders in Nervenzellen älterer Menschen.

Kurze Fortsätze, Dendriten (gr. dendron = Baum). Mehrfach vorhandene Fortsätze der Nervenzellen, die sich baumartig verästeln. An ihnen und am Pe-

rikaryon der Nervenzelle finden sich die Kontaktstellen (Synapsen), an denen Informationen von anderen Neuronen übernommen werden. Die Dendriten vergrößern also den informationsaufnehmenden Teil (**Rezeptorpol**) der Nervenzelle (Abb. 2.18).

Langer Fortsatz, Neurit, Axon, Achsenzylinder. Er entspringt mit dem Ursprungskegel aus dem Perikaryon und dient der Weitergabe von Informationen an andere Nervenzellen (Effektorpol des Neurons). Bis auf einen kurzen Abschnitt in der Nähe des Perikaryons (**Initialsegment**) werden die Neuriten von Gliazellen umhüllt. Im ZNS sind dies **Oligodendrogliazellen**, im peripheren Nerven **Schwann-Zellen**, die bereits bei Aussprossen der Neuriten aus der Anlage des Nervensystems diese in die Peripherie begleiten.

Die Dicke der Axone differiert zwischen 0,5 und 20 µm. Die Neuriten einiger Zellen im ZNS erreichen ihre Zielzellen in fast unmittelbarer Nachbarschaft, andererseits kann die Länge der Neuriten 1 m und mehr betragen. So liegen die Perikaryen der motorischen Vorderhornzellen für die Fußmuskeln im unteren Abschnitt der Brustwirbelsäule, und der Weg bis dahin muß von den Neuriten überbrückt werden, ohne dass bei den Bewegungen des Beines eine Überdehnung erfolgt.

Nervenfaser. Eine Nervenfaser besteht aus dem Axon und seinen Hüllen. Letztere werden von der Neuroglia gebildet. Die Neurogliazellen sind hintereinandergereiht und bedecken die gesamte Länge des Axons. Die Neurogliazellen können einerseits eine mehrschichtige Membranzwicklung (**Myelinscheide**) um die Axone bilden. Solche

Fasern werden **myelinisiert** (markhaltig, **mark-scheidenhaltig**) genannt. Wenn die Neurogliazellen aber andererseits keine Myelinscheide gebildet haben, sondern nur eine unterschiedliche Bedeckung des Axons darstellen, spricht man von **nicht myelinisierten (marklosen)** Nervenfaser. Diese umhüllenden Zellen sind im ZNS die **Oligodendrogliazellen** und im PNS die **Schwann-Zellen**.

Marklose Nervenfaser des PNS. Eine **Schwann-Zelle** schließt mehrere Axone mehr oder weniger vollständig in ihr Zytoplasma ein. Sie vermag die in sie eingelagerten Axone nur über eine bestimmte Strecke zu begleiten, sie wird im Längsverlauf der Axone durch andere abgelöst, sodass schließlich eine Kette von Schwann-Zellen die Axone auf ihrem Weg zum Zielort begleitet. Die Leitungsgeschwindigkeit markloser Nerven ist sehr niedrig. Zu den marklosen Nervenfaser gehören u. a. postganglionäre Fasern des vegetativen Nervensystems, einige schmerzleitende Axone und die Fila olfactoria.

Marklose Nervenfaser des ZNS. Sie besitzen im Unterschied zum PNS **keine Gliahülle**. Sie laufen zwischen markhaltigen Fasern oder sind von Astrozytenfortsätzen teilweise bedeckt.

Markhaltige Fasern des PNS. Jedes Axon wird von einer **dicken Myelinscheide** umhüllt. An bestimmten Stellen ist sie unterbrochen und es entstehen die **Ranvier-Schnürringe** (Ranvier-Knoten, **Node**). Die Faserstrecke zwischen zwei Schnürringen heißt **Internodium**. Jedes Internodium besteht daher aus einer bestimmten Axonstrecke, der in-

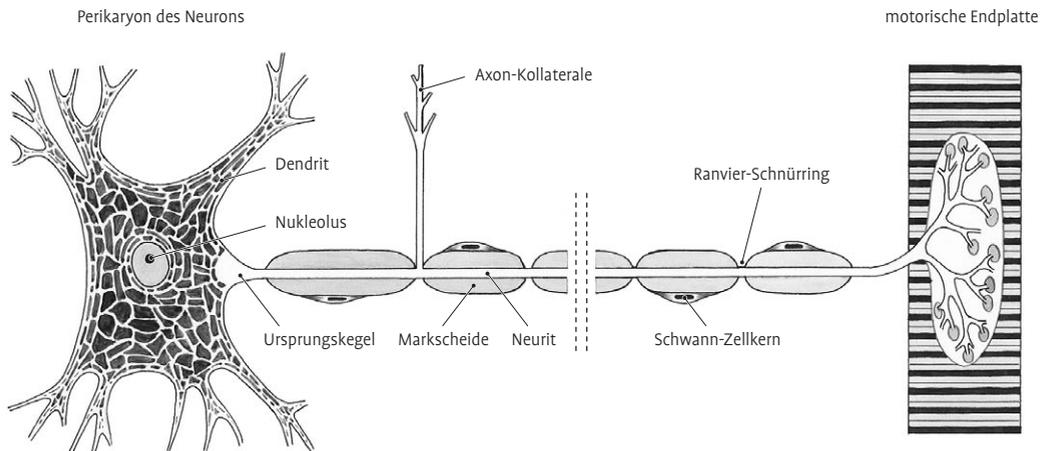


Abb. 2.19 Schema einer motorischen Vorderhornzelle mit myoneuraler Synapse.

ternodalen Myelinscheide und einer myelinbildenden Schwann-Zelle (Abb. 2.19).

Markhaltige Fasern des ZNS. Die Ausbildung von Markscheiden, und damit die die Ausreifung der weißen Substanz oder des Marklagers, erfolgt in etwas anderer Weise als im PNS. Eine **Oligodendrogliazelle** vermag mehrere Fortsätze auszubilden, die Kontakt zu **Axonen** aufnehmen, diese mit spiralförmigen Windungen umwandern und so die Markscheide bilden. Der Zelleib eines Oligodendrozyten liegt im Zentrum der von der Zelle myelinisierten Axone. Auch sie bilden Internodien und Schnürringe (Nodien) aus, sodass die benachbarten Oligodendrogliazellen in Reihen hintereinander liegen.

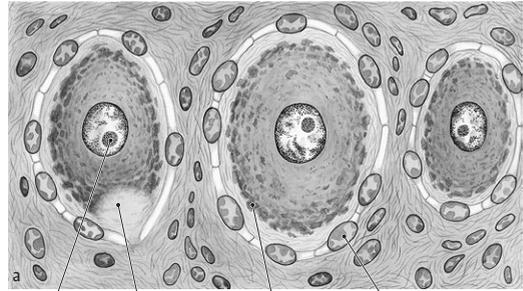
Das Internodium ist 0,2–1,5 mm lang und von der Dicke der Markscheide direkt abhängig, bei den **markarmen Nervenfasern** mit geringer Dicke der Myelinscheide also am kürzesten.

Es bestehen enge Beziehungen zwischen der Struktur und der Funktion der Nervenfasern. Die Erregung geht bei den Neuriten vom Ursprungskegel aus. Bei marklosen Nervenfasern wird sie kontinuierlich fortgeleitet. Bei markhaltigen Fasern beeinflusst die Markscheide die Ausbreitung. Die Erregung pflanzt sich sprunghaft von einem Schnürring zum anderen fort. Die **saltatorische Ausbreitung der Erregung** (lat. saltus = Sprung) erfolgt schneller, und die energieverbrauchenden Prozesse bleiben auf den Schnürringbereich beschränkt. Die Leitungsgeschwindigkeit einer Nervenfasern ist abhängig vom Kaliber des Achsenzylinders, vom Grad der Myelinisierung und von der Länge der Internodien. Je größer diese Faktoren sind, um so schneller leitet die Nervenfasern.

Ganglien

In den Verlauf zerebrospinaler und vegetativer Nerven sind Ansammlungen von Perikaryen von Nervenzellen (**Ganglien**) eingeschaltet.

Sensible und **sensorische Ganglien** besitzen eine Bindegewebshülle und enthalten neben Nervenfasern kugelige Nervenzellen, die von einem Mantel aus Zellen der peripheren Glia (**Mantelzellen, Satelliten**) umgeben sind (Abb. 2.20 a). Jede der ursprünglich bipolaren Ganglienzellen hat nur einen Fortsatz, der sich nach ein- oder mehrmaliger Umwindung des Zelleibes T-förmig teilt (**pseudounipolare Zelle**). Wir finden diese Ganglien z. B. als Spinalganglien oder sensible Kopfganglien. In ihnen erfolgt naturgemäß keine Umschaltung.



Nukleolus Ursprungskegel Nissel-Schollen Mantelzelle mit Kern

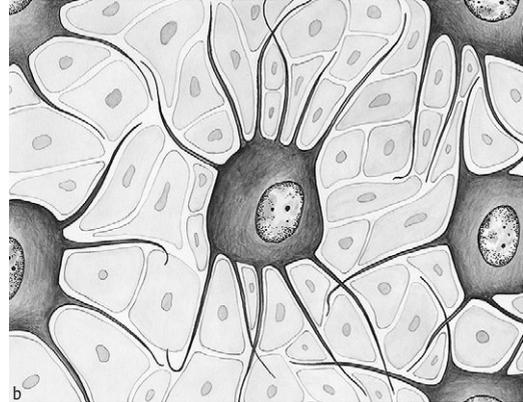


Abb. 2.20 a: Pseudounipolare Nervenzellen mit Mantelzellen aus einem Spinalganglion. **b:** Multipolare Ganglienzellen aus einem sympathischen Ganglion mit Gliazellen.

Vegetative Ganglien werden von **multipolaren Ganglienzellen** gebildet (Abb. 2.20 b). Ihr Gliamantel ist spärlicher, soll aber trotzdem eine geschlossene Hülle bilden. Auch eine bindegewebige Kapsel ist meist vorhanden. Hier erfolgt die Umschaltung von prä- auf postganglionär.

Neuroglia (Glia, Abb. 2.21)

Sie entsteht aus den Glioblasten des Neuralrohres und der Neuralleiste und ist somit überwiegend ektodermaler Herkunft (s. u.). Aus dem Mesoderm entwickeln sich nur die oft in Nachbarschaft der Blutgefäße des ZNS liegenden **Hortega-Zellen (Mikrogliazellen)**. Gliazellen sind wesentlich kleiner als Nervenzellen. Obwohl ihre Gesamtzahl jene der Nervenzellen um ein Mehrfaches übertrifft, bilden sie nur knapp die Hälfte des Zellvolumens im Nervensystem.

Gliatzellformen. Gliazellen haben mannigfaltige **Aufgaben** zu erfüllen. Mit ihren Fortsätzen bilden

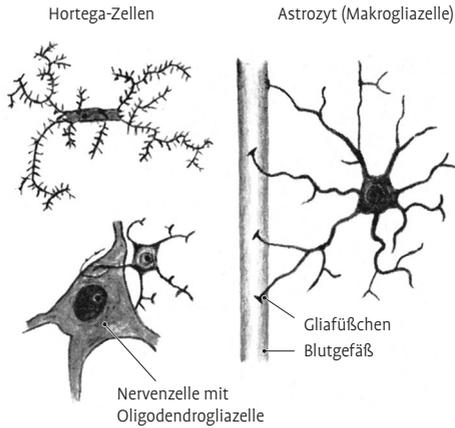


Abb. 2.21 Verschiedene Gliazellformen .

sie das Gerüst, in das die Nervenzellen eingelagert sind. Sie isolieren Nervenzellen und die Fortsätze spielen bei deren Stoffwechsel eine Rolle. Bei Erkrankung und Zerstörung des Nervengewebes erfüllen sie die wichtige Aufgabe des Abtransportes der Trümmer (Phagozytose und amöboide Bewegung) und der Narbenbildung (Glianarbe). Auch die Regeneration von Nerven wäre ohne die Glia nicht möglich. Die Glia bildet das Myelin der zentralen und peripheren Nervenfasern.

- **Neuroglia des ZNS:** Man teilt die Gliazellen ein in: **Ependymzellen**, **Makroglia**, **Mikroglia** (Hortega-Zellen) und **Oligodendroglia** (gr. oligos = wenig; dendron = Baum).
 - **Ependymzellen** überkleiden in einfacher Schicht die liquorgefüllten Hohlräume des Zentralnervensystems.
 - **Makrogliazellen (Astrozyten, Abb. 2.21)** sind groß und sternförmig verästelt. Ihre Fortsätze

bilden ein Netzwerk. Der große Kern ist rund und chromatinreich. An der Gehirnoberfläche und an der Wand der Hirngefäße verbreitern sich die Fortsätze der Makrogliazellen zu Gliafüßchen, welche in ihrer Gesamtheit als Grenzmembranen (**Membrana limitans gliae superficialis**, **Membrana limitans gliae perivascularis**) aufzufassen sind. Zusammen mit dem Endothel der Hirnkapillaren und der Basallamina bildet die Membrana limitans gliae perivascularis die **Blut-Hirn-Schranke**, durch die zahlreiche Stoffe am Übertritt aus dem Blutplasma in das Gehirn gehindert werden, darunter auch viele Medikamente.

- **Oligodendrogliazellen** bilden die Markscheiden im ZNS. Zum Teil umgeben sie Nervenzellen in der grauen Substanz als Mantelzellen unvollständig.
- **Neuroglia des PNS:** Glioblasten der Neuralleiste wandern mit den Neuriten der Nervenzellen in die Peripherie. Sie umhüllen die Neuriten (**Lemnozyten**, **Schwann-Zellen**) und umgehen als Mantelzellen (Satelliten) periphere Ganglienzellen. Die periphere Glia ist an der Bildung peripherer Synapsen (z. B. motorischer Endplatten) und peripherer Rezeptoren durch Ausbildung von Hüllelementen beteiligt

Peripherer Nerv

Der Nerv besteht aus **Nervenfaserbündeln**. Die zugehörigen Nervenzellen liegen entweder im ZNS oder in peripheren Ganglien.

Endoneurium. Es umgibt als lockeres Bindegewebe die einzelnen Nervenfasern (Abb. 2.22). Es

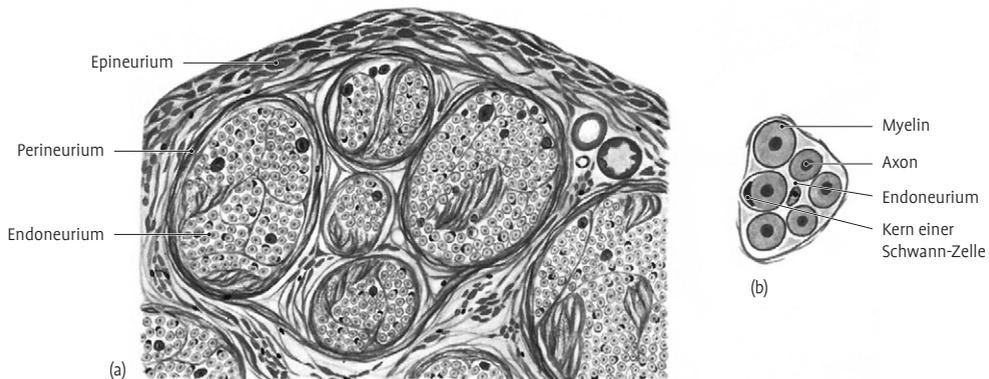


Abb. 2.22 a: Teilquerschnitt eines peripheren Nerven, Vergr. 100×; b: Ausschnitt von a, Vergr. 700×.

enthält Blut- und Lymphkapillaren und bildet mit der Basalmembran der Schwann-Scheide (Schwann-Zelle) die **Endoneuralscheide**.

Perineurium. Es fasst als derberes Bindegewebe eine verschieden große Zahl von Nervenfasern zu Bündeln (Kabeln) zusammen. Seine in Spiraltouren angeordneten kollagenen Fasern erlauben eine geringe Dehnung der Nerven.

Epineurium. Es verbindet die vom Perineurium umhüllten Nervenkel untereinander und bildet die äußere Bindegewebshülle der Nerven. Die Kollagenfasern sind in ihm gewellt und mit elastischen Fasern vermengt. Nach Dehnung des Nerven stellen die elastischen Fasern seine ursprüngliche Länge wieder her (kollagenelastisches System). Im Epineurium verlaufen die größeren Blutgefäße des Nerven (**Vasa nervorum**).

Leitungsbahnen des ZNS

Die Leitungsbahnen (**Tractus**) der weißen Substanz des Gehirns und des Rückenmarkes bestehen aus Nervenfasern, deren Myelinhülle von der Oligodendroglia gebildet wird. Das Bindegewebe fehlt im ZNS. Seine Funktionen werden hier von der zentralen Glia wahrgenommen.

2.2.3 Organe und Organsysteme

Systeme vereinigen verschiedene Organe zur Erfüllung höherer Funktionen, wobei keine Verwandtschaft im Bau vorliegen muss (z. B. System der Harnorgane: Niere, Harnwege und Harnblase).

Bei biologischer Betrachtungsweise lassen sich Organe und/oder Systeme außerdem zu übergeordneten Einheiten als **Apparate** zusammenfassen (z. B. Bewegungsapparat). Bei anderen z. B. neuroanatomischen oder entwicklungsgeschichtlichen Betrachtungsweisen kann der Begriff System auch anders begründet sein (z. B. Beuger, Urogenitalsystem). Folgende Systeme können benannt werden:

- Bewegungsapparat
 - Passiver Bewegungsapparat (Knochen, Bänder, Gelenke)
 - Aktiver Bewegungsapparat (Muskulatur)
- Herz-Kreislauf-System
- Atmungssystem
- Lymphatisches System
- Blut

- Verdauungsapparat (Digestionsapparat)
- System der Harn- und Geschlechtsorgane (Urogenitalsystem)
- Haut
- Endokrines System
- Nervensystem mit Sinnesorganen

Ein Überblick über die großen verknüpfenden Systeme Herz-Kreislauf samt lymphatischem System und Nervensystem soll hier vorangestellt werden.

2.3 Herz-Kreislauf-System

Entstehung. Blutinseln sind die ersten Blutgefäßanlagen, die in der 3. EW zunächst im Hüllmesoderm des Dottersacks entstehen. Aus den peripher gelegenen Mesodermzellen dieser Inseln entstehen endotelbildende Zellen, aus den zentralen die primitiven Blutzellen. In der Folge treten Blutinseln auch intraembryonal auf. Die Blutinseln bilden durch Aussprossung und Verschmelzung miteinander Endothelrohrnetze. Die diesen primitiven Gefäßen anliegenden Mesenchymzellen liefern Muskel- und Bindegewebszellen der definitiven Gefäßwände. Das **intraembryonale Gefäßsystem** (Abb. 2.23) steht über

- **Dottersackgefäße** mit der Dottersackwand und über
- **Nabelschnur- (Umbilikal-)gefäße** mit der Plazenta in Verbindung.

Die **Herzanlage** entsteht in der kardiogenen Zone durch Vereinigung zweier Endothelschläuche zum Herzrohr. In der 3. EW kommuniziert dieses mit dem intraembryonalen Gefäßsystem und in der

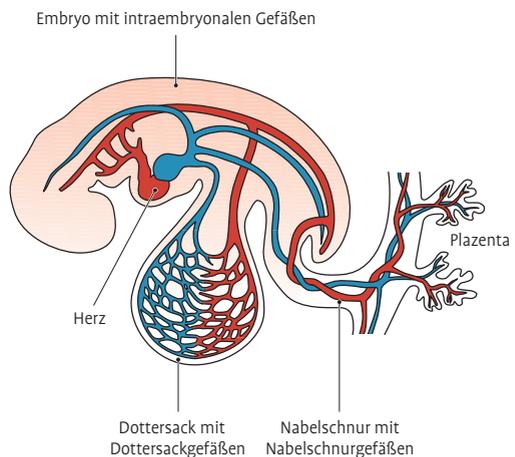


Abb. 2.23 Embryonale Gefäßsysteme (modifiziert nach J. Langman).

4. EW beginnt es mit einer Frequenz von 120–160 pro Minute zu schlagen, wodurch die Blutzirkulation einsetzt.

Klinik: Um die 20. SSW sind die **Herztöne** i. d. R. wahrnehmbar. Stellung des Rückens, Abstand des kindlichen Herzens von der Bauchdecke, Bauchdeckendicke, Fruchtwassermenge bestimmen den Zeitpunkt.

In einem vielzelligen Organismus kann die Aufnahme und Verteilung der Nährstoffe, der Mineralien, des Wassers und des für die Zellatmung notwendigen Sauerstoffes nicht mehr nur von den äußeren und inneren Oberflächen aus erfolgen. Es entwickelt sich ein geschlossenes System von größeren und kleineren Röhren (Gefäße), in denen Blut oder Lymphe zirkulieren, wobei ein (oder mehrere) zentrale Pumpsysteme und/oder die Gefäße selber den Inhalt umwälzen. Klappen bestimmen dabei die Flussrichtung.

Das **Kanalsystem** gliedert sich schon frühzeitig in ein:

- **Pumpwerk** (das Herz)
- leitendes **Röhrensystem** (die größeren und kleineren Blut- und Lymphgefäße)
- feines Netzwerk von **Haargefäßen** (die Kapillaren), die durch ihre dünne Wand hindurch den Stoff- und Gasaustausch mit den Geweben ermöglichen.

Einmal eingerichtet, übernimmt das System weitere Aufgaben (Verteilung von Hormonen, Temperaturregulation, Gestaltgebung u. a.).

Über das **Herz als Pumpwerk** s. Kap. 5.1.4.1.

2.3.1 Kreislauf

2.3.1.1 Aufgaben und Einteilung des Kreislauf-Systems

Die **Blutgefäße** sind ein **geschlossenes System**, d. h., der Inhalt der Blutgefäße kann nur über die Gefäßwände kontrolliert mit den anderen Geweben in Verbindung treten. Als Ausnahme von dieser Regel ist das Blutgefäßsystem im Knochenmark und in der Milz teilweise offen.

Aufgaben. Bei vielzelligen Organismen sind Transportwege erforderlich. Diese Aufgabe nehmen Blut- und Lymphgefäße wahr. Sie dienen bzw. erfüllen

- Transportfunktion (für Flüssigkeiten, Nährstoffe, Mineralien, Hormone, Stoffwechselprodukte, Blutgase sowie Zellen)
- dem Austausch der o. g. Stoffe und von Zellen mit den Geweben
- der Zellatmung und Ernährung
- der Homöostase und der Balance der Flüssigkeitsverteilungen im Körper unter allen Bedingungen
- der Kommunikation (Hormone)
- der Abwehr (z. B. durch Vasodilatation bei lokalen Entzündungen)
- der Temperaturregulation
- der Formprägung und anderen mechanischen Aufgaben
- der Blutstillung.

Darüber hinaus sind Gefäßreaktionen bei psychischen Prozessen und bei nonverbaler Kommunikation beteiligt (z. B. Farbwechsel der Haut wie Erblässen, Erröten).

Einteilung. Die Gefäße werden nach dem in ihnen herrschenden Druck und der Transportrichtung in Bezug auf das Herz eingeteilt. Der Inhalt, das Blut, wird nach der Sauerstoffsättigung als **arterielles** (ca. 97 %) oder **venöses** (~ 75 %) bezeichnet. Diese Bezeichnung ist unabhängig von der Benennung der Gefäße. Dabei gibt es viele Unterschiede. Die Sauerstoffsättigung im venösen Koronarblut beträgt um 25 %, während sie im venösen Blut aus der ruhenden Skelettmuskulatur eher bei 90 % liegt.

Gefäße werden nach der Bluttransportrichtung, Blut nach der Sauerstoffsättigung benannt.

Übersicht. In dem vereinfachten Schema der Abb. 2.24 strömt das venöse, aus der Peripherie kommende Blut in den **rechten Vorhof** und wird aus diesem in die rechte Kammer gesaugt und zu einem geringeren Teil (ca. 30 %) auch gepumpt. Die Kontraktion der **rechten Kammer** befördert nach dem Verschluss der Vorhofkammerklappe das venöse Blut durch die Lungenarterien in den Lungenkreislauf. Der CO_2 -Partialdruck sinkt hier von ca. 46 mmHg auf 40 mmHg. Nachdem in den Lungen außerdem der Sauerstoff aufgenommen wurde, strömt das arterielle Blut durch die Lungenvenen in den **linken Vorhof**. Von hier wird es wie aus dem rechten Vorhof schubweise in die **linke Kammer** gesaugt und gepumpt. Von dieser wird es nach Verschluss der linken Vorhofkammerklappen durch die Aorta, die Hauptschlagader des Körpers, in den

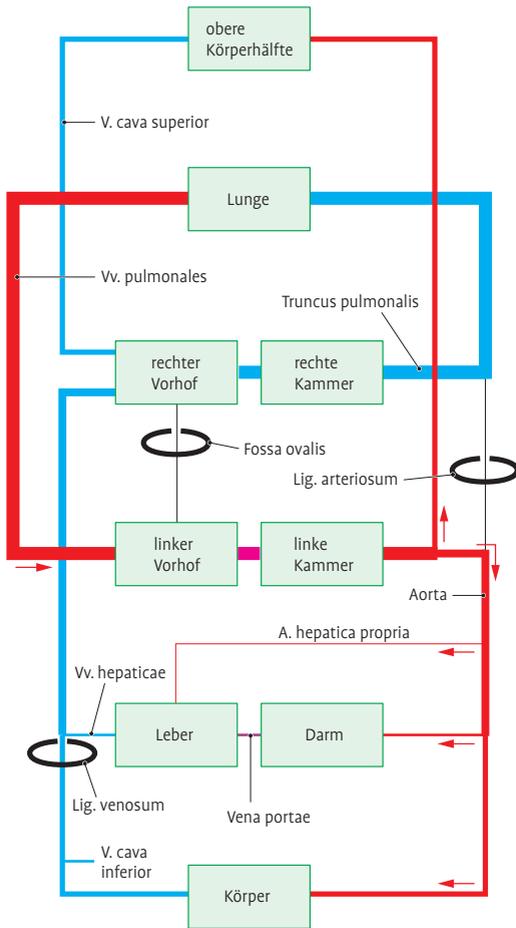


Abb. 2.24 Schematische Darstellung des postnatalen Kreislaufs. Die Strichstärke symbolisiert die relative Blutmenge, die Farbe den Grad der arteriellen Sättigung: blau = venös, rot = arteriell, magenta = Mischblut. Schwarze Striche mit benannten Kreisen geben die obliterierten Kurzschlüsse/Anastomosen des fetalen Kreislaufs wieder.

Körper zur Versorgung der verschiedenen Organe bzw. Körperteile geleitet. Von dort strömt es durch die großen Körpervenen wieder dem rechten Vorhof zu.

Ein Teil der Gewebeflüssigkeit, Lymphe, wird durch eigene Gefäße, die Lymphkapillaren und Lymphgefäße, Vasa lymphatica, gesammelt und weiter herzwärts den Körpervenen zugeführt (**Lymphkreislauf**). In den Verlauf der Lymphgefäße sind stellenweise Lymphknoten, Nodi lymphoidei, als „Filter“ eingeschaltet.

2.3.1.2 Großer und kleiner Kreislauf

Die **Untergliederung des Kreislaufs** in einen großen oder Körperkreislauf und einen kleinen oder Lungenkreislauf wird durch das Auftreten der Lungen und der mit der Bildung der Herzsepten verbundenen Teilung in ein linkes (arterielles) und rechtes (venöses) Herz vorgenommen (Abb. 2.24).

Der **große Kreislauf** hat die Aufgabe, Nährstoffe und Sauerstoff in den Körper zu transportieren. Er beginnt in der linken Kammer und endet im rechten Vorhof.

Der **kleine Kreislauf** ist für den O_2/CO_2 -Austausch in der Lunge verantwortlich. Er beginnt in der rechten Kammer und endet im linken Vorhof.

Jedes der beiden Teilherzen empfängt die Venen des anderen. Beide Herzen müssen daher pro Zeiteinheit exakt die gleiche Menge Blut auswerfen, um eine Stauung zu vermeiden.

Systole und Diastole. Man unterscheidet die Systole und Diastole der Vorhöfe und der Kammern, die zeitlich versetzt erfolgen (s. Kap. 5.1.4.1). Ist es nicht näher erläutert, so meint Systole die Systole der Kammern.

Die **Systole** ist die Kontraktionsphase des Herzens bzw. seiner Teile, die nach der **Diastole** (Erschlaffungsphase) erfolgt.

2.3.1.3 Pfortaderkreislauf

Er ist in den Körperkreislauf eingeschaltet. Die Pfortader, **V. portae hepatis**, sammelt das mit Nährstoffen angereicherte Blut aus den unpaaren Bauchorganen und transportiert es zur Leber (s. Kap. 5.2.2.3).

2.3.1.4 Pränataler Kreislauf

Besonderheiten. Über die Plazenta werden aus dem mütterlichen Blut Sauerstoff und Nährstoffe vom kindlichen Blut aufgenommen und Stoffwechselprodukte abgegeben. Um dem mütterlichen Hämoglobin in hinreichender Menge Sauerstoff entziehen zu können, besitzt das Blut des Kindes vor der Geburt ein Hämoglobin mit einer höheren **Sauerstoffaffinität**. Zu den besonderen vorgeburtlichen Kreislaufbedingungen gehört auch, dass die Lungengefäße vorgeburtlich angelegt sind, jedoch noch nicht voll perfundiert werden müssen.

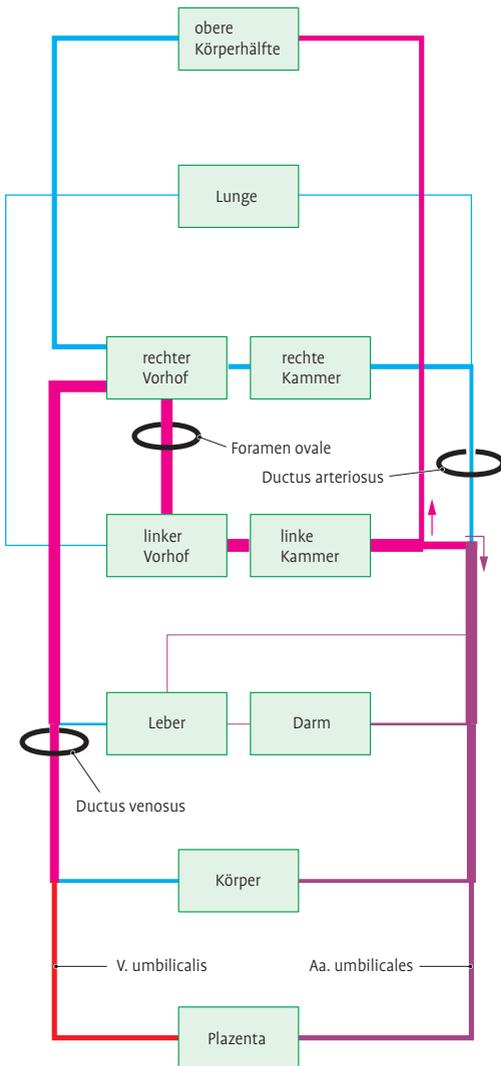


Abb. 2.25 Schematische Darstellung des fetalen Kreislaufs. Die Strichstärke symbolisiert die relative Blutmenge, die Farbe den Grad der arteriellen Sättigung: blau = venös, rot = arteriell, magenta = arterielles Mischblut, lila = venöses Mischblut. Die benannten Kreise geben die Kurzschlüsse/Anastomosen wieder. Für weitere Bezeichnungen s. Abb. 2.24.

Da in utero die **Lunge** noch nicht tätig sein kann, erfolgt die Sauerstoffsättigung (Arterialisierung) über die Plazenta.

Shunts

Der fetale Kreislauf besitzt 3 Shunts, da die Versorgung des Organismus nicht aus Lunge und Darm,

sondern aus der Plazenta erfolgt und mit der Geburt schlagartig umgestellt werden muss.

- **Ductus venosus.** Das von der Plazenta in einer Vene durch die Nabelschnur kommende Blut wird über die **V. umbilicalis** auf die Vena portae zu- und zum überwiegenden Teil durch einen Shunt an ihr zur unteren Hohlvene vorbeigeleitet. Eine vollständige Durchströmung der Leber mit dem Blut aus der Plazenta ist nicht sinnvoll, da der Widerstand des Kapillargebietes zu hoch wäre. Das nährstoffreiche Blut würde zudem zu einer Mast der Leber führen. Dieser Kurzschluss zur unteren Hohlvene ist der **Ductus venosus (Arantii)**, der über einen „Sphinkter“ die Menge des der Leber zufließenden Plazentablutes regelt.
- **Foramen ovale.** In der unteren Hohlvene wird das arterielle Blut mit dem venösen Blut der unteren Körperhälfte vermischt. Dieses überwiegend arterialisierte Mischblut wird zum größten Teil durch die **Valvula venae cavae inferioris (Eustachii)** auf das **Foramen ovale** des Vorhofseptums in den linken Vorhof gelenkt. Der Rest vermischt sich mit dem venösen Blut der oberen Hohlvene und gelangt in die rechte Kammer.
- **Ductus arteriosus.** Aus dem linken Vorhof gelangt das Blut in die linke Kammer und weiter in die Aorta. Das Blut der rechten Kammer strömt in den Truncus pulmonalis und über den **Ductus arteriosus (Botalli)** in die Aorta. Der Ductus mündet nach Abgang der Gefäße zum Kopf und Arm in den hinteren Teil des Aortenbogens. Kopf und obere Extremitäten erhalten daher sauerstoffreicheres Blut. Nach Einmündung der Ductus arteriosus liegt die Sauerstoffsättigung bei 60%. Aus der A. iliaca interna stammt beidseits die **A. umbilicalis** (Abb. 2.25). Sie leitet das venöse Blut zur Plazenta.

Umstellung bei der Geburt:

- **Hämoglobin.** Schon vor der Geburt beginnt der Austausch der Erythrozyten, die das fetale Hämoglobin tragen. Ihr Zerfall erreicht wenige Tage nach der Geburt einen Höhepunkt.
- Der **Ductus venosus** schließt sich nach der Geburt mangels weiterer Blutzufuhr. Die Nabelvene obliteriert (**Lig. teres hepatis**).
- Das **Foramen ovale** schließt sich mit den ersten Atemzügen durch den Druckabfall rechts und den Druckanstieg links (vermehrte Blutzufuhr aus der Lunge) mit einem Klappenmechanismus (**Septum primum**). Die **Valvula venae cavae inferioris** wird funktionslos.

- Der **Ductus arteriosus** verschließt sich durch die Strömungsumkehr, die den ersten Atemzügen folgt. Die Strömungsumkehr tritt ein, weil der Widerstand in den Lungengefäßen deutlich unter den Widerstand des übrigen Kreislaufes fällt. Der vollständige Verschluss sollte in wenigen Tagen nach der Geburt eingetreten sein. Anschließend obliteriert das Gefäß (**Lig. arteriosum Botalli**). Die rechte Kammer versorgt fortan nur noch ein Kapillargebiet und das Verhältnis der bis dahin annähernd gleichstarken Kammerwände verschiebt sich zugunsten eines stärkeren linken Ventrikels.

2.3.1.5 Uteroplazentarer Kreislauf

(s. Kap. 5.3.6.2)

2.3.2 Gefäße

2.3.2.1 Aufgaben und Einteilung des Gefäßsystems

Die vom Herzen zu den Organen ziehenden **Blutgefäße (Arterien)** werden als Puls- oder Schlagadern bezeichnet. Die kleinsten Arterien teilen sich in **Arteriolen**. Die das Blut zum Herzen zurückführenden Gefäße sind die Blutadern oder **Venen**. Die Venen entstehen aus **Venolen**. Zwischen Arteriolen und Venolen sind die Haargefäße (**Kapillaren**, capillus = Haar) eingeschaltet. Sie dienen dem Stoff- und Gasaustausch mit den Geweben und bilden, je nach Blutbedarf des Organs, ein engeres oder weiteres, verschieden geformtes Netzwerk (**Kapillarbett**).

Namensgebung. Der Name Arterie stammt möglicherweise von „aér“ (Luft) und „teréo“ (ich enthalte), da im Altertum Schlagadern für Luftleiter gehalten wurden. Schlagader heißen sie, weil an einigen von ihnen das Schlagen des Herzens, der **Puls**, gefühlt werden kann. Der Wortstamm für Vene, „vehere“, bedeutet führen.

Allgemeines. Die Aufgaben der Gefäßabschnitte müssen zusammen mit dem Inhalt betrachtet werden. So sind bei Verletzungen sowohl das Blut als auch die Gefäße mit eigenen Mechanismen an der **Blutstillung** beteiligt. Das Gefäßsystem besitzt ein (beschränktes) **Regenerationspotenzial**. Die Ausbildung einer **Vaskularisation** (Gefäßmuster z. B. eines Gewebes oder Organs) wird dabei nicht nur durch endogene morphogenetische (gestaltbildende) Faktoren, sondern auch durch mechanische Bedingungen geprägt.

2.3.2.2 Allgemeiner Wandbau

Die Gefäßwand besteht aus 3 Schichten: einer inneren (Tunica intima, **Intima**), mittleren (Tunica media, **Media** oder Muscularis) und äußeren Schicht (Tunica externa, **Adventitia**).

Von diesem prinzipiellen Bau gibt es je nach Gefäßart und in verschiedenen Organen oder Geweben **Abweichungen** und **Modifikationen** einzelner Anteile. Dies dient der Anpassung an die jeweiligen Erfordernisse.

Wandschichten

Tunica intima (Intima). Sie besitzt ein **Endothel** und eine dünne Membran aus Bindegewebsfasern (**Stratum subendotheliale**). Bei **Arterien** verdichtet sich das Stratum subendotheliale an der Grenze zur Media zur **Membrana elastica interna**. Bei **Kapillaren** ist die Intima die einzige vorhandene Schicht. Ihr aufgelagert finden sich hier **Perizyten**. Diese Zellen sind neben Endothel und Basalmembran an den verschiedenen Blut-Gewebe-Schranken beteiligt (s. z. B. Gehirn, Thymus, Hoden).

Tunica media (Media). Sie enthält vorwiegend spiralig angeordnete glatte **Muskelzellen**, zwischen denen je nach Bedarf Elastin, Kollagen (Typ I und III) und Proteoglykane vorkommen. An der Grenze zur Adventitia findet sich, besonders bei größeren Gefäßen, oft eine **Membrana elastica externa**. Die Media dient der **Tonusregulation**, d. h., sie passt die Wandspannung den Druckerfordernissen sowie der Transportrichtung des Blutstroms an. Zu diesem Zweck ist sie sympathisch adrenerg (im Genitalapparat auch parasymphatisch cholinerg) innerviert (VNS). Weitere Faktoren der Tonusregulierung sind die myogene Reaktion auf Druck (Bayliss-Effekt), lokale metabolische Faktoren, Hormone sowie endotheliale Faktoren. Ein Teil der Muskelzellen ist metabolisch aktiv (Phagozytose). Unter pathologischen Bedingungen (z. B. Arteriosklerose) kann sich dieser Zelltyp vermehren.

Tunica externa (Externa, Adventitia). Diese besteht aus lockerem Bindegewebe und enthält kollagene und elastische Netze. Sie stellt die Verbindungsschicht der Gefäßwand zur Umgebung dar und vermittelt den Einbau der Gefäße in umgebende Strukturen. Dies ist für die Mechanik der Gefäße bedeutend. Einerseits wird das Gefäß umschlossen und abgegrenzt, andererseits die Umgebung in die Bestimmung des Gefäßes mit einbezo-

gen. Bindegewebszüge können aus der Umgebung in die Adventitia ziehen, um das Lumen der Venen offen zu halten (z. B. V. cava inferior und Foramen v. cavae des Diaphragmas).

Vasa vasorum. In den größeren Arterien und vielfach auch in größeren Venen (Vv. cavae, Venen des Urogenitalsystems) finden sich kleine Gefäße für die Ernährung der Gefäßwand. In den Arterien kommen sie gewöhnlich nur in der Adventitia vor, da die Intima und innere Teile der Media durch Diffusion vom Blutstrom aus versorgt werden.

Klinik: 1. Freies NO senkt über eine Aktivierung der Guanylat-Zyklase (Erhöhung des intrazellulären c-GMP-Spiegels) den Tonus glatter Gefäßmuskeln. Substanzen, die in der Lage sind, NO in der Strombahn abzugeben (z. B. Molsidomin oder Nitrate), werden daher zur raschen Erweiterung der Gefäße (z. B. bei Angina pectoris) eingesetzt. Damit wird die **Vorlast** des Herzens (venöser Blutrückstrom) und der arterielle Widerstand (Nachlast) gesenkt. Der Effekt ist dabei venös ausgeprägter als arteriell. **2.** Bei der **Arteriosklerose** stehen neben den Intimaveränderungen histopathologische Mediaveränderungen im Vordergrund. Dabei stimulieren Mediatoren aus Thrombozyten, die an der geschädigten Intima haften, die Proliferation der Media-Myozyten. Diese phagozytieren zudem bei den familiären Hypercholesterinämien das vermehrt im Blut auftretende LDL (Low-density-Lipoprotein, ein stark cholesterinhaltiges Lipoprotein). Die für Lipoproteine pathologische Durchlässigkeit des Endothels kann auch durch andere arteriosklerotische Risikofaktoren ausgelöst werden.

2.3.2.3 Mechanik des Gefäßsystems

Die Gefäße sind ein System dehnungs- und kontraktionsfähiger, **lebender Röhren**, die sich der Herzarbeit und dem Blutbedarf der Organe unter Berücksichtigung externer Bedingungen in optimaler Weise anpassen können.

Blutverteilung und Anpassung des Kreislaufs an die Bedürfnisse des Organismus. Sie erfolgt im Sinne der Ökonomie sowohl durch das Herz als auch durch die Arterien, Venen und das Kapillarnetz. Der Kreislauf ist darauf eingestellt, bei möglichst geringer Herzarbeit den jeweiligen Blutbe-

darf der einzelnen Teile des Körpers sicherzustellen. Dafür existieren vier unterschiedlich schnell wirkende Mechanismen.

- **Gefäßregulation.** Ruhende Organe werden weniger durchblutet als tätige. Die Arterien und Venen setzen dazu durch Weiterstellung des Lumens den Strömungswiderstand herab oder durch Verengung herauf. Die Kapillaren können auch erweitert und verengt sein (es handelt sich um aktive und passive Mechanismen), zeitweise funktionslos bleiben und ihre Funktion bei Bedarf wieder aufnehmen. Entsprechend wird ihre Austauschfläche in den Geweben und damit der Stoffaustausch vergrößert bzw. verkleinert. Im Notfall (relativer oder absoluter Blutvolumenverlust) werden nur die überlebenswichtigen Organe im Sinne einer „Zentralisation des Kreislaufs“ durchblutet.
- Die **zirkulierende Blutmenge** wird dem Bedarf angepasst. Ein Teil des Blutes in den Organen fließt in Ruhe sehr langsam und kann bei akut erhöhtem Bedarf rasch mobilisiert werden. Der größte **Blutspeicher** dieser Art ist die Lunge (bis zu 500 ml mobilisierbar).
- **Erythrozytenproduktion.** Bei langfristig erhöhtem Bedarf an Sauerstofftransportkapazität (geringerer O₂-Partialdruck im Gewebe, Höhenluft) helfen solche kurzfristigen Mechanismen nicht und es werden mehr Erythrozyten produziert.
- Das Herz kann seine **Förderleistung**, die Menge des pro Minute bewegten Blutes (Herzminutenvolumen = HMV), steigern.

Gesteuert wird diese Anpassung sowohl zentral durch Nerven und Hormone als auch lokal durch Stoffwechselprodukte sowie durch auto- und parakrine Hormonsysteme. Damit ist eine Anpassung an den individuellen Bedarf des jeweiligen Organs oder Gewebes wie des Gesamtorganismus möglich. Lokale und übergeordnete Erfordernisse stehen dabei in einem Wechselspiel. Beispielsweise wird bei geringer Umgebungstemperatur die Hand wegen des großen Wärmeverlustes in diesem Gebiet (große Oberfläche bei geringem Volumen) vorübergehend unter Bedarf durchblutet. Das zunehmende Defizit erzwingt nach einer gewissen Zeit über lokale Regulationsmechanismen eine vermehrte Durchblutung.

Klinik: Seitenstechen ist ein unter körperlicher Belastung vor allem bei Jugendlichen auftretender stechender Schmerz unterhalb des Rippen-

bogens. Meist wird er links, manchmal beidseitig oder auch nur rechts wahrgenommen. Er geht mit akut erhöhter Sauerstoffausschöpfung in der Muskulatur einher. Bei Fortführung der Tätigkeit (z. B. Laufen) in vorwärtsgebeugter Haltung mit verminderter Anstrengung oder kurzfristigem Aussetzen verschwindet der Schmerz rasch. Als Ursache werden verschiedene Erklärungen angeführt. Die wichtigsten gehen von Blutumverteilungen aus, wodurch kurzfristig mehr Sauerstoffträger zur Verfügung gestellt werden sollen. Angeführt wird eine Reizung von Schmerzrezeptoren in der Milz- oder Leberkapsel. Diese könnte durch eine Blutumverteilung nach Belastungsbeginn erklärt werden, da oftmals Nahrungsaufnahme mit entsprechender Durchblutungssituationen im Bauchraum vorausgeht. Die Milz- oder Leberkapsel haben keine Muskelzellen, sodass sie sich nicht zusammenziehen können. Hingegen enthält die A. lienalis in ihren ausgiebigen Schlingelungen ein Blutreservoir, das bei einer Kontraktion der Gefäßmedia zur Verfügung gestellt werden kann. Dieser Krampf könnte ebenfalls Seitenstiche erklären.

Mechanische Aufgaben. Gefäße erfüllen über die Transportfunktion hinausgehend mechanische Aufgaben. Dazu gehören

- die Aufhängung der Darmschlingen im Gekröse durch die Mesenterialgefäße
- der Verschluss der Cardia gegen den Magen als Refluxhemmung durch den dort befindlichen Venenplexus
- die Gasabdichtung des Anus durch das Corpus cavernosum recti
- die Beteiligung der Herzkranzgefäße an der Dilatation der Ventrikel in der Kammerdiastole
- die Funktion von Schwellkörpern z. B. der Genitalorgane
- die Beteiligung der Spiralarterien an dem Pupillenspiel.

2.3.2.4 Blutdruck

Hoch- und Niederdrucksystem. Im Abschnitt von der linken Herzkammer bis zu den kleinen Arterien hin herrscht ein mittlerer Blutdruck von ca. 100 mmHg, der durch die Herzarbeit aufrecht erhalten wird (**Hochdrucksystem**). Im Gegensatz dazu liegt im Lungenkreislauf ein mittlerer Druck von ca. 20 mmHg (**Niederdrucksystem**) vor. Zum

Niederdrucksystem zählt man außerdem das venöse System und das Herz (Achtung: linke Kammer nur in der Diastole).

Zum **Hochdrucksystem** gehören die Arterien des Körperkreislaufes und die linke Herzkammer in der Systole.

Windkessel. Die linke Herzkammer treibt während der Systole das Blut in die Aorta. Dabei wird besonders der stark elastische Anfangsteil der Aorta im Sinne eines Windkessels gedehnt und dabei in ihm Energie gespeichert. Ein Windkessel ist ein Reservoir, in dem über die Verdichtung eines Luftpolsters die zuführende pulsierende Strömung von dem möglichst kontinuierlichen Fluss in den abhängigen Leitungen ferngehalten wird. In Blutgefäßen übernehmen die elastischen Fasern die Aufgabe des Luftpolsters. Beim Nachlassen der dehnenden Kraft, also mit dem Aufhören der Kammersystole, bewegt die in der elastischen Aortenwand gespeicherte Kraft das Blut weiter. Auf diese Weise wird der diskontinuierliche Blutstrom in einen mehr kontinuierlichen

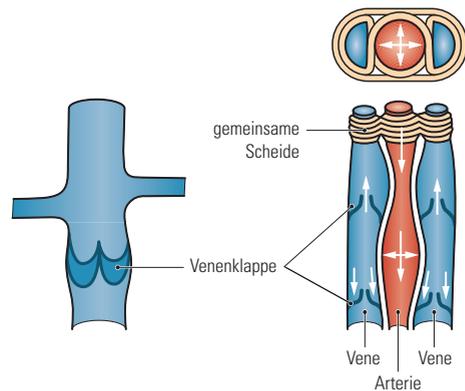


Abb. 2.26 Venenklappen und Prinzip der arteriovenösen Kopplung. **Links:** Längs aufgeschnittene Vene mit Klappen unterhalb von einmündenden kleineren Venen. **Rechts:** Schematische Darstellung der arteriovenösen Kopplung. Dabei werden die Begleitvenen (blau) einer Arterie durch die Volumenschwankungen der Arterie bei den Pulswellen rhythmisch komprimiert, da sie in einer gemeinsamen, nicht dehnbaren Bindegewebsscheide eingefasst sind und nicht ausweichen können. Die Blutsäule in den Venen bewirkt, dass die im venösen Blutstrom distalen (herzferneren) Klappen geschlossen und die proximalen für den Blutfluss geöffnet werden (Pfeile). Die gemeinsame Scheide ist symbolisch nur an einem Stück der Gefäße und im Querschnitt darüber dargestellt.

lichen Fluss umgewandelt. Die Ausweitung und nachträgliche Kontraktion des Anfangsteiles der Aorta läuft von dort wellenförmig über die übrige Aorta und die mittelstarken Arterien (s. Kap. 2.3.3).

Druckgefälle. Mit der immer stärker werdenden Verzweigung der Arterien wird die Summe der Wandflächen und damit der Reibungswiderstand größer. Gleichzeitig nimmt auch der Gesamtquerschnitt aller Gefäße zu. Querschnittsvergrößerung und erhöhter Reibungswiderstand setzen die Strömungsgeschwindigkeit herab. Sie ist in den Kapillaren am kleinsten. So wird hier intensiver Stoffaustausch mit den Geweben ermöglicht. Der mittlere Blutdruck fällt von der Aorta peripherwärts zunächst allmählich, in den den Kapillaren vorgeschalteten Arteriole (Widerstandsgefäße) besonders stark ab.

Venöser Rückstrom. Das geringe Druckgefälle in den Venen allein genügt nicht, das Blut dem rechten Vorhof zuzuführen. Unterstützend wirken deshalb der intrathorakale Sog und die Ventilebene des Herzens (vor allem bei herznahen Venen). Weitere Rückstrom fördernde Mechanismen sind Kontraktionen der Venenwand durch Minisphinkteren, die Venenklappen, die arteriovenöse Kopplung (Abb. 2.26) und in den unteren Körperabschnitten die Kontraktionen benachbarter Muskeln (Muskelpumpe) sowie die Bewegungen verschiedener Körperteile. Nicht zuletzt spielt auch noch der nach der Passage des Kapillarbetts verbliebene Blutdruck von ca. 15 (25–0) mmHg eine Rolle.

Der Förderung des **venösen Rückstroms** dienen neben dem Druckgefälle die Venenklappen, die arteriovenöse Kopplung, die Muskelpumpe und der intrathorakale Sog.

Klinik: Bei einer **Luftembolie** dringt Luft in den Kreislauf. Die Bläschen verursachen eine Verlegung von kapillären Gefäßgebieten (z. B. in Lunge, Gehirn, Herz). Ursache ist das Druckgefälle zwischen Luft und Blutkreislauf. Dies ist vor allem bei eröffneten Gefäßen im Bereich des Niederdrucksystems möglich, etwa während neurochirurgischer Operationen mit hochgelagertem Oberkörper oder bei Halsverletzungen. Andere Möglichkeiten sind z. B. Lungenoperationen, Pneumothorax, Überdruckbeatmung, Explosionen oder Angiografien.

2.3.2.5 Verteilung des Blutes im Blutgefäßsystem

Blutvolumina. Das arterielle Hochdrucksystem enthält etwa 12–15% des Blutvolumens. Als **zentrales Blutvolumen** wird die Blutmenge in den Lungengefäßen und der linken Herzhälfte bezeichnet (20%). Der Thorax fasst insgesamt 30% des Blutes. Die Venen enthalten 65% des Blutes und werden daher **Kapazitätsgefäße** genannt.

Regulation. Die Blutfülle der einzelnen Gefäßgebiete hängt von vielen Faktoren ab. An den Akren (Körperendigungen wie Füße, Finger oder Nase) geht beispielsweise aufgrund des schlechten Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen rasch viel Wärme verloren. Daher ist hier die Durchblutungsregulation sehr ausgeprägt. Bei hohen Außentemperaturen fließt durch die Hände 30-mal mehr Blut als bei Kälte. Blut und Gefäße wirken hier zusammen als Heizungs- und Kühlsystem.

Klinik: Bei einer **Linksherzinsuffizienz** staut sich das Blut in der Lunge und der durch den Druckanstieg bedingte Flüssigkeitsaustritt verursacht klinisch zunehmende Dyspnoe bis zum schaumigen Sputum und Zyanose. Eine solche abnorme Ansammlung seröser Flüssigkeit (Transsudat) im Interstitium des Lungengewebes bezeichnet man als **Lungenödem**.

2.3.2.6 Rezeptoren in den Gefäßwänden

Osmorezeptoren. Sie finden sich z. B. in Zellarealen des Hypothalamus (Nucleus supraopticus und Nucleus paraventricularis) sowie in der Leber. Sie registrieren minimale Abweichungen der Plasmaosmolarität.

Chemozeptoren. Sie sind stark vaskularisierte und innervierte Strukturen an der Teilungsstelle der A. carotis (Glomus caroticum) und im Aortenbogen (Glomus aorticum). Sie registrieren einen Abfall des arteriellen pO_2 , einen Anstieg des arteriellen pCO_2 und einen Anstieg der arteriellen H-Ionenkonzentration.

Barorezeptoren. Sie finden sich in der Wand der Aorta und im Karotissinus. Es handelt sich um Dehnungsrezeptoren. Die Dehnung der Gefäßwände infolge einer Blutdruckerhöhung führt zu ihrer Aktivierung.

Atriales natriuretisches Peptid (ANP). Spezielle Myozyten der Herzvorhöfe registrieren eine Vor-

hofdehnung und sezernieren ANP in das zirkulierende Blut. ANP-bildende Zellen kommen auch in Gehirn, Aortenbogen, Nebenniere und Niere vor. Durch Steigerung der Natriuresis und Diuresis sowie durch eine Gefäßdilataion wird der arterielle Druck gesenkt.

2.3.2.7 Nervöse Versorgung

Die Innervation der Gefäßmuskulatur erfolgt durch das **vegetative Nervensystem** über die Adventitia (s. Kap. 2.4.6.1). In der Adventitia können zusätzlich Spannungsrezeptoren vorhanden sein. Vegetative Fasern sind bis in das Kapillargebiet nachweisbar.

2.3.2.8 Endo- und parakrine Regulatoren

Blutflussabhängiger Scherstress hat einen wesentlichen Einfluss auf die kontraktile Aktivität der Gefäßmuskulatur. Mit steigender Flussrate wird zunehmend ein endothelialer Faktor (EDRF) freigesetzt, der die Muskelzellen entspannt und damit für eine Lumenweitung sorgt. Vasodilatorisch wirken außerdem Histamin, Adrenalin (über β -adrenerge Rezeptoren), diverse Stoffwechselprodukte, geringer pO_2 , hoher pCO_2 bzw. geringer pH und Temperaturerhöhung. Vasokonstriktorisch wirken z. B. Adrenalin (über α -adrenerge Rezeptoren), Noradrenalin, Endothelin und Angiotensin II.

2.3.2.9 Anordnung, Verlauf und Dehnbarkeit der Gefäße

Die großen Nervenstämmen verlaufen vor allem an den Extremitäten oft mit den größeren (subfaszialen) Gefäßen (sog. **Leitungsbahnen**).

Gefäß-Nervenstraßen. Die Zusammenlagerung von Gefäßen und Nerven zu einem Strang ermöglicht einen Schutz, vorzugsweise vor Schädigungen durch körpereigene Bewegungen. Sie werden durch eine gemeinsame, bindegewebige **Gefäß-Nervenscheide** zusammengehalten. Diese Scheide kann sehr ausgeprägt sein (z. B. am Hals). Nicht selten laufen sie dabei über längere Strecken parallel zu einem Muskel (**Leitmuskel**), der das Aufsuchen im Körper erleichtert.

- **Paarige Vv. comitantes.** Die meisten Extremitäten-Arterien werden von paarigen Begleitvenen begleitet.
- **Singuläre V. comitans.** Die großen Arterien (z. B. A. iliaca ext., A. femoralis, A. poplitea) haben gewöhnlich nur eine Begleitvene.

- **Vv. subcutaneae.** Hautvenen verlaufen ohne Arterien. Sie liegen unter der Haut auf der Faszie und werden häufig von oberflächlichen Lymphgefäßen begleitet. Diese Venen sind sehr variabel in ihrem Verlauf und anastomosieren oft mit tiefer gelegenen Begleitvenen. Dabei ist die Blutflussrichtung durch Klappen nach innen gerichtet.

Klinik: Entzündungen können sich in vorgeformten Bindegewebsräumen infiltrativ ausdehnen (**Phlegmone**). Ursache sind vielfach hämolysierende Streptokokken. Entlang einer Gefäßnervenstraße können sich Phlegmone rasch über große Strecken ausbreiten.

Verlauf von Gefäß-Nervenstraßen. Gefäße und Nerven verlaufen an Extremitäten typischerweise über die Beugeseite der Gelenke, um bei Beugung nicht überdehnt zu werden. Wichtig ist dabei der Bezug zur Bewegungsachse. In Bereichen, wo große Flächen oder Räume unbeweglicher sind (z. B. Kopf), wirkt dieses ordnende Prinzip weniger. Die Gefäße wählen i. d. R. den kürzesten Weg zum Erfolgsorgan.

Wenn sie einen langen Weg zurücklegen müssen, ist das meist durch Verlagerungen während der Entwicklung zu erklären. Beispiele:

- Die **Keimdrüsen**, die ursprünglich in der oberen Lenden- und unteren Thoraxgegend angelegt wurden (Urnierenderivate), beziehen ihre Arterien (Aa. testiculares sive ovaricae) direkt aus der Bauchorta.
- **Untere Extremität.** Weichen die Hauptstämmen von Gefäßen und Nerven von der Regel eines gemeinsamen Verlaufs (über die Beugeseite) ab, so ist vielfach ein im Laufe der Evolution geänderte Gelenknutzung (z. B. bei der Aufrichtung des Menschen) die Ursache. Arterien können sich – anders als Nerven – rückbilden und Kollateralen, die günstiger liegen, die Aufgabe übernehmen. So findet sich die Hauptschlagader des Menschenbeines rumpfnah nicht beim N. ischiadicus, sondern die A. femoralis hat diese Aufgabe übernommen.
- **Verlagerung.** Bei der Beugung werden die Gefäßstämmen durch Zug des umgebenden Bindegewebes so verlagert, dass sie weniger abknicken, als es der Winkel des gebeugten Gelenkes impliziert. Das Beispiel der A. poplitea zeigt, dass dennoch die mechanische Belastung in

Gelenknähe bei Arterien eine Prädilektion für degenerative Veränderungen ist.

- Bei beweglichen oder verschieblichen **inneren Organen** und bei Knochen lagern sich die Leitungsbahnen im Zentrum oder der Achse der Bewegung zusammen, um an dieser Stelle gemeinsam in das Organ einzutreten (Hilum).

Gefäßvarietäten. Sie sind sehr häufig und meist aus der Entwicklungsgeschichte zu erklären. Die Vielfalt ist groß, aber begrenzt durch Variationen der **Neu-, Um- und Rückbildungsprozesse** in der frühen Embryonalphase. Im Allgemeinen sind die Arterien in ihrem ganzen Verhalten (Größe, Verlauf usw.) konstanter als die Venen. Die Arterien- und Venenstämme sind am Anfang in dem frühen Gefäßnetz des Embryos nicht differenziert. Sie treten erst allmählich daraus hervor, wenn sie an Volumen zunehmen. Die Stämme sind in erster Linie erblich bedingt, die Details sind Anpassungen an die Funktionen.

Altersveränderungen. Venen können leichter als Arterien gedehnt werden. Arterien sind besonders in der Länge, Venen in der Quere dehnbar. Lässt die Dehnbarkeit der Arterien im Alter nach, so zeigt sich eine stärkere Schlingelung z. B. die oft gut sichtbaren Aa. temporales superficiales bei älteren Menschen.

Gefäßverzweigungen. Die Gefäße verzweigen sich nach drei wesentlichen Mustern. Die Gefäßverzweigungen folgen dabei hauptsächlich den hämodynamischen Anforderungen des Blutstroms. Das Blut soll mit geringstem Energieverlust verteilt werden. Dazu gehört die Vermeidung von Verwirbelungen. Scharfe Knicke fehlen daher weitgehend.

- **Monopodial.** Ein Hauptstamm gibt zahlreiche kleinere Arterien ab. Die Gefäße gehen des Öfteren in spitzem, seltener in rechtem und stumpfen Winkel vom Hauptstamm ab.
- **Dichotom.** Teilt sich der Hauptstamm in 2 etwa gleich starke Äste, so spricht man von **dichotomischer Teilung**. Diese muss nicht angelegt sein, sondern kann, wie bei den Iliakalarterien, die Aufweitung von monopodialen Ästen im Rahmen funktioneller Änderungen sein.
- Die Aufzweigung eines Gefäßes in ein **Büschel** kleinerer Gefäße ist nur in wenigen Organen verwirklicht (Pinselarteriolen der Milz).

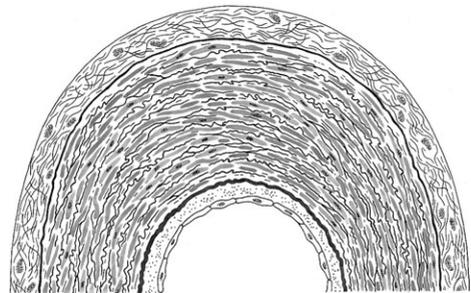
Klinik: Stumpfwinklige Gefäßabgänge sind ungünstige Blutstrom-Richtungsänderungen. Hier

entstehen häufiger Verwirbelungen. Bei Arterien sind dies Prädilektionsstellen **arteriosklerotischer Plaques** (z. B. kraniale Abgänge aus dem Aortenbogen); bei Venen kann es Stauungen und damit **Varizenbildungen** geben.

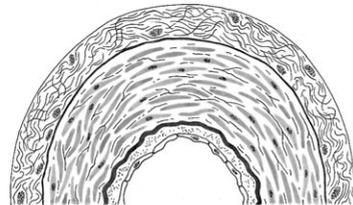
2.3.2.10 Arterien und Arteriolen

Nach dem Aufbau unterscheidet man Arterien vom **elastischen und muskulären Typ** (Abb. 2.27). Der Übergang ist kontinuierlich.

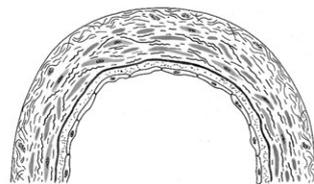
Nach der Größe teilt man die Arterien formal in große, mittelgroße, kleine und präkapillare Arterien (Arteriolen, s. u.) ein. Dabei haben Arterien gleicher Größe keinesfalls immer gleiche Aufgaben. Diese hängen vielmehr vom Organ oder Gewebe ab.



(a)



(b)



(c)

Abb. 2.27 a: Arterie vom elastischen Typ. **b:** Arterie vom muskulären Typ. **c:** Vene. Man beachte die unscharfe Abgrenzung von Media und Adventitia bei der Vene.

Arterien vom elastischen Typ

Zum elastischen Typ gehören die großen herznahen Gefäße (**Aorta**, **Truncus brachiocephalicus**, **A. carotis communis**, **Truncus pulmonalis** usw.), jedoch nicht die Aa. coronariae, da sie (besonders links) vermehrt in der Diastole durchblutet werden und daher die oben beschriebene, zur Systole gehörende Funktion nicht erfüllen (s. Kap. 2.3.2.5).

Die Gefäße vom elastischen Typ haben eine **Windkesselfunktion** und werden auf Dehnung beansprucht. Sie zeigen im Gegensatz zu den mittleren Gefäßen eine dickere Intima, keine besonders ausgeprägte Elastica interna und in der Tunica media zahlreiche gefensterte, elastische Membranen.

Klinik: 1. Die häufigste Krankheit der Arterien ist die **Arteriosklerose**. Sie wird u. a. als Störung des Lipidstoffwechsels in der arteriellen Intima charakterisiert (**Atherosklerose**). Es handelt sich jedoch um einen Sammelbegriff verschiedener pathogenetischer Veränderungen. Dabei kommt es im Endstadium zur Ablagerung von Kalziumkomponenten. Dies stört z. B. die Windkesselfunktion. **2.** Die geschwächte Wand kann auch **aneurysmatisch** werden. Die meisten Komplikationen sind organbedingt und oftmals Folge der Lumeneinengung (z. B. Angina pectoris, Infarkt, Claudicatio intermittens, Gangrän).

Arterien vom muskulären Typ

Mit der **Entfernung vom Herzen** prägt sich der muskuläre Typ stärker aus.

Wandschichten. Wir unterscheiden 3 Wandschichten, die bei den mittelgroßen Gefäßen am deutlichsten ausgeprägt sind (Abb. 2.27).

- **Tunica intima (Intima).** Sie besteht neben den **Endothelzellen** aus feinen, elastischen und kollagenen **Fasern**. Sie wird vorwiegend in Strömungsrichtung beansprucht, weshalb die Strukturelemente vorwiegend in Längsrichtung angeordnet sind. Die **Membrana elastica interna** bildet die Grenze gegen die Tunica media.
- **Tunica media (Media).** Diese ist auf Dehnung und Pulsation eingestellt. Sie besteht aus einer dicken Lage flach-schraubenförmig verlaufender, glatter **Muskelzellen**. Die **Membrana elastica externa** bildet die Grenze gegen die Tunica externa.

- **Tunica externa (Adventitia).** Hier sind vorwiegend längs verlaufende elastische und kollagene Fasern in Form eines **Scherengitters** angeordnet. Sie müssen den pulsatorischen Volumenschwankungen nachgeben können. Alle elastischen Fasern der Gefäßwand bilden mit den elastischen Fasern der Umgebung zusammen ein Raumgitter.

Rankenarterien, Aa. helicinae

Rankenarterien sind geschlängelte Arterien in Organen, die großen Volumenschwankungen unterworfen sind (Genitalapparat) oder an Orten, wo die Gefäße stark bewegt werden (einige Gesichtsbereiche). Diese Schlängelungen bilden Reserve-längen, z. B. bei der **A. facialis** (Kaubewegung). Diese Deutung klärt aber nicht alles auf, da beispielsweise die seitlich am Uterus verlaufende **A. uterina** am Ende der Schwangerschaft (also bei stärkster Ausdehnung des Uterus) nach wie vor geschlängelt ist. Die Hämodynamik liefert hier wahrscheinlich eine weitere Erklärung. Bei der ebenfalls stark gewundenen **A. splenica** (lienalis) ist diese Schlängelung gleichfalls nicht etwa Folge der Atemverschieblichkeit, sondern (vermutlich) ein Rudiment der Blutspeicherfunktion, welche die Milz mangels Muskelzellen beim Menschen nicht mehr ausübt (statt dessen größeres Volumen der Arterie durch Längenreserve).

Arteriolen

Mit der **Größenabnahme der Arterien** zur Peripherie hin nehmen alle ihre Schichten, vorwiegend aber die Tunica media, ab. Die Arteriolen als **Terminalarterien** (Durchmesser 20–80 µm) besitzen nur noch **eine**, oft nicht mehr geschlossene **Muskellage** (Abb. 2.28).

Im Bereich der Arteriolen findet ein starker **Blutdruckabfall** statt. Dies erklärt sich hauptsächlich aus dem bedeutend größeren Gesamtquerschnitt (Volumenzunahme) der Arteriolen gegenüber den kleinen Arterien. Arteriolen werden auch als **Widerstandsgefäße** bezeichnet, da bereits kleine Lumenverkleinerungen eine deutliche Widerstandserhöhung bewirken. Man erklärt dies durch die Erhöhung der Reibung des Blutes an der Gefäßwand und durch die Veränderung seiner Fließ-eigenschaften bei der Verringerung der Strömungs-geschwindigkeit.

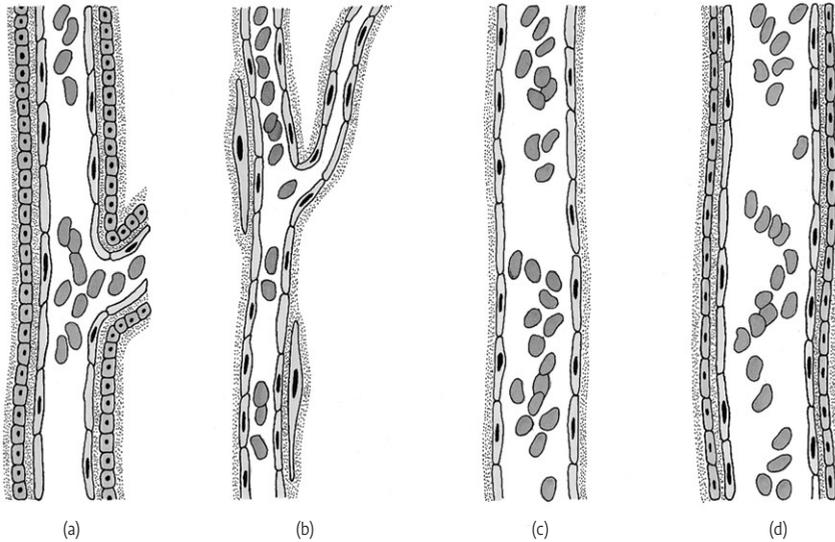


Abb. 2.28 Terminale Gefäßstrecke: **a:** Arteriole, **b, c:** Kapillaren, **d:** kleine Vene.

2.3.2.11 Kapillaren und Sinus

Die **Kapillaren** sind dünnwandige, enge Gefäße mit schwankendem Lumen, durch die noch Erythrozyten durchtreten können (Durchmesser 3–15 μm , Länge im Mittel 500 μm). Sie sind die Stelle des Stoffaustausches zwischen Blut und Gewebe.

Wandschichten. Ihre Wand besteht lumenwärts aus einer Endothelschicht (Abb. 2.28). Die untereinander durch Zellverbindungen (Tight junctions, Gap junctions, selten Desmosomen) verknüpften platten Endothelzellen (0,1–1 μm Dicke) sind mit ihrer Längsachse in Richtung des Gefäßes eingestellt. Die sich anschließende stark dehnungsfähige, sehr dünne Basalmembran wird vorwiegend von den Endothelzellen gebildet. Sie stellt unter physiologischen Bedingungen keine wesentliche Permeabilitätsschranke dar, ist aber für pathologische Vorgänge von Bedeutung. Phagozytierende Adventitiazellen befinden sich außerhalb der Basallamina und liegen der Kapillarwand nur auf.

Kapillarbett. Untereinander bilden die Kapillaren ein Netzwerk, das in Dichte, Art der Vernetzung und Form vom Blutbedarf sowie der Struktur des jeweiligen Organs abhängig ist. Die Sauerstoffaushöpfung ist ein wesentlicher Faktor für Art und Umfang der Kapillarisation eines Gewebes. Kapillaren können vom Körper leicht nachgebildet

oder ersetzt werden (Granulationsgewebe nach Verletzungen, wachsendes Fettgewebe).

Kapillartypen. Im Hinblick auf die Wandgestaltung werden 3 Kapillartypen unterschieden:

- **Kapillaren mit zusammenhängendem Endothel** besitzen eine durchgehende Basallamina ohne Poren (Fenestrae). Sie kommen u. a. in Gehirn, Retina, Hoden, Thymus, Lungen und Muskulatur vor. Der Stoffaustausch durch **aktive trans-endotheliale Transportvorgänge** und paraendotheliale Diffusion ist streng kontrolliert.
- **Kapillaren mit intrazellulären Poren.** Ihre Endothelzellen besitzen Poren (**Fenestrae**; fenestriertes Endothel) mit einem Durchmesser von ca. 60 nm oder darunter (bis zu 9 nm). Meist sind die Poren von einem Porendiaphragma verschlossen, können aber auch offen sein. Dieser Kapillartyp kommt in den endokrinen Organen, im Dünndarm, im Knochenmark und in peritubulären sowie glomerulären Kapillaren der Niere vor. Der Stoffaustausch ist erleichtert.

Sinusoide sind besonders weite Kapillaren (30–40 μm). Ihr Endothel besitzt keine oder keine zusammenhängende Basallamina und sowohl intrazelluläre Poren als auch interzelluläre Lücken.

Dieser Typ kommt in der Leber, in der Milz und im roten Knochenmark vor. Hier vollzieht sich der

Stoffaustausch am leichtesten. **Venöse Sinus** sind kleine, erweiterte Gefäßstrecken (z. B. im Nebennierenmark, in der Hypophyse oder in der Leber). Das Blut fließt hier langsamer (längere Kontaktzeit).

Blut-Gewebe-Schranken. Die Kapillarwand bildet einen Teil der Blut-Gewebe-Schranke. Der Stoffaustausch erfolgt transzellulär durch Diffusion und – vermutlich – **Zytopempsis** (transzellulärer Stofftransport in Vesikeln mit kontrollierter Endo- und Exozytose) sowie interendothelial. In erster Linie sind der Blutdruck, der osmotische und kolloid-osmotische Druck daran beteiligt.

Präkapilläre Sphinkteren. Zu den grundlegenden Eigenschaften kapillärer Gefäßstrecken gehört die periodische Öffnung und Schließung von **präkapillären Sphinkteren** (Periode von 2–8 s). Mit diesen feinen muskulären Sphinkteren, die am Ursprung der Kapillaren liegen (Sphinkterkapillaren), wird der Blutgehalt der Kapillaren reguliert.

Terminale Strombahn. Als terminale Strombahn bezeichnet man die für den Stoffaustausch mit dem Gewebe und seine Regulation zuständigen Gefäßgebiete. Dieser Bereich der **Mikrozirkulation** unterliegt wegen des geringen Durchmessers der Kapillaren besonderen rheologischen Bedingungen.

Biologisches Verhalten der Kapillaren. Grundsätzlich kann es zu einer Kapillarerweiterung (Vasodilatation) mit Streckenverkürzung und zu einer Längung (Elongation) mit kleinerem Lumen kommen. Ändert sich zudem die Wanddicke (Lumenänderungen der Haargefäße durch An- oder Abschwellung des Kapillarendothels), ist Vasodilatation und Elongation gleichzeitig möglich (erleichterter Stoffaustausch). Diese Veränderungen sind bedeutend für physiologische (z. B. Muskelhypertrophie) und pathologische Vorgänge (z. B. chronische Entzündungen, Kaposi-Sarkom). Die Bedeutung der kapillären Nervenversorgung ist nicht geklärt. Es werden sowohl sensible als auch zunehmend vegetativ-effere Fasern nachgewiesen. Nicht alle die terminalen Gefäße begleitenden Nerven sind für deren Versorgung zuständig. Die Gefäße können auch der Versorgung der Nerven dienen und sie im Sinne einer Leitstruktur in das Zielgebiet bringen (z. B. bei Regenerationsprozessen oder in der Organogenese).

2.3.2.12 Venen und Venolen

Die Nomina Anatomica benennen etwa 400 Venen. Herzfern sind sie zumeist paarig oder geflechtartig in einer gemeinsamen Bindegewebshülle (Ge-

fäßscheide) aus Kollagenfasern in statistischer Ordnung (vorzugsweise konzentrisch) um die Arterien gelegen (**arteriovenöse Koppelung**, Abb. 2.26).

Verlauf, Funktion. Im Urogenitaltrakt begleiten zwei Venen eine Arterie. Diese Venen sind teilweise muskelstärker als die zugehörige Arterie. Regelmäßig finden sich zwei Arterien und eine Vene in der Nabelschnur. In den Venen unterliegt der Druck anderen Rhythmen als dem Puls (z. B. der Atmung). Klappen gewährleisten die Strömungsrichtung. Sie sind Voraussetzung für die **Muskelpumpe**. Dabei handelt es sich um eine Massage der Venen durch kontrahierende Muskeln. Die kollagenfaserige Scheide und die Klappen bedingen, dass sich die Venen durch diese Kompression herzwärts entleeren. Ähnlich wirkt auch die Peristaltik des Darms auf die Pfortaderzuflüsse. Die großen herznahen Venen und die meisten Venen am Kopf verfügen aufgrund der dort vorherrschenden Druckverhältnisse über keine Klappen. Klappen und Adventitia fördern auch bei jeder anderen Komprimierung den venösen Rückstrom (Belastung der Fußsohle, Kompressionsrumpfe zur Thromboseprophylaxe).

Eigenständige Verlaufsmuster. In Gebieten relativer Ruhe (Rumpf, weite Teile des Gesichtes, Schädelinneres) können Venen unabhängig von Arterien verlaufen und eigenständige Verzweigungsmuster aufweisen. Diese Venen haben zumeist anderslautende Namen als die in der Nachbarschaft verlaufenden Arterien. Ebenfalls eigenständige Namen haben Hautvenen, da es keine größeren Hautarterien gibt. Hautvenen stehen über nach innen leitende (Klappen!), die Körperfaszie durchtretende **Perforansvenen** mit dem tiefen Venensystem in Verbindung (Abb. 2.29).

Einteilung. Nach der Größe unterscheidet man große, mittelgroße, kleine und kleinste (Venolen) Venen.

Wandaufbau. Man kann auch bei Venen einen Dreischichten-Aufbau erkennen, der aber weniger deutlich und stärker variabel ist (Abb. 2.27).

- **Tunica intima (Intima).** Sie besteht aus einer Endothelschicht und einer wechselnd dicken Lage von feinen kollagenen und elastischen Fasern, in die bei manchen Venen, besonders denen der unteren Extremitäten und des Genitale, noch zahlreiche längs verlaufende glatte Muskelzellen eingelagert sein können. Eine **Membrana elastica interna** ist nicht immer klar ausgeprägt.

- **Tunica media (Media).** Diese ist dünner und auflockerter als bei Arterien und oft nur schwach entwickelt. Die V. cava inferior und die Vv. suprenales besitzen nahezu ausschließlich Längsmuskulatur. Durch eine Zunahme des kollagenen Bindegewebes sind die Muskelzellen zu einzelnen Bündeln auseinander gedrängt. Es lassen sich 2 Schichten abgrenzen. Die innere ist stärker spiralisiert, die äußere flacher. Damit sind die Venen (wie bei Ureter, Ductus deferens oder Tuba uterina – alle mit überwiegend dreischichtiger Tunica muscularis, vgl. Adventitia) zu einer „Melkbewegung“ befähigt (d. h. Lumenerweiterung am Ort der Kontraktion). Diese ist herzwärts gerichtet. Daneben kommt ein zartes Netzwerk elastischer Fasern vor. Ist eine Membrana elastica interna vorhanden, bildet sie vorwiegend Längsnetze, deren Fasern in der Intima dünn und außen dick sind.
- **Tunica externa (Adventitia).** Sie ist in der Dicke wechselnd und ähnlich wie die der Arterien gebaut. Zumeist ist sie die dickste der 3 Wandabschnitte. Die Adventitia enthält meist Bündel schwach spiralisierter, vorzugsweise längs verlaufender glatter Muskelzellen, sodass die meisten Venen faktisch über 3 Muskelschichten verfügen. Man kann diese Muskelzelllage auch der Media zurechnen. Die Verankerung der Venenwand mit der Umgebung ist sehr variabel. Die meisten Venen kollabieren bei zu geringem venösen Blutdruck. An der unteren Extremität ist die Adventitia verdickt, um den intravasalen Druck besser aufzunehmen.

Wandstärke. Die Venen haben oft eine wesentlich **dünnere** Wand als gleichgroße Arterien. Damit wird dem niedrigeren Blutdruck im venösen Schenkel Rechnung getragen. Die Variabilität im Aufbau der Venenwand ist besonders groß; sie wird von den hämodynamischen Momenten der einzelnen Körperabschnitte bestimmt. Bei der Aufrichtung aus dem Liegen in den Stand bleiben durch die Venenfüllung über 500 ml Blut in der unteren Extremität. Mit zunehmendem hydrostatischen Druck (also in den unteren Extremitäten) steigt die Muskelstärke. Gleichzeitig nimmt die Zahl der **Venenklappen** zu. Die V. saphena magna ist gebaut wie eine starke Arterie. An den oberen Extremitäten, Kopf und Hals finden wir meist muskelschwache Venen (niedriger intravasaler Druck gegenüber den Arterien). Die Dicke der Venenwand korreliert jedoch keineswegs mit der Größe

des Lumens. Besonders variabel sind die kleinen Venen in ihrem Aufbau. Einander relativ ähnlich sind noch die mittelgroßen Extremitätenvenen.

Klinik: Eine (gesunde) Hautvene der unteren Extremitäten kann aufgrund ihrer Wandstärke als **autolog transplantiertes arterieller Bypass** (z. B. der Herzkranzgefäße) verwendet werden. Die Venen sind langstreckig und unter der Haut gut erreichbar. Von den begleitenden Hautnerven lassen sie sich gut isolieren. Der Verlust der vegetativen Innervation wird durch die Autokontraktionsfähigkeit der Media ausgeglichen. Unter der pulsierenden Druckbelastung nimmt die Vene zunehmend arteriellen Charakter an. Wegen der Venenklappen muss das Transplantat in umgekehrter Richtung eingenäht werden. Das Herkunftsgebiet wird hinreichend redundant entsorgt und kann den Verlust kompensieren.

Venenklappen, Valvulae. Das sind herzwärts geöffnete Intimaduplikaturen (Abb. 2.26), die eine bindegewebige Grundlage aus elastischen und kollagenen Fasern haben und an beiden Seiten von Endothel überzogen werden. Es existieren 2 Klappentypen.

- Der größere Klappentyp hat eine dicke, fibröse, flächige Grundlage und ist sichtbar an die Venenwand angeheftet. Bei Füllung wölbt sich die Klappe in das Lumen der Vene vor und die Klappenhälften lagern sich einander an. Die Venenwand ist im Bereich hinter diesen Klappen sinusartig ausgeweitet.
- Der kleinere Typ ist dagegen meist nicht sichtbar und muss im Präparat an der eröffneten Vene durch einen dünnen Wasserstrahl demonstriert werden. Diese Klappen verschließen das Lumen der Venen vielfach nur partiell. Klappen kommen an allen kleinen und mittelgroßen venösen Gefäßen vor. Besonders zahlreich sind sie in den Venen der Extremitäten und der Rumpfwand; an den unteren Extremitäten finden sich größenordnungsmäßig alle 2 cm Venenklappen. Stehen die Klappen besonders dicht, so bekommt die gefüllte Vene ein **perlschnurartiges Aussehen** (Rosenkranzvene = V. saphena parva). Die Klappen sind zumeist paarig gebaut und liegen bevorzugt distal der Einmündung anderer Venen. Sie verhindern den Rückstrom des Blutes und geben den Weg in Richtung Herz frei.

Venolen

Venolen haben einen Durchmesser von 10–30 μm . Sie sind den Kapillaren nachgeschaltet. Ihr Wandaufbau ähnelt noch sehr dem der Kapillaren. Vereinzelt treten bereits glatte Muskelzellen auf (Abb. 2.28).

Perforansvenen, Vv. perforantes

Vorkommen und Bedeutung. Perforansvenen kommen vor allem an den Extremitäten vor. Sie verbessern die Kommunikation des oberflächlichen mit dem tiefen Venensystem. Dabei fließt das Blut von epifaszial in die durch die Muskelpumpe (insbesondere an den unteren Extremitäten) geleerten subfaszialen Venen. Die Klappen der Vv. perforantes (sie „perforieren“ die Körperfaszien) unterstützen diesen Blutfluss. Ein Versagen oder Fehlbildungen führen zu einer umgekehrten Blutströmung. Man unterscheidet direkte von indirekten Perforansvenen.

- Bei den **indirekten Perforansvenen** verläuft die Kommunikation der oberflächlichen mit den tiefen Venen über ein kleines, tieferes Epifaszialvenennetz (Abb. 2.29). Die Hauptvenenstämme der Extremitäten (Vv. saphenae magna et parva sowie Vv. basilica et cephalica) perforieren direkt und drainieren in die Begleitvenen der Arterien, sind also selber Perforansvenen.
- Darüber hinaus gibt es im engeren Sinne **direkte Perforansvenen**, insbesondere an den unteren Extremitäten. Sie sind hier mit Eponymen belegt.

Klinik: Für **Varizen** der unteren Extremitäten sind häufig Insuffizienzen der Perforansvenen verantwortlich, in deren Bereich am Unterschenkel nicht selten ein **Ulcus cruris** (Unterschenkelgeschwür) oder Stase-bedingte (stauungsbedingte) Ekzeme (entzündliche Hautveränderungen) auftreten. Insuffiziente Perforansvenen weiten ihre Fasziendurchtrittsstelle auf und sind dann palpatrisch zu diagnostizieren.

Muskelfreie Venen

In Organen mit einem gleichbleibend großen Blutbedarf finden sich Venen ohne Muskelzellen in ihren Wänden.

- Ein Beispiel sind die **Sinus durae matris**, Blutleiter der harten Hirnhaut im Schädel. Ihre starren Wände sichern einen gleichmäßigen Rückstrom des Blutes und verhindern somit Volumenschwankungen.
- Die **Trabekelvenen** der Milz sind ebenfalls nur mit Endothel ausgekleidete Hohlräume in den Bindegewebsbalken der Milz und können daher nicht kollabieren oder einen nennenswerten Widerstand aufbauen. Sie münden in die V. portae hepatis (wichtiger Zusammenhang bei Pfortaderstauungen).

2.3.2.13 Gefäßtypen nach dem Versorgungsmodus

Vasa privata sind Blutgefäße, die sich nur am nutritiven (ernährenden) Kreislauf eines Organs betei-

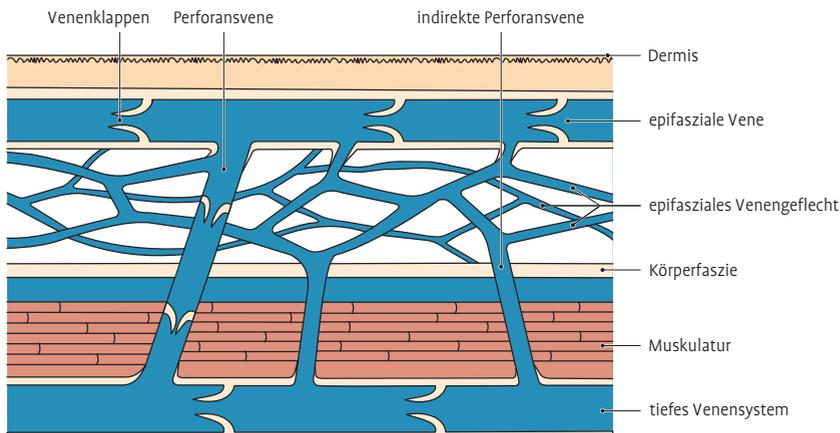


Abb. 2.29 Schema der Verbindung oberflächlicher und tiefer Venen einer Extremität mittels Perforansvenen und epifaszialen Venengeflechts.

ligen (z. B. Bronchialgefäße, Herzkranzgefäße, Leberarterien).

Vasa publica stehen im Dienste des Gesamtorganismus (z. B. Aorta, Vv. cavae, Aa. pulmonales, V. portae hepatis); sie dienen primär nicht der Eigenversorgung eines Organs.

2.3.2.14 Drossel- und Sperrgefäße

Drosselvenen sind kleine Venen, die zirkulär und längs verlaufende Muskelzellen (**Sphinkteren**) besitzen. Sie sind den Venolen nachgeschaltet. Diese Sperrvorrichtungen können durch Kontraktion das Gefäßlumen verengen und damit eine Stauung im Kapillarbett verursachen. Sie befinden sich u. a. in der Nasenschleimhaut, den Lungen, den Speicheldrüsen, endokrinen Drüsen und den Schwellkörpern der Genitalien.

Bei **Sperrarterien** bzw. **Polsterarterien** handelt es sich um kleine Arterien, die dem Kapillargebiet vorgeschaltet sind. Sie besitzen muskuläre Intimalpolster oder in das Lumen vorspringende Muskelzellen und können die Blutzufuhr einschränken oder temporär ganz unterbrechen. Sie sind u. a. in der Haut, Nasenschleimhaut, Speiseröhre, den Bronchien, im Ovar und den Schwellkörpern der Genitalien zu finden.

2.3.2.15 Anastomosen

Anastomosen (gr. ana = zusammen, stoma = Mund) sind **Verbindungen von Gefäßen untereinander**. Sie kommen zwischen arteriellen, venösen und lymphatischen Gefäßen vor und sichern die Zirkulation, wenn einer der Äste zeitweise oder dauernd verlegt ist. Die große Zahl der Anastomosen, insbesondere bei den Venen, erklärt die hohe Variabilität der Blutversorgung. Bei der Entwicklung von Verbindungen bei Gefäßen gleicher Art entsteht die Möglichkeit, dass eine Arterie (oder Vene) das Versorgungsgebiet der anderen übernimmt. Dem operativ tätigen Arzt eröffnet sich die Möglichkeit der Gefäßunterbindung, ohne die Blutversorgung zu gefährden.

Vorkommen. Organe endodermalen Ursprungs weisen häufig ausgeprägte Anastomosierungen ihrer Blutgefäße auf. In Organen und Geweben, die vom Mesoderm abstammen, ist die Ausprägung von Anastomosen wechselnd; entsprechend variieren sie erheblich in ihrer Reaktion auf Ischämien. Ektodermabkömmlinge sind oft von Endarterien

versorgt (keine Anastomosen). Sie sind anfällig für Unterbrechungen der Blutzufuhr.

Arten von Anastomosen:

1. **Arteriovenöse Anastomosen** sind spezielle, lokale Kurzschlussverbindungen zwischen kleinsten Arterien bzw. Arteriolen und Venen bzw. Venolen unter Umgehung des Kapillargebietes. Arteriovenöse Anastomosen dienen der Durchblutungs-, Blutdruck- und Thermoregulation. Während ihre Bedeutung bei Schwellkörpern oder bei der Thermoregulation weitgehend gesichert ist, sind viele dieser regionalspezifischen Vorrichtungen in ihrer Bedeutung noch nicht klar erfasst. Man unterscheidet 2 Arten (Abb. 2.30):

- **Brücken Anastomosen** sind kurze, bündelartige Gefäßverbindungen mit einem arteriellen und venösen Schenkel. In der Tunica media liegen unter dem Endothel modifizierte glatte Muskelzellen. Durch Quellung oder Kontraktion wirken sie als Sperrvorrichtung. Auch können ihnen ringförmig angeordnete Muskelzellen aufliegen. Zumeist werden die Anastomosen durch sympathische Nervenfasern innerviert.

- **Knäuel Anastomosen** (Glomus-Anastomosen) stellen ein Konvolut dickwandiger, gewundener und durch faserreiches Bindegewebe kapselartig eingehüllter Gefäße dar. Typische Knäuel Anastomosen findet man in großer Zahl in der Haut von Akren (besonders der Nase, **Glomerula cutanea**), in Finger- und Zehenspitzen (Glomerula digitalia) sowie an der Steißbeinspitze (Glomerula coccygeum), weiterhin in der Zunge, den Speicheldrüsen, der Schilddrüse und in Schwellkörpern.

2. **Arterielle Anastomosen, Kollateralen.** Es handelt sich um Äste kleinerer Arterien oder Venen, die von einem **Hauptstamm** abgehen und im Allge-

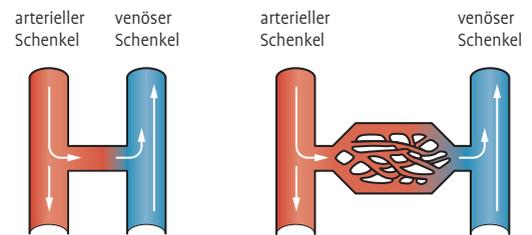


Abb. 2.30 Schematische Darstellung der arteriovenösen Anastomosen. **Links:** Brücken Anastomose. **Rechts:** Knäuel Anastomose. Pfeile: Blutstromrichtung.

meinen die Richtung desselben beibehalten. Sie können, wenn der Hauptstamm verlegt ist, mit anderen Kollateralen oder auch mit rückläufigen Gefäßen zum Hauptstrombett ausgeweitet werden und damit einen Umgehungskreislauf bilden. So entstandene Kollateralkreisläufe spielen für die Prognose von Gefäßverschlüssen und für Gefäßunterbindungen eine wichtige Rolle. Auch **Vasa vasorum** bergen die Möglichkeit der Kollateralisierung des Gefäßes, das sie eigentlich versorgen. Beispiele:

- **Anastomosen größerer Arterienäste** findet man vorwiegend zwischen den Darmarterien (z. B. Riolan-Anastomose, eine Gefäßverbindung der A. mesenterica superior mit der A. mesenterica inferior über Endäste der A. colica media und sinistra), aber auch an den Gliedmaßen (im Bereich der Gelenke), an Hals und Kopf.

- **Kollateralen.** Während einige Organe eine ausgeprägte Eigenversorgung (z. B. Gehirn) haben, sind andere sehr auf die Blutzufuhr anderer Organe angewiesen (z. B. Pankreas). Die Gewährleistung der Gefäßversorgung eines Organs oder Gewebes hängt wesentlich von dem Umfang und der Effizienz kollateraler Zirkulation zwischen den versorgenden Gefäßen ab. Die A. centralis retinae und die Verzweigung der A. mesenterica superior sind Beispiele der 2 möglichen Extreme der Blutversorgung.

Die **Netzhaut** (Retina) wird von einer anatomischen Endarterie versorgt. Ihr endgültiger Verschluss führt zum Absterben der kompletten Retina.

Im Fall der **A. mesenterica superior** wird durch die Darmbewegungen (Peristaltik) ständig die Blutzufuhr einzelner der 10–16 Aufzweigungen unterbrochen, ohne dass das abhängige Kapillargebiet eine Minderung der Durchblutung erfährt. **Arkaden** (bogenförmige Anastomosen) übernehmen durch Kollateralisierung die Versorgung. Allerdings ist die Durchblutung des Darms bei einem Gefäßverschluss der intramuralen Äste insuffizient.

3. **Gefäßnetz, Rete.** Sie bestehen aus kleineren Gefäßen, die zumeist flächenhaft miteinander in Verbindung stehen.

- **Gefäßgeflecht, Plexus vasculosus.** Liegen die Gefäßnetze in mehreren Ebenen oder im dreidimensionalen Raum und stehen diese

untereinander in Verbindung, spricht man von einem Gefäßgeflecht, Plexus vasculosus. Beispiele:

- Die ausgedehntesten Anastomosierungen finden sich an langen tubulären Strukturen (Tuba uterina, Verdauungskanal).

- Bei der Schilddrüse, der Harnblase oder dem Pankreas führt ein umfangreiches arterielles System den Organen Blut zu, wobei die einzelnen Arterien leiterartig miteinander in Verbindung stehen. Eine Unterbrechung einzelner beteiligter Gefäße, auch Hauptgefäße, bleibt folgenfrei. Das Pankreas kann als gutes Beispiel angesehen werden. Kopf (Caput) und Hakenfortsatz (Proc. uncinatus) erhalten Blut aus der oberen und unteren A. pancreaticoduodenalis, Körper (Corpus) und Schwanz (Cauda) werden von den leiterartig verbundenen Aa. splenica (lienalis) und pancreatica magna (aus der A. splenica) versorgt. Das Pankreas ist demnach von einem Netzwerk von Arterien umgeben, welche die Gewebe ihrer unmittelbaren Umgebung versorgen.

- **Wundernetz, Rete mirabile** (frühere Bezeichnung) ist ein Kapillarnetz, welches einem ersten Kapillargebiet nachgeschaltet ist. Die beiden Kapillargebiete sind über eine **Pfortader** miteinander verbunden.

- **Arterielle Wundernetze** finden sich beispielsweise in den Nieren an jedem Nephron (Glomerulum und peritubuläres Kapillargebiet im Nierenmark; Pfortader ist das Vas efferens).

- Ein **venöses Wundernetz** ist das dem Darmkapillargebiet nachgeschaltete Gefäßbett in der Leber (Pfortader ist die Vena portae). Andere wichtige Beispiele sind das hypothalamo-hypophysäre System und das Knochenmark.

- **Venöse Anastomose.** Besonders zahlreich und vielgestaltig sind die Anastomosen zwischen den größeren Venenästen. Sie haben eine große praktische Bedeutung. Bei den paarigen Begleitvenen der Arterien sind die Anastomosen häufig so zahlreich, dass die Arterien von einem Venennetz umgeben sind.

Klinik: Die Verbindung zwischen arteriellen und venösen Blutgefäßen bzw. Gefäßsystemen (z. B. zwischen großem und kleinem Kreislauf)

bezeichnet man auch als **Shunt**. **1. Physiologisch** finden sich z. B. pulmonale arteriovenöse Anastomosen (1. über Bronchialvenen, 2. alveolär über das Kapillargebiet wenig belüfteter Lungenbezirke und 3. extraalveolär über die Vv. cardiaca minima). Dabei gelangt venöses Blut in den großen Kreislauf. **2. Pathologische Shunts** dagegen finden sich z. B. bei angeborenen Herzfehlern (in Abhängigkeit von den Druckverhältnissen in den Herzkammern als Links-Rechts-, Rechts-Links-Shunt bzw. vorübergehend als Pendelshunt), als arteriovenöse Fistel sowie bei arteriovenösem Aneurysma. **3. Iatrogene Shunts**. Operativ werden Shunts z. B. zur Hämodialyse angelegt oder in der palliativen Therapie zur Umgehung von Stauungsgebieten (z. B. bei Leberzirrhose).

gegen können sich die Kollateralen aufweiten (ein bekanntes Beispiel dafür sind Verschlüsse des **Circulus arteriosus Willisii** an der Hirnbasis, welcher allerdings nur in 35 % der Fälle vollständig ausgeprägt ist).

Klinik: Ist eine Endarterie verschlossen, kann das zugehörige Gewebe nicht mehr versorgt werden. Es entsteht eine Gewebsnekrose (**anämischer Infarkt**). In der Milz liegt das Prinzip einer segmentalen Verteilung der Arterien vor. Schon vor dem Hilum teilt sich das versorgende Gefäß und mehrere Arterienäste (mit korrespondierenden Venen) treten in das Organ ein. Verschluss eines dieser Gefäße führt zu einem keilförmigen Infarkt, d. h., das Stromgebiet der Milz ist in distinkte vaskuläre Kompartimente aufgeteilt.

2.3.2.16 Anatomische und funktionelle Endgefäße

Endarterien. Dabei handelt es sich um baumartig verzweigte Gefäße, die keine präkapillären Anastomosen haben (Abb. 2.31). Sie versorgen alleine ein Kapillargebiet. Anatomische Endarterien (letzte Arterie vor dem abhängigen Kapillargebiet) kommen u. a. in Gehirn, Milz, Niere, Schilddrüse und Netzhaut des Auges vor.

Funktionelle Endarterien (Abb. 2.31). Bei ihnen sind Anastomosen in der Endstrombahn vorhanden. Nach plötzlichem Verschluss reicht der Kollateralkreislauf für die Sauerstoffversorgung des betroffenen Bezirkes jedoch nicht aus (z. B. **Koronararterien**); bei einem langsamen Verschluss hin-

2.3.2.17 Vasa vasorum

Vasa vasorum („Gefäß ernärende Gefäße“) entspringen meist von rückläufigen kleineren Ästen der Arterie bzw. der die Vene begleitenden Arterie. Die Wände größerer Gefäße können nicht mehr allein über Diffusion aus ihrem Gefäßlumen versorgt werden. Bei den hohen Flussraten ist ein Stoffaustausch auch nicht vorgesehen. Dieser gewährleistet in einem gesunden großen Gefäß noch die Ernährung der Intima und einer mehr oder weniger großen Schicht der Media.

Die Tiefe des Vordringens der Vasa vasorum von außen gegen das Lumen hängt von der Gesamtwandstärke des zu ernährenden Gefäßes ab. Zum einen ist die Diffusionstrecke begrenzend,

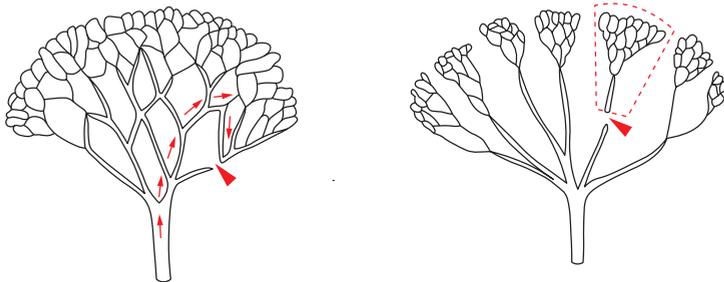


Abb. 2.31 Arteriellen Endstrombahn. **Links:** Endstrombahn mit zahlreichen Anastomosen. Nach einem Gefäßverschluss (Pfeilspitze) ist ein Umgehungskreislauf möglich (Pfeile), dagegen nicht bei „funktionellen Endarterien“

(rechts). **Rechts:** Endarterien ohne Anastomosen. Bei Verschluss einer Endarterie (Pfeilspitze) entsteht entsprechend dem Aufzweigungsgebiet ein keilförmiger Gewebsuntergang (Infarkt), gestrichelt umrandetes Feld.

also der Teil, der noch vom Lumen aus ernährt werden kann. Zum anderen muss der intravasale Druck (des zu ernährenden Gefäßes) von dem Druck in den ernährenden Kapillaren überwunden werden. In den Lungenarterien dringen beispielsweise die ernährenden Gefäße weiter gegen die Intima vor. Es ergibt sich, dass sowohl eine Hypertonie als auch arteriosklerotische Intimaverdickungen eine für die Gefäßwandversorgung kritische Situation hervorrufen können. Zu den Vasa vasorum gehören auch Lymphgefäße.

2.3.3 Übersicht über die großen Arterienstämme

Die verschiedenen **diagnostischen Verfahren** zur Angiologie und nicht zuletzt die Ansätze zu mikrotherapeutischen intravasalen Therapieverfahren machen ein zunehmend größeres anatomisches Detailwissen erforderlich, um diagnostische Ergebnisse interpretieren und therapeutische Möglichkeiten erkennen zu können. Dabei darf die klare Vorstellung von dem Plan und die Übersicht über die Ordnung, nach der das Gefäßsystem arrangiert ist, nicht verloren gehen.

2.3.3.1 Körperkreislauf

Alle Gefäße des Körperkreislaufes werden aus der Aorta gespeist.

Anteile der Aorta

Das arterielle Blut wird über die Äste der zentralen großen Körperschlagader, Aorta, in den Körper befördert. Sie geht aus der linken Herzkammer hervor. Zunächst steigt ein als **Pars ascendens aortae** (Aorta ascendens) bezeichneter Abschnitt aufwärts, wendet sich dann spazierstockartig im Bogen (**Arcus aortae**) nach dorsal vor die (im Alter links der) Wirbelsäule etwa in Höhe des 3.–4. Brustwirbelkörpers bzw. 2. (sternalen) Rippenansatzes (Oberkante). Danach zieht sie als **Pars descendens aortae** (Aorta descendens) nahezu geradlinig abwärts bis zum 4. Lendenwirbel. Die an dieser Stelle stark vergrößerten Segmentalarterien (Aa. iliacae communes) erwecken den Eindruck einer Gabelung (**Bifurcatio aortae**). Diese beiden großen Äste versorgen die unteren Gliedmaßen und das Becken. Der verbleibende Endast der Aorta zieht als **A. sacralis mediana** vor dem Kreuzbein abwärts.

1. **Aorta ascendens, Pars ascendens aortae** (s. Kap. 5.1.4.2). Sie gibt die beiden Koronararterien für die Versorgung des Herzmuskels ab:
 - A. coronaria dextra
 - A. coronaria sinistra
2. **Aortenbogen. Arcus aortae** (s. Kap. 5.1.4.2). Vom Aortenbogen entspringen 3 große Arterienstämme:
 - der **Truncus brachiocephalicus** für die Versorgung des rechten Arms, z. T. der Brustwand und der rechten Hals- und Kopfhälfte. Er teilt sich in die **A. carotis communis dextra** und die **A. subclavia dextra**
 - die **A. carotis communis sinistra** für die linke Hals- und Kopfhälfte und
 - die **A. subclavia sinistra** für den linken Arm und z. T. die Brustwand.
3. **Kopfarterien.** (s. Kap. 6.13.1). Die **A. carotis communis** teilt sich wie auch auf der linken Seite in die **A. carotis externa** und die **A. carotis interna** für die anteilige Versorgung von Kopf, Hals und den entsprechenden Eingeweiden.
4. **Armarterien** (s. Kap. 4.3.4.1). Die beiderseits zum Arm ziehende **A. subclavia** setzt sich in die **A. axillaris** fort, die durch die Achselhöhle verläuft und in die **A. brachialis** des Oberarmes übergeht. Sie gibt zur Oberarmrückseite die **A. profunda brachii** ab. In der Ellenbeuge wurde die A. brachialis früher **A. cubitalis** genannt. Sie gabelt sich hier in die an der Speichen-(Radius-)Seite des Unterarms verlaufende **A. radialis** und die an der Ellen-(Ulna-)Seite verlaufende **A. ulnaris** auf. In der Handfläche kommunizieren die beiden Arterien wieder über den oberflächlichen und den tiefen arteriellen Hohlhandbogen, **Arcus palmaris superficialis** und **profundus**. Über diese doppelte Anastomose wird auch bei Greifarbeit die sichere Versorgung der Finger gewährleistet (s. Kap. 4.3.4.2 und Kap. 4.3.4.3).
5. **Brustschlagader, Aorta thoracica, Pars thoracica aortae** (s. Kap. 5.1.4.2). Der Brustteil der Pars descendens aortae (Aorta thoracica – oberhalb des Zwerchfells) gibt als parietale Äste
 - die paarigen **Aa. intercostales posteriores III–XI**
 - **Aa. subcostales**
 - **Aa. phrenicae superiores** für die Versorgung der Brustwand (z. T. Rücken, Wirbelkanal) und des Zwerchfells sowie als viszerale Abgänge

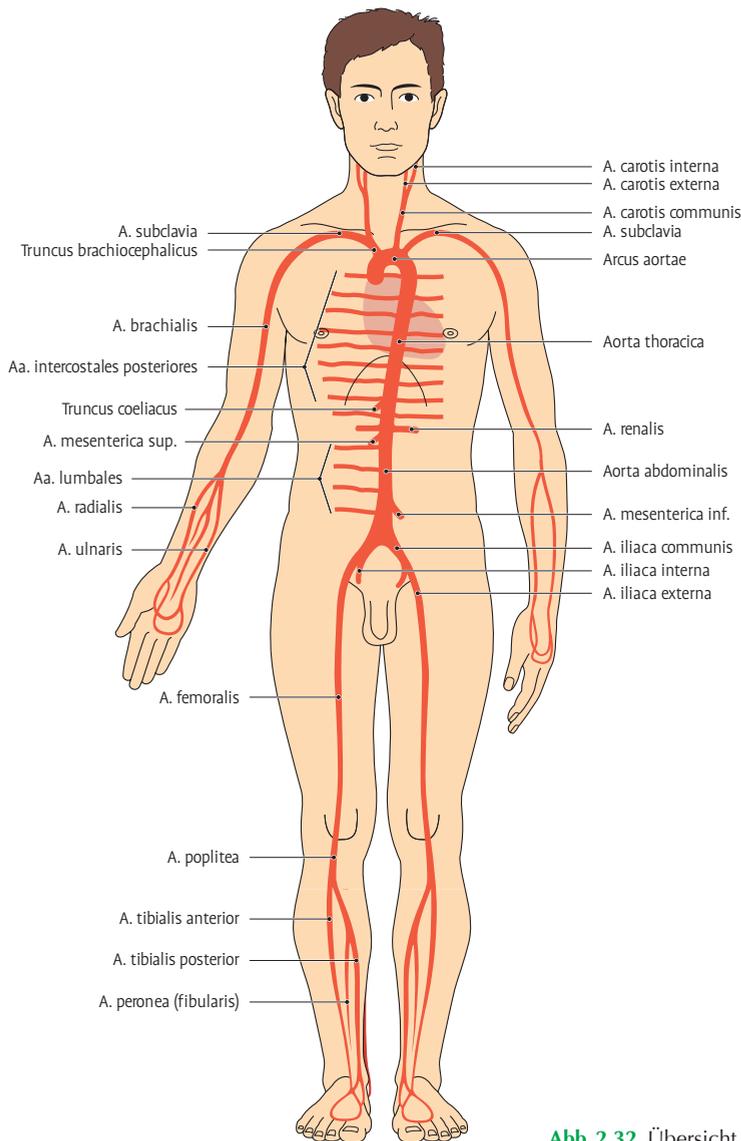


Abb.2.32 Übersicht über die großen Körperarterien.

- die Rr. bronchiales
 - Rr. oesophageales
 - Rr. mediastinales und
 - Rr. pericardiaci
- für Lungen, Speiseröhre, hinteres Mediastinum und Herzbeutel ab. Sie geht im Zwerchfellschlitz, Hiatus aorticus, in den Bauchteil, Pars abdominalis aortae der Pars descendens aortae, über.
6. **Bauchschlagader, Pars abdominalis aortae** (s. Kap.5.2.4.5). Dieser Bauchteil entsendet als parietale (paarige) Äste

- die **Aa. phrenicae inferiores** und
 - die 4 **Aa. lumbales** für die Versorgung von Zwerchfell, Rumpfwand, z. T. Rücken und Wirbelkanal. Viszerale Gefäßabgänge sind
 - die **Aa. suprarenales mediae** zu den Nebennieren,
 - die **Aa. renales** zu den Nieren (und Nebennieren) und
 - die **Aa. testiculares sive ovaricae** zu den Keimdrüsen.
- Schließlich gibt der Bauchteil der Aorta noch 3 große unpaare Eingeweideäste nach ventral ab:

- den **Truncus coeliacus** (Tripus Halleri) mit den Hauptaufzweigungen **A. gastrica sinistra**, **A. hepatica communis** und **A. lienalis** (A. splenica) für den Magen, die obere Hälfte des Zwölffingerdarmes, die Leber, Milz und die Bauchspeicheldrüse,
 - die **A. mesenterica superior** folgt unmittelbar darunter für die Versorgung von Dünndarm, Blinddarm mit Wurmfortsatz, aufsteigendem und queren Teil des Dickdarms (bis zur Flexura coli sinistra),
 - die **A. mesenterica inferior** für den restlichen Teil des Dickdarms und z. T. des Mastdarms.
7. **Bifurcatio aortae** (s. Kap. 5.2.4.5). Die **Aa. iliacae communes** teilen sich beiderseits jeweils vor dem Kreuzbein-Darmbein-Gelenk in die **Aa. iliacae externae** und **internae**. Die Letzteren ziehen ins kleine Becken, versorgen die Beckeneingeweide, das Gesäß, den Beckenboden und Teile des Oberschenkels. Jede A. iliaca externa versorgt mit Ästen die Bauchwand (und Hodenhüllen) und geht unter dem Leistenband durch die Lacuna vasorum in die Oberschenkelarterie, **A. femoralis**, über.
8. **Beinarterien** (s. Kap. 4.4.4). Die **A. femoralis** entsendet die **A. femoris profunda** auf die Oberschenkelrückseite, verläuft dann an der ventralen und medialen Seite des Oberschenkels und gelangt schließlich als **A. poplitea** zur Kniekehle. Hier gabelt sie sich in die Schienbeinarterien, **Aa. tibialis anterior** und **posterior**, auf. Die Letztere entsendet noch die **A. peronea** (**A. fibularis**). Die beiden Aa. tibiales teilen sich nochmals auf bzw. unter dem Fuß jeweils in 2 Äste, die weiter distal wieder über Arterienbögen miteinander Verbindung aufnehmen

2.3.3.2 Lungenkreislauf

Aus der rechten Herzkammer geht die Lungenschlagader, **Truncus pulmonalis**, hervor und zweigt sich unter dem Aortenbogen in die rechte und linke Lungenarterie, **Aa. pulmonales dextra und sinistra**, auf (s. Kap. 5.1.4.2).

2.3.4 Kurze Übersicht über die großen Venenstämme

2.3.4.1 Körperven

1. **Hohlvenen, Vv. cavae**. Das venöse Blut wird aus dem Körperkreislauf über die obere Hohlvene, **V. cava superior**, und die untere Hohlvene, **V. cava inferior**, zum rechten Vorhof des Herzens befördert.
 - **V. cava superior** (s. Kap. 5.1.4.2). Das von Kopf und Hals (**V. jugularis interna**) und der oberen Extremität (**V. subclavia**, aus der **V. axillaris**) zurückströmende Blut sammelt sich beiderseits zu der Arm-Kopf-Vene, **V. brachiocephalica**. Im Bereich dieses Zusammenflusses (Venenwinkel) leitet links der Ductus thoracicus und rechts der kurze Ductus lymphaticus dexter (Ductus thoracicus dexter) die Lymphe dem Blut zu. Die rechte und die längere linke V. brachiocephalica vereinigen sich hinter der rechten 1. Sterno-kostalverbindung zu der rechts gelegenen **V. cava superior**.
 - **V. cava inferior** (s. Kap. 5.2.4.5). Das Blut der unteren Extremität fließt durch die Oberschenkelvene, **V. femoralis**, aus der Kniekehlenvene, **V. poplitea**, kommend, deren Zuflüsse die Venen des Unterschenkels, **Vv. tibiales anteriores, posteriores** und **peroneae** sind, in die **V. iliaca externa**. Von der Oberfläche leitet die **V. saphena parva** Blut in die V. poplitea und die lange **V. saphena magna** drainiert am sog. **Venenstern** in die V. femoralis. Die V. iliaca externa vereinigt sich mit der aus dem Becken kommenden **V. iliaca interna** zur **V. iliaca communis**. Die beiden Vv. iliacae communes fließen rechts vor der Wirbelsäule zwischen dem 4. und 5. Lendenwirbel zur V. cava inferior zusammen. Letztere nimmt
 - die segmentalen Venen der Bauchwand, Vv. lumbales III, IV,
 - die Venen des Zwerchfells, Vv. phrenicae und
 - die der paarigen Bauchorgane, V. renalis dextra und sinistra,
 - V. suprarenalis dextra,
 - V. testicularis sive ovarica dextra, auf. (Die linke V. suprarenalis und die linke V. testicularis sive ovarica fließen in die V. renalis sinistra).
2. **Pfortader, V. portae** (s. Kap. 5.2.2.3). Das Blut der **unpaaren Bauchorgane** (Magen-Darm-Kanal, Milz, Bauchspeicheldrüse) wird durch die Pfortader, **V. portae hepatis**, der Leber zugeführt. Nach der Passage der Leber fließt es durch 2–4 kurze Lebervenen, **Vv. hepaticae**, ebenfalls in die V. cava inferior.

3. **Längsvenensystem, Azygossystem** (s. Kap. 5.1.4.2). Parallel zur unteren Hohlvene sammeln die **Vv. lumbales ascendentes** Blut vorzugsweise der hinteren Bauchwand. Diese setzen sich nach Durchtritt durch das Zwerchfell rechts in die **V. azygos** und links in die **V. hemiazygos** fort. Die V. azygos nimmt die V. hemiazygos auf, bevor sie in die obere Hohlvene mündet.
4. **Herzvenen, Vv. coronaria**. Aus der Herzwand wird das Blut von den Herzvenen über den **Sinus coronarius** direkt dem rechten Vorhof des Herzens zugeführt (s. Kap. 5.1.4.1).

2.3.4.2 Lungenvenen

Aus dem Lungenhilum treten jederseits die Lungenvenen, **Vv. pulmonales**, aus. Der Zufluss zum linken Vorhof des Herzens ist paarig, wobei sich der Vorhof unterschiedlich weit auf die Lungenvene ausdehnen kann. Damit sind von 2 bis 16 einzelnen Einmündungen (zumeist 4) alle Varianten möglich (s. Kap. 5.1.3.6).

2.3.5 Immunkompetente Organe, lymphatisches Gewebe

2.3.5.1 Lymphknoten, Nodus lymphoideus (Lymphonodus)

Lymphknoten sind durch eine deutliche **Kapsel** aus straffem kollagenem Bindegewebe abgegrenzt und damit nicht mit Lymphozytenanhäufungen in Geweben zu verwechseln; sie sind in den **Lymphstrom** eingeschaltet.

Funktion:

- Lymphknoten sind Filter für Fremd- (z. B. Kohlenstaub aus der Lunge) und Schadstoffe (Bakterien, Krebszellen).
- Sie haben Speicherfunktion für verschiedene Stoffe.
- Ag-Stimulation immunkompetenter Zellen: B-, T-Lymphozyten differenzieren sich zu immunologischen Effektorzellen. B-Lymphozyten – Plasmazellen – humorale Immunantwort. T-Lymphozyten – Killerzellen – zellvermittelte Immunantwort.

Strukturelle Erfordernisse zur Erfüllung dieser Funktionen sind:

- organhafte Abgrenzung durch eine Kapsel

- große innere Oberfläche durch ein Schwammwerk von Lymphbahnen, durch das der Lymphstrom träge sickert
- lymphatisches Gewebe mit B-, T-Zellregionen, Makrophagen.

Aufbau

Wir unterscheiden am Lymphknoten: **1. Kapsel**, **2. Parenchym**, bestehend aus Rinde und Mark (Abb. 2.33).

Kapsel. Kollagenes Bindegewebe, das den Lymphknoten begrenzt und Ansatz für die Verankerung bietet. Von ihr und vom Hilum aus zweigen in das Innere Bälkchen (Trabekel) ab, die ein dreidimensionales Stützgerüst schaffen. In den Trabekeln verlaufen die am Hilum eintretenden größeren Blutgefäße.

Parenchym. Es besteht aus retikulärem Bindegewebe mit Retikulumzellen, Retikulinfasern und eingelagerten Lymphozyten, aktives Gewebe.

1. Rinde. Sie unterlagert die Kapsel und fehlt im Hilum: verdichtetes retikuläres Bindegewebe, dichtere Lagerung lymphoider Zellen. Unterteilung in äußere, innere Rinde.

- **Äußere Rinde.** Lymphozytenhaufen = Primärfollikel; nach Ag-Kontakt Sekundärfollikel mit 1. dunklem Rand kleiner Lymphozyten, 2. hellem Zentrum (= Keimzentrum). Dieses Reaktionszentrum (Keimzentrum) ist morphologisches Zeichen einer ablaufenden B-Zell-Immunreaktion. Die Follikel repräsentieren die B-Zellregion des Lymphknotens.

- **Innere Rinde, parakortikale Zone.** Sie liegt interfollikulär zwischen den Follikeln und dem Mark. T-Lymphozyten-Ansiedlung = T-Zellregion des Lymphknotens. Typisch für diesen Rindenabschnitt sind die postkapillären Venulen, deren kubisches Endothel infolge besonderer Oberflächenmoleküle Lymphozyten aus dem Blutkreislauf wieder in den Lymphknoten zurückkehren lässt, also eine Rezirkulation erlaubt.

2. Mark. Markstränge bilden ein dreidimensionales Netzwerk. Sie gehen aus der Rinde hervor und enden frei im Hilum. Das Mark erscheint aufgelockert, da sich zwischen den Strängen weite Marksinus befinden. Die Markstränge enthalten Retikulumzellen, Retikulinfasern, Makrophagen, Plasmazellen.

3. Blutversorgung der Lymphknoten. Sie erfolgt über die am Hilum eintretende Arterie. Alle Anteile sind gut vaskularisiert. Das Blut fließt über die am Hilum austretende Vene ab. Individuelle Strukturvarianten sind abhängig von Re-

gion, Alter, Geschlecht, Lebensweise, Ernährung, Gesundheitszustand.

Lymphweg

Die Lymphe nimmt folgenden **Weg**: Vasa afferentia, Lymphsinus: Randsinus (Marginalsinus), Intermediärsinus, Marksinus, Vasa efferentia.

Vasa afferentia. Viele Lymphgefäße treten an der Konvexität des Lymphknotens ein. Zahlreiche Klappen regulieren die Stromrichtung.

Lymphsinus. Lymphräume, deren Wand von spezialisierten Retikulumzellen gebildet wird, die als Uferzellen zur Phagozytose befähigt sind (im Gegensatz zu den üblichen Endothelzellen). In ihren Verband sind Makrophagen und Plasmazellen eingeschaltet. Die Auskleidung ist lückenhaft, es fehlt eine Basalmembran.

- **Randsinus.** Der Marginalsinus ist ein von Retikulumzellen durchzogener Spaltraum zwischen Kapsel und Rinde, in den die afferenten Lymphgefäße einmünden.

- **Intermediärsinus.** Dünne Lymphgänge zwischen den Follikeln, durch die Rand- und Marksinus verbunden werden.

- **Marksinus.** Lymphräume zwischen den Marksträngen. Fortsätze der Uferzellen durchqueren das Lumen und bilden ein Schwammwerk: freier Kontakt der Lymphe zu Zellen der Markstränge (Makrophagen, phagozytierende Retikulum-, Plasmazellen).

Vasa efferentia. Wenige abführende Lymphgefäße verlassen am Hilum den Lymphknoten: Konvergenz des Lymphstromes. Gefäßklappen lassen den Lymphstrom nur in efferenter Richtung zu.

Histophysiologie

Lymphe kann **Fremdstoffe (Antigene)** enthalten, z. B. nach einer Infektion: Vergrößerung der Reaktionszentren der Sekundärfollikel, Vermehrung der B-Lymphozyten unter Mitwirkung von T-Helferzellen, Lymphoblasten. Damit sind B-Zellreifung und Bildung von B-Gedächtniszellen eingeleitet. Viele sterben ab und werden phagozytiert.

Plasmazellen entstehen erst bei Wanderung der Lymphoblasten in die Markstränge. Ort der Auslö-

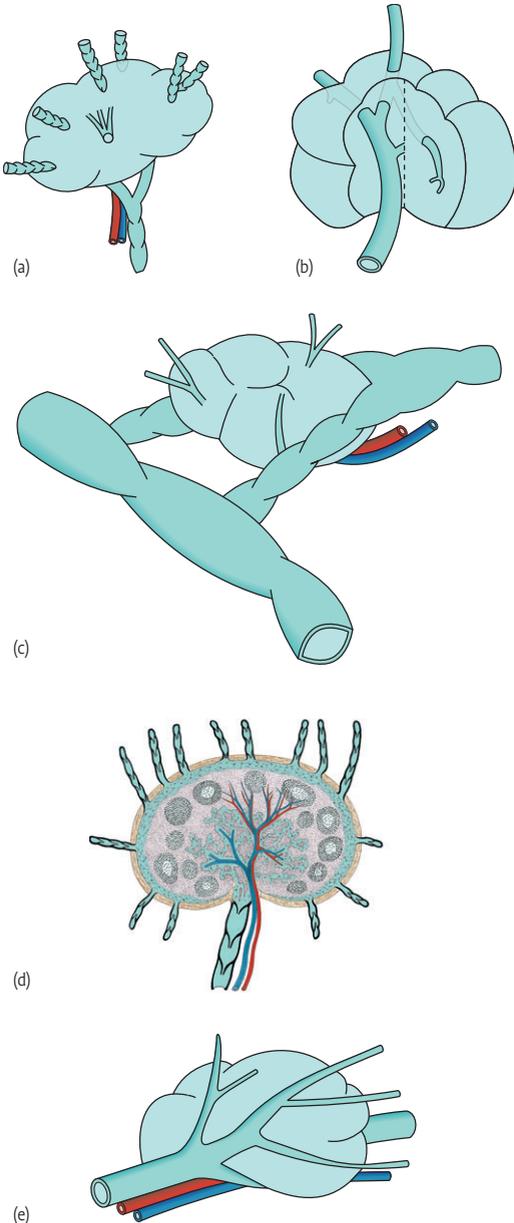


Abb. 2.33 Schema verschiedener Lymphknotentypen. **a:** Typ Ia, **b:** Typ II, **c:** Typ III, **e:** Typ Ib. **d:** Schematische Darstellung eines Lymphknotens.

sung des Immungeschehens und Ort der Abgabe von Immunglobulinen sind getrennt.

Die **Stimulierung** der T-Zellregion führt zur Vermehrung der T-Zellen in der parakortikalen Region, größere Lymphoblasten, aus denen hervorgehen: Killer-, T-Helfer-, T-Suppressor-, T-Gedächtniszellen.

Klinik: Regionäre Lymphknoten. Durch Konvergenz des Lymphstromes wird die Lymphe regionalen Lymphknotengruppen zugeführt. Diese reagieren bei **Entzündungen** oder **bösartigen Tumoren** als Erste. Ihre Kenntnis ist für Diagnostik, Therapie und Prognosebeurteilung essenziell.

2.3.6 Lymphgefäße, Saugadern, Vasa lymphatica (lymphoidea)

Das **nicht ins Blut reabsorbierte Filtrat** der Blutkapillaren wird in die **Lymphkapillaren** aufgenommen und über **Lymphkolektoren** den prä- und den postnodären **Lymphgefäßen**, dann weiter den **Lymphstämmen** (Trunci) und schließlich dem **Ductus thoracicus** bzw. dem **Ductus lymphaticus dexter** zugeführt.

2.3.6.1 Einteilung der Lymphgefäße

Lymphkapillaren. Sie beginnen als geschlossene **Sacculi** im Gewebe und sind mit dachziegelartig angeordneten Endothelzellen ausgekleidete Hohlrohre. Diese klappenfreien Gefäße sind gewöhnlich weiter als die Blutkapillaren und bilden ausgeprägtere weitmaschige **Netze**. Druckschwankungen in den Geweben bewirken einen Nettoeinstrom durch die Spalten zwischen den Endothelzellen. Im Gegensatz zu Blutkapillaren gibt es keine Basalmembran und keine Fenestrierung.

- Lymphkapillaren fehlen im Zentralnervensystem (wahrscheinlich), in Epithelien und im Knochenmark.
- Milz, Leber, Plazenta und Muskulatur enthalten Lymphkapillaren nur in ihren kollagenbindegewebigen Anteilen.
- Lymphkapillaren drainieren in lymphatische Sammelgefäße.

Lymphatische Sammelgefäße, Lymphkolektoren. Es handelt sich um dünnwandige Gefäße mit zahl-

reichen Klappen (im Abstand von 2–3 mm). Ihr Verlauf ist unabhängig von den Blutgefäßen und für jedes Organ charakteristisch. Anastomosen sind häufig.

Die kleineren Gefäße haben 2 Schichten: eine innere aus Endothel und longitudinalen elastischen Fasern und eine äußere mit longitudinal ausgerichtetem elastischem Bindegewebe.

Die größeren Lymphgefäße haben zusätzlich zwischen diesen beiden Schichten zirkuläre glatte Muskulatur, die zur Autokontraktion befähigt ist.

Lymphstämmen, Transportgefäße, Trunci lymphatici. Sie besitzen eine Tunica media, in der sich spiralförmig angeordnete glatte Muskelzellen befinden.

2.3.6.2 Lymphfluss

Die Lymphe des Körpers wird dem **Ductus thoracicus** zugeleitet und im Bereich des Venenzusammenflusses (Venenwinkels) von V. subclavia sinistra und V. jugularis interna sinistra dem Blut zugeführt. Lediglich der rechte Thorax, Arm und die rechte Kopfhälfte drainieren in den kleineren **Ductus lymphaticus dexter**.

Lymphabfluss der Körperregionen. Er ist durch die Gruppierung der Lymphknoten hierarchisch gegliedert und fließt in Richtung auf den Venenwinkel der unteren Halsgegend zu.

- Von den zu den einzelnen Organen gehörenden **Lymphkapillaren** wird interstitielle Gewebeflüssigkeit zu den regionären Lymphknoten geleitet.
- Deren **Vasa efferentia** sammeln die Lymphe aus größeren Einzugsgebieten, um schließlich abzufließen
- in die **großen Trunci**, welche die Flüssigkeit wieder dem venösen Blut zuführen. Bevor die Lymphe des Armes beispielsweise in den **Truncus subclavius** fließt, hat sie in der Axilla 4–5 hintereinandergeschaltete Filterstationen passiert und sich dabei mit Anteilen der Lymphe der Brustwand vereinigt.

Alle lymphatischen Sammelgefäße entleeren sich in einen der 8 großen Trunci. Während die großen Lymphgefäße der Extremitäten oberflächennah verlaufen und daher bei operativen Zugängen berücksichtigt werden müssen, begleiten die großen Stämme die Blutgefäße zentripetal.

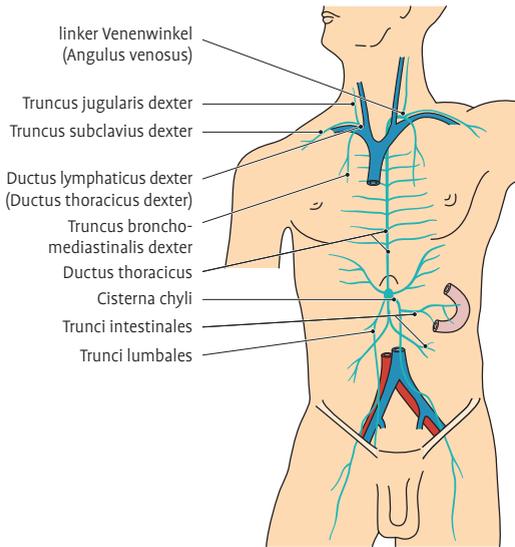


Abb. 2.34 Lymphgefäße des Rumpfes (aus G.-H. Schumacher).

Ductus thoracicus. Das zentrale und größte Lymphgefäß, welches die meisten anderen Stämme aufnimmt, ist der Ductus thoracicus. Ihm fließt über 6 Trunci die gesamte Lymphe unterhalb des Zwerchfells und die gesamte Lymphe der linken Körperhälfte zu. Weitere 4 Trunci bilden für das rechte obere Körperviertel den sehr viel kürzeren **Ductus lymphaticus dexter** (Abb. 2.34).

Lymphpumpe. Die Lymphe wird durch die kontraktile Tätigkeit der **glatten Muskulatur** der Lymphgefäße aktiv gegen einen Druckgradienten zwischen Interstitium und Blut befördert. Die Lymphflussrichtung wird durch zahlreiche **Klappen** bedingt. Für die spontane Erregung (Depolarisation), die sich entlang der Lymphgefäße in beide Richtungen ausbreitet, sind eigene **Schrittmacher** verantwortlich, die ganze Regionen koordinieren. Die Frequenz der Schrittmacher ist u. a. Kalzium-abhängig. Neben mechanischen Faktoren (Druck und Dehnung) regulieren neurale und humorale Mediatoren direkt oder indirekt die Spontankontraktionen.

Klinik: 1. Das Ausmaß der Bildung neuer Lymphbahnen nach Durchtrennung ist umstritten. Dennoch entsteht relativ selten ein posttraumatisches oder postoperativ lang anhaltendes **Lymphödem** (von radikalen Lymphknotenent-

fernungen abgesehen). Wesentlich ist eine vermehrte Kollateralisierung und kompensatorische Leistungssteigerung der verbleibenden Lymphbahnen. **2.** Bestimmte **Filarien** (Fadenwürmer) besiedeln bevorzugt Lymphbahnen und führen als Abflusshindernis zu teilweise monströsen Ödemen (**Elephantiasis**). **3.** Bei einer **Lymphangitis** kommt es zu einer Entzündung der Lymphgefäße infolge einer Infektion. Dabei erscheinen die subkutanen Lymphbahnen als rote Streifen unter der Haut. **4. Lymphangiome** sind zumeist gutartige neoplastische Bildungen von Lymphkapillaren. Verschiedene andere primäre und sekundäre Bildungsstörungen des Lymphgefäßsystems sind beschrieben. **5.** Die **Enteropathia lymphoangioectatica** ist eine angeborene zystische Erweiterung der Lymphgefäße in der Darmschleimhaut mit der Konsequenz enteraler Verluste von Proteinen. Sie ist von weiteren kongenitalen Fehlbildungen des lymphatischen Systems begleitet.

Gefäße im Einzelnen und ihre Topografie (Abb. 2.34):

- **Cisterna chyli.** Bei ca. 20% aller Menschen findet sich am Beginn des Ductus thoracicus in Höhe zwischen Th12 und L3 eine Dilatation (**Cisterna chyli**). Typischerweise liegt sie dorsal der unteren Hohlvene oder der Aorta.
- In die Cisterna chyli münden der **Truncus intestinalis** (es können auch mehrere sein) aus dem Darm sowie die **Trunci lumbales dexter** und **sinister** aus dem Beckenbereich und den unteren Extremitäten.
- Der **Ductus thoracicus** (s. Kap. 5.1.4.6) zieht rechts und dorsal von der Aorta durch den Hiatus aorticus, verläuft zunächst rechts von der Mittellinie, neben der Aorta vor der Wirbelsäule aufwärts bis zum 4. Brustwirbel, wendet sich dann allmählich hinter der Speiseröhre nach links und zieht in einem nach oben konvexen Bogen von hinten in die **V. subclavia sinistra** an deren Vereinigungsstelle mit der **V. jugularis interna sinistra** (Venenwinkel = **Angulus venosus**). Durch die Lage der Einmündung kann sich die Lymphflüssigkeit bis zum Herzen in einem großen Blutvolumen verteilen.
- Hier nimmt er von der linken Kopf- und Halshälfte den **Truncus jugularis sinister** und vom linken Arm her den **Truncus subclavius sinister** auf und mündet ampullenartig in den Blutkreislauf.

- Ein **Truncus bronchomediastinalis sinister** (aus der linken Thoraxhälfte) kann vorhanden sein und in den Ductus thoracicus fließen.
- Der **Ductus lymphaticus dexter** mündet entsprechend in den rechten Venenwinkel mit einem kürzeren Gefäß bis zum Herzen.
- Er nimmt den **Truncus subclavius dexter**, **Truncus jugularis dexter** und den **Truncus bronchomediastinalis dexter** auf.

Varianten. Der Ductus thoracicus kann auch doppelt oder vielfach angelegt sein. Die Einmündungsstelle weist erhebliche Variationen auf. Der Ductus kann sich vor der Einmündung nochmals in ein Geflecht aufspalten. Häufig mündet der Ductus in mehreren kleineren Trunci. Die folgenden Trunci münden häufig unabhängig von den Ductus thoracici im Bereich des Venenwinkels:

- **Truncus jugularis internus**
- **Truncus subclavius**
- **Truncus paratracheobronchialis** und/oder
- **Truncus mediastinalis** (anterior).

Es gibt 2 zusätzliche Trunci, die direkt in die tiefen Halsvenen münden können:

- **Truncus transversus cervicalis** und
- **Truncus mammarius internus.**

Neben dem **Venenwinkel** kann auch die **Vena brachiocephalica** Einmündungsstelle sein. Im Grunde handelt es sich eher um eine Gegend für mögliche Einmündungen. Eine Kreuzung des Ductus thoracicus nach rechts ist seltener.

2.3.6.3 Mandeln, Tonsillen

Die Tonsillen sind Organe aus lymphoepithelialelem Gewebe, die um den **Isthmus faucium** (Schlundeingang) und die **Choanen** (hintere Nasenöffnung) angeordnet sind. Daneben gibt es diffus verteiltes lymphatisches Gewebe in der gesamten Rachenschleimhaut und im weichen Gaumen (s. Kap. 6.14.2.5)

2.3.6.4 Bries, Thymus

Der Thymus ist ein pseudolobuläres Organ mit Rinde und Mark. Dieses Organ nennt man lymphoepithelial wegen seiner entodermalen epithelialen Anteile aus den Schlundtaschen (s. Kap. 5.1.4.3).

2.3.6.5 Milz, Lien, Splen

Das Gewebe der Milz wird in rote und weiße Pulpa eingeteilt. Die terminale Strombahn weist

Öffnungen zum Parenchym und Stroma des Organs auf (s. Kap. 5.2.2.1). Die Milz ist im Gegensatz zum Lymphknoten in die Blutbahn eingeschaltet. Somit ist sie für die „Innenabwehr“ von Fremdkörpern im Blut zuständig.

2.3.6.6 Schleimhautassoziiertes Lymphgewebe, Mucosa Associated Lymphatic Tissue (MALT)

Es handelt sich um eine diffuse oder mehr organisierte Anhäufungen von subepithelialelem Lymphgewebe in der **Lamina propria mucosae** von Hohlorganen: Verdauungs-, Respirations-, Urogenitaltrakt. Bei Ag-Stimulation reicht es bis in die Submucosa, Sekundärfollikel mit Reaktionszentren bilden sich.

Das MALT vermittelt den immunologischen Schutz von Schleimhäuten als Ag-exponierte innere Oberfläche. IgA ist sekretorischer Ak in Schleimhautsekreten. Das MALT-System ist in sich funktionell relativ geschlossen. In ihm zirkulieren bevorzugt B-Lymphozyten und ihre Abkömmlinge.

Prädilektionsstellen. Das MALT setzt sich aus 2 wesentlichen Komplexen zusammen.

1. Darmtrakt (**GALT** = Gut Associated Lymphoid Tissue), mit besonders prominenten Strukturen im Sinne von **Folliculi lymphoidei aggregati** im terminalen Ileum (**Peyer-Platten**, Peyer-Plaques) (s. Kap. 5.2.3.3) und in der Appendix vermiformis (Darmtonsille).
2. Bronchialbaum (**BALT** = Bronchial Associated Lymphoid Tissue).

2.3.6.7 Wurmfortsatz, Appendix vermiformis

Rings um das Lumen des Wurmfortsatzes finden sich zahlreiche solitäre Lymphfollikel (s. Kap. 5.2.3.5). Wie die Peyer-Plaques übt die Appendix am Übergang von Dünndarm zu Dickdarm eine Art Wächterfunktion aus über die hier wechselnde bakterielle Besiedelung.

2.4 Nervensystem, Systema nervosum

2.4.1 Einteilung des Nervensystems

Das Nervensystem besteht aus Gehirn, Hirnnerven, Rückenmark, Spinalnerven mit ihren Geflechten und peripheren Nerven, Ganglien,

vegetativen Geflechten und Rezeptoren. Für eine erste Betrachtung des Nervensystems des Menschen bieten sich 3 Ausgangspunkte an: funktionelle Betrachtungsweise, topografische Betrachtungsweise, Orientierung am Bau der Nervenzelle.

Funktionell unterscheidet man einen **somatischen** (animalen) von einem **viszeralen** (**vegetativen**, autonomen) Anteil. Ersterer setzt sich vorzugsweise mit der Umwelt auseinander, Letzterer mit dem Körper. Dabei weist der Begriff **autonom** darauf hin, dass hier vieles nicht der bewussten Kontrolle unterliegt, während der somatische Anteil vor allem der Wahrnehmung und Integration von Reizen und der motorischen Steuerung dient. Die Grenzen zwischen somatisch und viszeral sind teilweise unscharf gefasst.

Topografisch gliedert man in zentrales und peripheres Nervensystem.

1. Als **zentral** gelten Gehirn und Rückenmark.
2. **Peripher** sind die **12 Hirn-(Kopf-)nervenpaare**, die **31 (32) Spinalnervenpaare** und ihre Aufzweigungen sowie die außerhalb von Rückenmark und Gehirn gelegenen Anteile des vegetativen Nervensystems (VNS = Sympathicus, Parasympathicus; ENS = enterisches Nervensystem sowie granuläre und vaskuläre Nervenzellen). Dabei folgen die Spinalnervenpaare einem einheitlichen Aufbau, der die Leitung und Verteilung motorischer Efferenzen, sensorischer Afferenzen und vegetativer Fasern gewährleistet.
3. Die Anteile des zentralen und peripheren Nervensystems, die nicht dem VNS zugeordnet werden, nennt man **oikotropes Nervensystem** (Umwelt-Nervensystem).
4. Die **großen Sinnesorgane** nehmen eine Sonderstellung ein. Für die Einteilung und Orientierung ist es wichtig, sich mit der Embryologie vertraut zu machen.

Bau der Nervenzelle:

1. Das **Neuron** ist die funktionelle Grundeinheit des Nervensystems. Es besteht aus dem **Zellkörper** (Soma, Perikaryon), der den Zellkern enthält, sowie aus **Fortsätzen**. Alle Nervenzellen haben die Fähigkeit, elektrische Erregungen weiterzuleiten.
2. **Nervenzellfortsätze** können **Neuriten** (Axone) oder **Dendriten** sein. Dendriten dienen dem Erregungsempfang, Neuriten der Erregungswei-

tergabe. Je nach ihrer Lage werden sie bei Bündelbildung entweder als **Tractus** (im ZNS), als **Nervus** (im PNS) bzw. als **Spinalnerv** (am Übergang zwischen ZNS und PNS), als **Fasciculus** oder **Truncus** (in Plexus) bezeichnet. Mit **Radix** sind die Wurzelfasern beim Verlassen des Rückenmarks gemeint. Unter **Innervation** versteht man die nervöse Versorgung eines Organs ohne weitere Spezifizierung der Faserqualitäten.

3. **Afferenz, Efferenz.** Je nach Richtung der Erregungsleitung werden Afferenz und Efferenz unterschieden. Eine Afferenz ist zuleitend, eine Efferenz wegleitend. Die Efferenzen des somatischen Nervensystems sind erregend, die des VNS erregend oder hemmend. Bei der Verwendung der Begriffe Afferenz und Efferenz muss unbedingt beachtet werden, ob man sich auf die **makroskopische oder mikroskopische Ebene** bezieht. In der Makroskopie bezeichnet man alles das als efferent, was vom ZNS in die Peripherie Impulse bringt, um dort eine Reaktion auszulösen, und das als afferent, was Informationen dem ZNS zuträgt. In der Mikroskopie ist nicht das ZNS, sondern sein funktionstragender Baustein (das Neuron) Bezugspunkt. Efferent sind die Nervenzellfortsätze, die eine Erregung von dem Zellsoma weggleiten (Axon oder Neurit), und afferent die zuleitenden Fortsätze (Dendriten). Demnach kann beispielsweise das (efferente) Axon einer sensiblen Nervenzelle im Spinalganglion als afferent bezeichnet werden, wenn damit (auf makroskopischer Betrachtungsebene) seine Informationsleitung hin zum Rückenmark gemeint ist.

2.4.2 Grundbegriffe zum Gehirn des Menschen

Hirngewicht. Die **Evolution des Menschen** ist durch eine auffällige Zunahme von Hirnmasse gekennzeichnet. Jedoch hat der Mensch keinesfalls das größte Gehirn. Der Elefant (ca. 5.000 g) oder der Blauwal (ca. 7.000 g) sind dem Menschen (1.200–1.500 g) in dieser Hinsicht weit voraus. Auch den Vergleich des relativen Hirngewichtes (Hirnmasse/Körpergewicht) führt der Mensch nicht an (Blauwal: 0,01–0,02 %, Elefant: 0,1–0,2 %, Mensch: 2–2,5 %, Maus: 2–3 %, Klammeraffe Ateles: 6,6 %). Bei Menschen untereinander ist das Gehirngewicht nur dann vergleichbar, wenn Gleichaltrigkeit vorliegt und das 15. Lebensjahr

vollendet ist. Da ein größerer Teil des Gehirns direkt oder indirekt mit der Motorik befasst ist, besteht eine grobe Korrelation zwischen einer größeren Muskelmasse und einem größeren Gehirn. Die Frau hat dabei ein im Mittel um 100 g leichteres Gehirn als der Mann. Gemessen an der Relation zur Muskelmasse verfügen Frauen im Mittel über das größere Gehirn, d. h., weniger Muskelzellen werden von einer Nervenzelle innerviert (s. Kap. 8.4.7.2). Die Beziehung zwischen einer Nervenzelle und ihren Muskelzellen wird als **motorische Einheit** bezeichnet (s. Kap. 4.1.2.3).

Hirnoberfläche. Die Hirnoberfläche ist beim Menschen bemerkenswert vergrößert (Circa-Werte je Hemisphäre Mensch: 112.500 mm² und im Vergleich: Schimpanse: 40.000 mm², Pferd: 57.000 mm², Elefant: 302.000 mm²). Qualitativ sind die Hirnanteile nur bedingt mit denen der Tiere vergleichbar. Als **Zerebralisationsindex** bezeichnet man den Quotienten aus **Neopallium** (stark entfalteter Hirnabschnitt der Säugetiere) und als ursprünglich angesehenen Hirnanteilen (Mensch: 170, Weißflankendelphin: 121, andere Primaten: 49, Papagei: 27,6, Igel: 0,78).

Graue und weiße Substanz. Man unterscheidet nach der Verteilung der Anteile **graue Substanz** und **Ganglien** (entsprechend den Nervenzellkörpern) sowie **weiße Substanz** und **Fasern** (entsprechend den Nervenzellfortsätzen).

Nervenzellzahl. Die Zahl der Nervenzellen des Menschengehirns werden auf bis zu 10¹¹ geschätzt, der überwiegende Teil davon in der Großhirnrinde. Die überschlagene Größenordnung der synaptischen Verbindungen liegt bei 10¹⁴. Der alters- und belastungsabhängige Verlust soll 10.000 bis 100.000 Nervenzellen pro Tag betragen.

Architektonik. Darunter verstehen wir insbesondere eine Einteilung von Groß- und Kleinhirnrinde nach morphologischen Kriterien. Dazu gehört eine Anordnung von ähnlichen Zelltypen in Schichten. Am ausgedehntesten ist das Prinzip von sechs Schichten von Nervenzellen in der Großhirnrinde, das allerdings im Detail variiert. Eine funktionelle Zuordnung ist nur bedingt möglich. Neben der Gestalt der Nervenzellen (z. B. **Zytoarchitektonik nach Brodmann**) werden Gliazellen (**Glia-Architektonik**) und hier speziell die Myelinisierung (**Myeloarchitektonik**), das Gefäßversorgungsmuster (**Angioarchitektonik**), zytochemische und andere Eigenschaften zur Gliederung herangezogen.

Isokortex, Allokokortex. Die Entstehung der als Isokortex („gleich gebaute Rinde“) bezeichneten Anteile ist ein in mehrere Phasen unterteilter Wachstumsprozess, der zur Bildung des charakteristischen 6-Schichten-Baus führt. Der Isokortex wird auch als **Neokortex** bezeichnet. Demgegenüber ist der Allokokortex („anders gebaute Rinde“) phylogenetisch älter und umfasst nur 5 % der Hirnrinde. Er besteht aus **Archi- und Paläokortex** und geht mit einer Übergangszone (**Mesokortex**) in die phylogenetisch jüngeren Hirnareale über.

Liquorräume. Das sind die Hohlräume des Gehirns (**Ventrikel**) und der Flüssigkeitsraum, in dem das Gehirn schwimmt (**Subarachnoidealraum**). Die Ventrikel dienen einer inneren Stabilisierung des Gehirns („Wasserskelett“). Ihr Vorhandensein ist entwicklungsgeschichtlich begründet. Der Subarachnoidealraum bietet als Flüssigkeitsbett Gehirn und Rückenmark mechanischen Schutz. Die Auftriebskräfte des Liquors dienen zudem der Form-erhaltung des Gehirns (s. Kap. 8.3.3).

Hirnhäute. Sie umgeben das Zentralnervensystem. Sie sind insbesondere durch die Lagebeziehungen zu den äußeren Liquorräumen und den verschiedenen Gefäßen von herausragender klinischer Bedeutung. Es werden 2 weiche Hirnhäute (**Leptomeningen**) unterschieden, die einerseits dem Gehirn (**Pia mater**), andererseits (**Arachnoidea**) der harten Hirnhaut (**Dura mater**) anliegen (s. Kap. 8.3.2).

2.4.3 Funktionelle Systeme des Zentralnervensystems(ZNS)

Die wesentlichen Aufgaben des ZNS sind die **Bildung von Reaktionen** auf innere wie äußere Reize, die **Generierung von Aktionen** (Willensakten) und die **Speicherung von Informationen**.

In der Geschichte der Erforschung des ZNS sind verschiedene Systeme identifiziert worden, denen bestimmte Funktionen zugeordnet wurden. Die häufig genannten sind nachfolgend aufgeführt:

Pyramidalmotorisches System. Es gilt als eine der wichtigsten Leitungsbahnen für die willkürlichen Bewegungsimpulse an die Körpermuskulatur. Sie wirkt hemmend auf die Regulation des Muskeltonus und auf das Zustandekommen der Muskel-eigenreflexe.

Extrapyramidalmotorisches System (EPS). Es besteht aus dem **striären System** (Putamen, Nuclei caudatus, pallidus, subthalamicus und ruber sowie Substantia nigra) und **motorischen Integrationszentren** (Kleinhirn, Thalamusanteile, Formatio reticularis, Nucl. vestibularis und Kortexareale). Sie sind wesentlich für glatte (eingetübte) Bewegungen und Begleitmotorik (Gleichgewichtsaufgaben, affektive Begleitmotorik wie z. B. Mimik). Ein wesentliches Subsystem des EPS ist das **vestibuloze-rebellare System**, das der Gleichgewichtsregulation dient und bei der zeitlichen Koordinierung von Bewegungen beteiligt ist.

Epikritische Sensibilität. Es handelt sich um eine spezifische Oberflächensensibilität, die Informationen über Berührungsreize, Vibrations- und Gelenkempfindungen und deren Diskriminationen und Modulationen umfasst

Protopathische Sensibilität. Sie ist eine unbestimmte, wenig abgrenzbare Oberflächensensibilität, die der Wahrnehmung von Druck, Schmerz- und Temperaturreizen dient sowie von vorwiegend unspezifischen Afferenzen (Jucken) für die Steuerung der allgemeinen Aktivität im **ARAS** (aufsteigendes retikuläres Aktivierungssystem). Epikritische und protopathische Sensibilität können als Exterozeption zusammengefasst werden.

Propriozeption. Sie bestimmt innere Zustände und ermöglicht teilweise deren Bewusstwerdung (Körperpositionen, Kaudruck). Sie wird in dieser Hinsicht der **Exterozeption** (Aufnahme von Reizen aus der Umwelt) gegenübergestellt. Propriozeption im engeren Sinne stellt Informationen über Bewegungen und Stellung des Körpers oder seiner Teile zur Verfügung.

Limbisches System. Ihm gehören vorzugsweise phylogenetisch ältere Hirnanteile an, die als funktionell eng zusammengehörig angesehen werden. Die Funktionen sind allerdings trotz klar definierter Bahnen eher konzeptionell als anatomisch beschrieben (Emotionen wie Euphorie, Furcht, Wohlbefinden, Wertung von Sinneseindrücken, Gedächtnisfunktionen, Triebverhalten).

Hypothalamo-hypophysäres System. Es besteht aus 2 Anteilen, die beide endokrine Steuerungsaufgaben wahrnehmen. Dabei wird der Körper indirekt über nachgeschaltete endokrine Drüsen (via zwischen geschalteter Adenohypophyse) oder direkt (via Neurohypophyse) kontrolliert. **Neurosekretion** findet außerdem im Corpus pineale statt.

Des Weiteren finden sich im Hypothalamus übergeordnete vegetative Steuerungszentren.

Verschiedene Neurotransmittersysteme. Sie sind chemisch durch ihre Botenstoffe für die Erregungsübertragung charakterisiert.

Sinnesorgane. Sie werden auch als funktionelle Systeme gesehen und haben teilweise ihre eigenen Reflexe (Lidschluss, Hinwendbewegungen).

2.4.4 Sinnesorgane, Organa sensuum

Neben den diffus in Haut und den verschiedenen Organen verteilten **Wahrnehmungsaufgaben** sind für einzelne physikalische Einflüsse der Umwelt rezeptive (aufnehmende) Organe besonders entwickelt worden. Diese werden im engeren Sinne als Sinnesorgane zusammengefasst.

1. **Rezeptoren.** Sie sind Empfangs- oder Aufnahmeeinrichtungen für spezifische Reize. Dabei werden die Reize in Signale der Nervenzellen transformiert im Sinne einer Codierung in Aktionspotenziale.
Für die Sensibilität des Körpers sind dies:
 - **Nozizeptoren:** heller und dumpfer Schmerz
 - **Thermozeptoren:** für niedrige und hohe Temperaturen
 - **Mechanozeptoren:** für feinen und groben Druck, Tast- und Berührungssinn, Vibration, Muskelspannung, Bänderspannung (Propriozeption, Tiefensensibilität)
 - **Enterorezeptoren:** Osmo-, Chemo-, Barozeptoren.
2. **Telezeptoren.** Als Telezeptoren bezeichnet man diejenigen Sinnesorgane, die Informationen aufnehmen können, welche nicht unmittelbar mit dem eigenen Körper in Verbindung stehen (z. B. Auge oder Ohr im Gegensatz zum Gleichgewicht).
 - **Telezeptoren:** Geruch, Geschmack, Licht, Schall, Schwerkraft, Beschleunigung.

Funktioneller Zusammenhang zum ZNS. Sinnesorgane sind nicht isoliert vom Gehirn begreifbar. So kann beim Menschen bis zu einem Viertel der Hirnrinde an der Verarbeitung visueller Informationen beteiligt sein. Sinnesorgane haben zur Erfüllung ihrer Aufgabe nicht nur **zentripetale Impulsströme** (zum Gehirn führende Erregungen), sondern von

einigen ist auch eine efferente Innervation bekannt (z. B. Innenohr). Diese dient der **Modulation der Erregungsschwelle**, d. h., das Sinnesorgan wird an die vorhandene Reizmenge oder den Informationsbedarf des Gehirnes angepasst.

Adäquater Sinnesreiz. Unter einem adäquaten Sinnesreiz versteht man diejenige Umwelteigenschaft, deren Änderungen oder Zustände **spezifisch** von Sinneszellen erfasst und als Information zentripetal weitergeleitet werden. Sinneszellen können auch durch nichtadäquate Reize erregt werden („Sterne sehen“ bei einem Schlag auf die Augen).

2.4.5 Peripheres Nervensystem, Pars peripherica (Systema nervosum periphericum)

Zum peripheren Nervensystem gehören **Spinalnerven** und **Hirn-(Kopf-)nerven**.

2.4.5.1 Spinalnerven, Nn.s pinales (s. Kap. 8.2.7.5)

Es gibt 31 (32) paarweise aus einem Rückenmarkssegment austretende Nerven

- C1–C8 Halsnerven, Nn. cervicales (8)
- Th1–Th12 Brustnerven, Nn. thoracici (12)
- L1–L5 Lendennerven, Nn. lumbales (5)
- S1–S5 Kreuzbeinnerven, Nn. sacrales (5)
- Co1–Co2 Steißbeinnerv(en), N. coccygeus (1/2)

Bau. Die efferenten Axone verlassen in kleinen Bündeln, den vorderen Wurzeln (**Radices ventrales**), ventrolateral das Rückenmark. Die afferenten Axone ziehen, aus der Peripherie kommend, ebenfalls als Bündel, den hinteren Wurzeln (**Radices dorsales**), zum Rückenmark. Die **Spinalganglien** sind längliche Knoten, die an den hinteren Wurzeln, noch innerhalb der Dura mater liegen. Im Kopfgebiet entsprechen den Spinalganglien die Ganglien der sensiblen Hirnnerven. Distal von den Spinalganglien, in denen die pseudouniaxonalen primärafferenten Nervenzellen (Ganglienzellen, Neurone) liegen, vereinigt sich die **Radix ventralis** mit der jeweiligen **Radix dorsalis** zum gemischten, kurzen (1 cm) **N. spinalis**. Die vom Spinalnerv abgehenden Äste können theoretisch alle Faserqualitäten enthalten. Ihre Hautäste ver-

sorgen gürtel- oder ringförmige Hautzonen (Dermatome) am Rumpf (s. Kap. 8.2.7.5).

Stamm des Spinalnervs. Er teilt sich in 5 Äste (Abb. 2.35):

- **Ramus ventralis:** stärkster, gemischter Ast. Er verläuft in der vorderen Rumpfwand, im Brustgebiet jeweils im Zwischenrippenraum, im Bauchgebiet zwischen den Bauchmuskeln. Er versorgt mit dem motorischen Anteil die ventrale Rumpfmuskulatur. Da die Extremitäten Ausstülpungen der ventralen Rumpfwand sind, werden sie (nur) von den Rami ventrales versorgt. Der sensible Anteil versorgt mit **Rr. cutanei laterales et mediales** die seitliche und vordere Bauchwand (besonders die Haut) sensibel.
- **Ramus dorsalis:** kleinerer, hinterer Ast. Er zieht zum Rücken, teilt sich in einen medialen und lateralen Zweig, versorgt die tiefe oder autochthone (bodenständige) Rückenmuskulatur und mit den **Rr. cutanei mediales et laterales** die Haut des Rückens.
- **Ramus meningeus:** kleiner Ast mit sensiblen und sympathischen (vasomotorischen) Fasern. Er läuft ventral von jedem Spinalnerv wieder in den Wirbelkanal zurück, wo er mit Ästen der Gegenseite und benachbarter Segmente ein feines Geflecht für den Wirbelkanal und die Rückenmarkshäute bildet.
- **Rami communicantes:** 2 „Verbindungen“ zu den paravertebralen, neben der Wirbelsäule gelegenen Grenzstrangganglien des Sympathicus. Bei Tieren bestehen sie meistens aus einem weißen (markhaltigen) und einem grauen (markarmen) Ast.
In dem weißen, markhaltigen Ast, **R. communicans albus**, verlaufen vorzugsweise die Axone der präganglionären sympathischen Neurone, die von der Seitensäule des Rückenmarks über die vordere Wurzel bis zum Grenzstrangganglion ziehen. Nachdem der größere Teil der Fasern im Grenzstrangganglion auf das postganglionäre Neuron umgeschaltet wurde, ziehen die postganglionären, grauen, marklosen oder markarmen Axone im **R. communicans griseus** wieder zum Spinalnerv, um diesem sympathische Axone für die Gefäße, Drüsen usw. zuzuführen. Dabei können sie innerhalb des Grenzstrangs die Segmenthöhe wechseln. Beim Menschen ist eine scharfe Trennung zwischen R. communicans albus und R. communicans griseus oft nicht möglich.

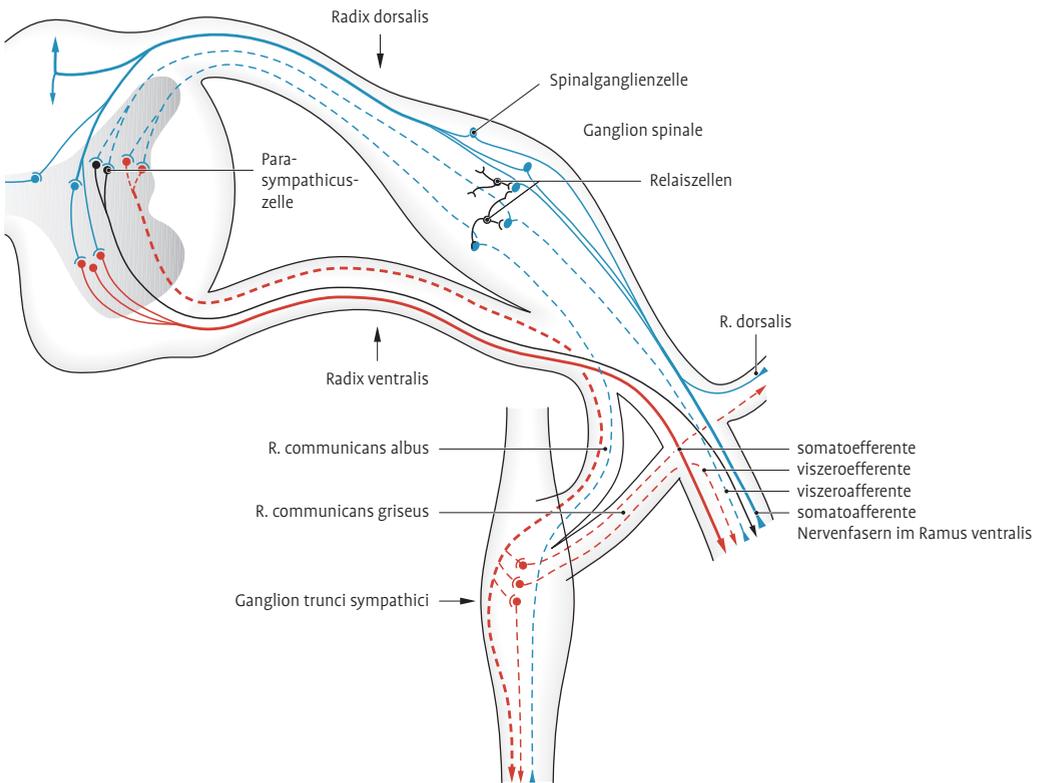


Abb. 2.35 Zusammensetzung eines Spinalnervs (Schema).

2.4.5.2 Hirn-(Kopf-)nerven, Nn. cr. aniales (s. Kap. 6.13.4.1, Kap. 8.2.6.2)

Die **Einteilung der Hirn-(Kopf-)nerven** ist komplizierter als die der Spinalnerven, bei denen die Kategorien somatisch/vegetativ und afferent/efferent ausreichen. Neben spezialisierten Nerven für die Sinnesorgane kommen bei den Hirnnerven ergänzend branchiale Nerven vor. Nicht alle Faserqualitäten kommen in allen Hirnnerven vor.

Wir unterscheiden:

Afferenzen:

- somatisch (Schmerz, Temperatur, Berührung, Druck, Propriozeption)
- spezialisiert somatisch (Auge, Innenohr)
- viszeral (Zustand der Eingeweide, z. B. Schmerz, Dehnung)
- spezialisiert viszeral (Geschmack, Geruch).

Efferenzen:

- somatisch (Skelettmuskulatur, z. B. Zungenbeinmuskeln, Augenmuskeln)
- viszeral (glatte Muskulatur, Herzmuskulatur, Drüsen)
- sympathisch
- parasymphatisch
- branchiogen

Die einzelnen Hirn-(Kopf-)nerven. Sie werden auch mit lateinischen Ziffern I–XII bezeichnet.

- I Riechnerv, N. olfactorius
- II Sehnerv, N. opticus
- III Augenbewegungsnerv, N. oculomotorius
- IV Augenrollnerv, N. trochlearis
- V Drillingsnerv, N. trigeminus, mit seinen 3 Hauptästen
 - V₁ Augenhöhlnerv, N. ophthalmicus
 - V₂ Oberkiefernerv, N. maxillaris
 - V₃ Unterkiefernerv, N. mandibularis
- VI Augenabziehnerv, N. abducens

- VII Gesichtsnerv, N. facialis
- VIII Hör- und Gleichgewichtsnerve, N. vestibulocochlearis (früher N. statoacusticus)
- IX Zungen-Rachennerv, N. glossopharyngeus
- X Umherschweifender (vagabundierender) Nerv, N. vagus
- XI Beinerv, N. accessorius
- XII Unterzungennerv, N. hypoglossus

2.4.5.3 Anastomosen und Plexusbildung

Anastomose. Es handelt sich um einen Faseraustausch zwischen verschiedenen Nerven. Er kann einfach (**Anastomosis simplex**) oder gegenseitig sein (**Anastomosis mutua**). Der Begriff Anastomose (gr. stoma = Mund), Einmündung, ist aus der Gefäßlehre entlehnt und die Bezeichnung anastomoticus wird in der neueren Nomenklatur durch communicans ersetzt. **Die Integrität der Fasern bleibt erhalten.** Rami communicantes kommen regelmäßig und als Varietäten in der Peripherie zwischen den verschiedenen Nerven vor. Ein ausgedehnter Faseraustausch führt zur Bildung von Geflechten.

Plexus

Plexus sind Geflechte aus **ventralen Ästen** der Spinalnerven. Sie entstehen aus den Ästen derjenigen Bereiche des Rückenmarks, die für die Innervation der aussprossenden Extremitäten zuständig sind.

Beim Embryo laufen die Spinalnervenäste dabei noch getrennt in die Extremitäten. Es kommt jedoch zu einer Umlagerung und Durchflechtung der zunächst durch die Metamerie des Körpers geordneten Fasern in dem Maße, wie die Muskelanlagen sich weiterentwickeln und zu neuen, zusammengelagerten und umgelagerten Muskelindividuen gestaltet werden. Wenn Material aus 2 oder mehr Muskelsegmenten zu 2- oder mehrsegmentigen Muskeln zusammenfließt, so müssen auch Nervenfasern aus 2 bzw. mehr Spinalnerven zu diesen Muskeln ziehen, da die ursprüngliche Nervenfasern-Muskelzellenverbindung bestehen bleibt.

Die entstehenden primären Geflechte trennen sich beim Wachstum in intramuskuläre Anteile und wirbelsäulennahe Bereiche, in dem sie quasi

dazwischen in die Länge gezogen werden. Damit entsteht für die Nervenfasern in ihren langstreckigen Verlaufsanteilen ein Schutz vor den Bewegungen der Extremitäten mit ihren langen Hebeln. Die Muskeln werden durch Vermittlung der Geflechte durch überschaubare und besser zu schützende Nervenstränge verbunden.

Es gibt die Hals-, Arm- und Beingeflechte, **Plexus cervicalis, brachialis** und **lumbosacralis**. Die ventralen Äste der thorakalen Rückenmarksnerven sowie die Rr. dorsales der Rückenmarksnerven bilden **keine** Plexus.

Plexus des Körpers sind:

- C1–C4 Halsnervengeflecht, **Plexus cervicalis**
- C5–C8, Th1 Armnervengeflecht, **Plexus brachialis**
- L1–L3, z. T. L4 Lendennervengeflecht, **Plexus lumbalis**
- L4, L5, S1–S5, Co Kreuzbeinnervengeflecht, **Plexus sacralis** (Plexus ischiadicus, Plexus pudendus, Plexus coccygeus)

Klinik: Der Arzt muss zwischen verschiedenen möglichen Lokalisationen einer Schädigung anhand unterschiedlicher peripherer Ausfallmuster differenzieren lernen: **Wurzel-, Spinalnerv-, proximaler und distaler Plexus- und peripherer Nervenschädigung.** Kenntnisse im Bau des jeweiligen Plexus, der Nerven sowie der Prinzipien der Innervation sind für die Diagnostik und Prognostik damit ebenso essenziell wie für die Therapie. Der Ausfall (z. B. infolge Durchtrennung) eines peripheren Muskelastes (**periphere Lähmung**) ergibt eine vollständige Lähmung des Muskels. Fällt dagegen bei einem mehrsegmentigen Muskel nur eine vordere Wurzel aus (**radikuläre Lähmung**), so ist die Versorgung aus den restlichen Segmenten noch erhalten.

2.4.5.4 Periphere und radikuläre Hautinnervation

Dermatome. Die ursprüngliche Gliederung der Haut besteht in hintereinandergereihten Bezirken (Dermatomen), die jeweils von einem Rückenmarksnerven versorgt werden. Solche sind am Rumpf am besten erkennbar (Rr. dorsales von Th2–L2 und die Rr. ventrales von Th2–Th12).

- **Hiatuslinien** sind Grenzen von Dermatomen, welche nicht aus benachbarten Rückenmarksegmenten versorgt werden („**Segmentsprung**“). Die Extremitätenbildung führt auch im Bereich der Haut zu Materialverlagerungen. Bestimmte Dermatome verschwinden vom Rumpf ganz und werden auf den Arm oder das Bein verlagert. Sie verlieren dadurch ihre ursprüngliche Verbindung mit der Mittellinie des Körpers und bilden an den Extremitäten längs verlaufende schmale Hautstreifen. Die Hiatuslinien geben die Stellen an, wo 2 ursprünglich voneinander entfernte Dermatome nebeneinander liegen. Am Rumpf grenzt ventral das Dermatome C4 an das Dermatome Th2. Dieser Segmentsprung ist Folge der vollständigen Verlagerung der Dermatome C5–Th1 auf den Arm.
- **Überlappung.** Da sich die Dermatome an den Rändern überlagern, gibt der Ausfall einer Radix dorsalis keinen vollständigen Sensibilitätsausfall in dem versorgten Gebiet. Die meisten Hautbezirke werden gleichzeitig von mehreren Nerven versorgt. Die Überlagerung der Innervationsgebiete benachbarter Hautnerven ist aber oft nicht vollständig. Manche Nerven versorgen deshalb einen kleinen Hautbezirk allein (**Autonomiegebiet**). Wird ein solcher Nerv verletzt, so tritt nur in diesem Gebiet ein völliger Sensibilitätsausfall ein. In seinem wesentlich größeren Verzweigungsgebiet, das sich mit denen der benachbarten Nerven überlagert, ist dagegen nur eine Abschwächung der Sensibilität feststellbar (**Maximalgebiet**). Durch die Plexusbildung sind Dermatome und Autonomiegebiete nicht deckungsgleich.

Klinik: Die Unterscheidung **radikulärer** (segmentaler) und **peripherer Hautversorgung** ist von großer diagnostischer Bedeutung. Bei der Gürtelrose (**Herpes zoster**), einer Entzündung einzelner Spinalganglien, hält sich die Hauterkrankung genau an die zugehörigen Dermatome.

2.4.6 Vegetatives Nervensystem (VNS), *Divisio autonómica (Pars autonómica systematis nervosi peripherici)*

Während das somatische (animale oder oikotrope) Nervensystem den Zustand der Umwelt erfassen (Nerven der Oberflächen- und Tiefensensibilität, der Sinnesorgane und der Skelett-

muskeln) und im Wesentlichen mit Körperbewegungen beantworten soll, dient das vegetative (viszerale oder idiotrope) Nervensystem den **inneren Funktionen** des Körpers (Homöostase). Neben den vegetativen sensorischen Informationen werden dafür auch somatische Afferenzen und deszendierende Impulsströme höherer zentralnervöser Zentren integriert.

Grundsätzlich kann eine körperbezogene Funktion durch ein Organ (**Autoregulation**), durch Hormone (**endokrine Regulation**) oder durch ein Nervensystem kontrolliert werden. Der Arzt bedient sich dabei in seiner therapeutischen Tätigkeit vielfach des vegetativen Nervensystems als effizientes endogenes Steuerungssystem. Das VNS kooperiert ferner mit **endokrinen, parakrinen** und **humoralen Regulationssystemen**. Das beinhaltet auch, dass die Hormone die Tätigkeit des VNS beeinflussen. Seine Tätigkeit ist in einigen Funktionen vom Willen unabhängig, jedoch von der Psyche her und mit bestimmten Techniken beeinflussbar (autogenes Training). Umgekehrt können vegetative Aktivitätsniveaus auch auf das übrige ZNS rückwirken (Meditation).

Betrachtungsweise. Für das vegetative Nervensystem haben sich die ursprünglichen Definitionen teilweise erheblich gewandelt und sind für die klinische Anwendung immer wieder erweitert worden. Für ein funktionelles Verständnis und für die klinische Anwendung sind folgende anatomische Betrachtungen erforderlich:

1. Darstellung der **zentralen** und **peripheren Anteile** des VNS
2. **Ontogenese** und die sich in ihr spiegelnde Wiederholung der Evolution
3. Auf der Ebene **übergeordneter (zentraler) vegetativer Zentren** ist die Kopplung an das hormonelle System und speziell das hypothalamo-hypophysäre System zu berücksichtigen.

Bau. Durch die zentralen Verbindungen zu dem somatischen NS, durch die intensive Verknüpfung mit den zerebrospinalen Nervenfasern und durch die Durchflechtung in den Organen ist das Charakteristische einer vegetativen Struktur schwierig zu fassen.

Ein einheitliches morphologisches Substrat aller Anteile des VNS gibt es nicht. Der **afferente Abschnitt** ist baugleich mit dem somatischen

Nervensystem. Der **efferente Abschnitt** weist als Besonderheit Nervenzellen außerhalb des zentralen Nervensystems auf.

Bedeutung. Da das VNS in den meisten Fällen sehr rasch und effizient auf Veränderungen des inneren Milieus reagiert und die Homöostase wiederherstellt, sind vegetative Dysfunktionen von erheblicher klinischer Tragweite. Umgekehrt können durch das vegetative Nervensystem bedingte Über- oder Unterfunktionen anatomischer Strukturen den Gesamtorganismus erheblich beeinträchtigen. Die Möglichkeit der Einflussnahme auf solche pathologischen Zustände mittels des VNS ist Ursache für das große Interesse der Medizin an diesem System. Letztlich dient die Homöostase keinem Selbstzweck, sondern der Bereitstellung von Leistungen zur Beeinflussung der und Reaktion auf die Umwelt. Dazu gehört auch die Bereithaltung einer autonomen (d. h. willkürlich nicht zugreifbaren) Leistungsreserve für Ausnahmesituationen.

2.4.6.1 Übersicht über das VNS

Das vegetative Nervensystem kann topografisch nach **zentralen** und **peripheren Komponenten** unterteilt werden, nach pharmakologischen Kriterien, funktionellen Einheiten oder in klassischer Weise in Sympathicus und Parasympathicus.

Anteile. Das VNS unterhält 4 wesentliche Kontroll- und Regulationseinheiten:

- **Verdauung und Atmung:** Branchialnerven, Grenzstrang und enterisches Nervensystem
 - **Herz und Kreislauf,** Urogenitalapparat, endokrine Organe: viszerale Gefäßganglien
 - **Temperaturregulation:** zentral und peripher
 - **Stoffwechsel:** trophische Innervation der Gewebe
1. **Zentrale Komponenten.** Die zentralen Anteile finden sich in Rückenmark, verlängertem Rückenmark, Brücke, Mittel- und Zwischenhirn. Die Areale sind am besten über ihre Funktion fassbar (Vasomotorik, Körpertemperatur, Sexual- und Fortpflanzungsfunktion, Verdauung, Wasserhaushalt, Tätigkeit der Großhirnrinde, Kreislauf, Adaptation von Auge und Ohr, Kontrolle des hormonellen Systems, Bronchialto-

nus, Ausscheidung). Im Hypothalamus findet sich ein übergeordnetes Steuerungszentrum für das gesamte periphere vegetative Nervensystem, dessen Reizung zu einer generalisierten Reaktion im ganzen Körper führt (s. Kap. 8.4.9).

2. **Periphere Komponenten.** Bei den peripheren Anteilen lassen sich 6 Bereiche abgrenzen. Es werden alle vorhandenen somatischen Nervenbahnen von den vegetativen Fasern mitbenutzt, im Bereich der Rumpfwand und der Extremitäten gibt es keine eigenen vegetativen Nerven. Eine bilaterale Symmetrie wie bei den somatischen Nerven existiert wegen Anlageart der inneren Organe für das VNS nicht. Topografische Einheiten sind:

- Hirnnerven III, VII, IX und X zugeordnete (parasympathische) Fasern
- Grenzstrang (sympathisch) mit zugehörigen Nerven und Geflechten
- Sakrale (parasympathische) viszerale Spinalnervenäste
- prävertebrale und vaskuläre Ganglien
- ENS (enterisches Nervensystem)
- Paraganglien und chromaffine Zellen

Andere Einteilungen. Therapeutisch wird vor allem folgende funktionelle Unterteilung genutzt:

- Sympathicus (oder Orthosympathicus, 5 periphere Rezeptortypen, thorakolumbal)
- Parasympathicus (ein peripherer Rezeptortyp, kraniosakral)

Dabei ist nur der Sympathicus einigermaßen einheitlich gebaut. Im Gegensatz zum Parasympathicus innerviert er die Organe eher diffus, weil

- die Fasern seines ersten Neurons (präganglionäre Fasern) auf 4–20 und mehr zweite Neurone (Grenzstrang-Ganglienzellen) divergieren
- die Umschaltung vom ersten auf das zweite Neuron organfern stattfindet
- die Fasern seines zweiten Neurons zahlreiche Zielzellen innervieren
- er über die Nebenniere humoral (also über den Blutweg) ubiquitär wirken kann.

Die historisch zunächst funktionell gemeinten Begriffe **Sympathicus** und **Parasympathicus** wurden später zur Benennung eines anatomisch relativ gut abgrenzbaren Anteiles (Sympathicus) und für den Rest (Parasympathicus) verwendet. Die funktionelle Sicht wandelte sich mit dem Verständnis ei-

nes weitgehenden **Antagonismus** der beiden Teile. Mit zunehmenden Erkenntnissen in der Pharmakologie stellten sich jedoch auch Antagonismen innerhalb der einzelnen Komponenten heraus. Eine enge Verbindung zum hormonellen System durch modifizierte vegetative Nervenzellen in eigenständigen endokrinen Organen (**Paraganglien**) komplizieren heute die Begrifflichkeit der eher historisch begründeten Vokabeln.

Die Aufteilung in **Sympathicus** und **Parasympathicus** ist für das Verständnis des **efferenten** Abschnittes sinnvoll. Das Bauprinzip ist eine Hintereinanderschaltung zweier Neurone.

2.4.6.2 Aufbau

Antagonismus. Die übliche (traditionelle) Unterscheidung beschreibt 2 teilweise antagonistisch wirkende Abschnitte des vegetativen Nervensystems: den Sympathicus und den Parasympathicus. Vereinfacht dargestellt erhöht der tagaktive Sympathicus zumeist die Energieentfaltung und regt die Tätigkeit der Organe an (ergotropes System, „fight or flight“-Charakter), während der nachaktive Parasympathicus den Organismus auf Einsparung von Energie und auf Erholung einstellt (trophotropes oder regeneratives System). Wesentliche Ausnahmen von diesem Antagonismus betreffen bestimmte Organe (Tränendrüse) und diejenigen, die nur von einem dieser Anteile innerviert werden (Schweißdrüsen, Mm. piloerectores, viele Arteriolen). In manchen Organen besteht ein qualitativer Antagonismus (z. B. Speichelzusammensetzung).

Modulation statt Induktion. Für die spätere klinische Nutzung ist es wichtig zu beherzigen, dass nicht – wie im somatischen NS verbreitet – Funktionen induziert werden, sondern dass vorhandene Tätigkeiten im Wechselspiel moduliert werden. Die meisten Effektororgane werden dazu von sympathischen und parasympathischen Fasern versorgt. Im Gegensatz zu dem nur erregend wirkenden somatischen Nervensystem kann eine Aktivierung des VNS eine Erregung oder Hemmung bewirken (Tab. 2.2). Dabei ist der Grundtonus der Antagonisten keinesfalls gleich, sondern üblicherweise hat je nach Organ der eine oder andere Anteil ein physiologisches Übergewicht. Alter oder Krankheitsstatus können diese Vorherrschaft verändern. Beispielsweise dominiert im Kindesalter am Herzen der Sympathicus.

Das **somatische Nervensystem** induziert (erregt), das **vegetative Nervensystem** moduliert (erregt und hemmt) Funktionen.

Neuronaler Bau. Der Natur seines neuronalen Aufbaues entsprechend ist das VNS ein eher efferentes Nervensystem und Efferenzen überwiegen auch bei seiner Tätigkeit. Prinzipiell werden vegetative Fasern aus dem Rückenmark über ein vegetatives Ganglion (para- oder prävertebral oder intramura) geleitet, bevor sie das Erfolgsgewebe erreichen. Das 1. Neuron im ZNS heißt **präganglionär** und wird in einem peripheren vegetativen Ganglion auf das 2. **postganglionäre** Neuron umgeschaltet.

Umschaltung. Hinsichtlich der Umschaltung von prä- auf postganglionär unterscheiden wir 4 Situationen.

- Das präganglionäre Neuron des Sympathicus wird zumeist in den rückenmarksnahen para- oder prävertebralen Ganglien (also **organfern**) umgeschaltet.
- Die Umschaltung des präganglionären parasympathischen Neurons erfolgt in **organnahen** parasympathischen Ganglien. Eine Ausnahme davon bilden die Tränen- und Speicheldrüsen.
- Daneben existieren erste Neurone, die erst im Erfolgsorgan umgeschaltet werden (ENS und vaskuläre Nervenzellen).
- Eine 4. Gruppe von Neuronen zieht ohne Umschaltung zu den **Paraganglien** (Nebennierenmark).

Ein postganglionäres Neuron kann mit mehreren Zellen des Erfolgsorgans Synapsen bilden, wobei nicht synaptische Endknöpfe, sondern Verdickungen der Nervenaxone im „Vorbeilaufen“ (**Synapsen passant**) gebildet werden. So werden bei dem Sympathicus größere Zellgebiete trotz lokaler Wirkung des Transmitters aktiviert.

Trennung. Eine klare Trennung in Sympathicus und Parasympathicus ist nur in jenen Anteilen möglich, die vom **Rückenmark** und vom **Gehirn** ausgehen. In der **äußersten Peripherie**, in den Organen und im **übergeordneten zentralen Bereich** (im Gehirn) ist eine Differenzierung schwierig. Die Nervenzellkörper des 1. Neurons des Sympathicus finden sich überwiegend im thorakalen und lumbalen Rückenmark, die des Parasympathicus im Hirnstamm (75% aller parasympathischen Fasern liegen im N. vagus) und im sakralen Rückenmark

Tab. 2.2 Vegetative Wirkungen

Organ	Sympathicus	Parasympathicus
Auge	weite Pupille	Nahakkommodation, enge Pupille
Speichel	wenig, zäh	viel, niedrig viskös
Tränenrüse		Sekretion
Bronchien	Weitstellung	Engstellung, Sekretion
Sinusknoten	hohe Frequenz	niedrige Frequenz
AV-Knoten	beschleunigte Überleitung	verzögerte Überleitung
His, Purkinje	schnellere Spontandepolarisation	(geringe Effekte)
Myokard	verbesserte Kontraktilität	(geringe Effekte)
Koronarien	Vasokonstriktion (a-Rezeptor), Vasodilatation (e-Rezeptor)	Vasodilatation und -konstriktion (?)
Magen-Darm	geringe Durchblutung, hoher Sphinktertonus	Sekretion, Peristaltik, niedriger Sphinktertonus
Harnblase	hoher Sphinktertonus, niedriger Detrusor-tonus	niedriger Sphinktertonus, hoher Detrusor-tonus
ZNS	Antrieb, Aufmerksamkeit	keine Wirkung
Gehirngefäße	Vasokonstriktion	Vasodilatation (?)
Leber	Glykogenabbau, Glukosefreisetzung	keine Wirkung
Gallenblase	Kontraktion	Dilatation
Pankreas	Sekretionshemmung	Sekretion
Fettgewebe	Triglyceridabbau	keine Wirkung
Skelettmuskeln	Glykogenabbau, Vasokonstriktion (a-Rezeptor), Vasodilatation(e-Rezeptor)	keine Wirkung
Hautgefäße	Vasokonstriktion	keine Wirkung
Schweißdrüse	Sekretion	keine Wirkung
Detrusor vesicae	Erschlaffung	Kontraktion
Trigonum vesicae	Kontraktion	Erschlaffung
Sexualorgane	Ejakulation	Erektion
Uterus	Tokolysse	Wehenförderung, -hemmung

(für Colon descendens bis Rectum, Harnblase und unterer Ureter sowie äußere Geschlechtsorgane).

Die meisten sympathischen Nervenzellen des **Sympathicus** liegen thorakolumbal, die des **Parasympathicus** kraniokaudal.

Afferenz. Der afferente Schenkel eines vegetativen Reflexbogens wird durch primärafferente, pseudounipolare Neurone (viszerosensibel) gebildet, die in Spinalganglien bzw. in den entsprechenden Ganglien von Hirnnerven liegen. Der **vegetative Reflexbogen** besteht demnach aus einem afferenten und mindestens 2 efferenten Neuronen.

Vegetative Nerven. Die vegetativen Fasern können wie somatische selbstständig verlaufen (Kopf-

nerven, Grenzstrang des Sympathicus, präganglionäre Fasern zu den präaortalen Ganglien = Nn. splanchnici). Überwiegend schließen sich ihre Axone aber den Spinalnerven an oder verlaufen mit den Gefäßen, um die sie Geflechte bilden. Mit den somatischen Nerven gelangen sie zur glatten Muskulatur und zu den Drüsen der Haut, aber auch zur quer gestreiften Muskulatur.

Die **Benennungen** „rein sensibler Nerv“ (z. B. für Hautnerven) oder „rein motorischer Nerv“ (für Muskeläste) sind daher insofern unrichtig, als sie sich ausschließlich auf den somatischen Anteil des Nerven beziehen (und im Falle des motorischen Astes sogar die somatischen Afferenzen der Muskelspindeln ignorieren).

Die präganglionären Fasern sind myelinisiert und $<3\ \mu\text{m}$ im Durchmesser. Die postganglionären Fasern sind nicht oder schwach myelinisiert, $<2\ \mu\text{m}$ im Durchmesser und entsprechend langsam in der Erregungsweiterleitung ($<2\ \text{m/s}$).

2.4.6.3 Transmitter des VNS und ihre Rezeptoren

Transmitter. Die oben skizzierte Terminologie sagt nichts über die aus pharmakologischer Sicht wichtige Natur der Transmitter.

- Die präganglionären Fasern sind **cholinerg**.
- Die sympathischen postganglionären Fasern sind in der Mehrheit **adrenerg** (Transmitter hauptsächlich Noradrenalin),
- die Versorgung der Schweißdrüsen ist jedoch **cholinerg**.
- Die parasympathischen postganglionären Fasern sind ebenfalls **cholinerg** (muscarinerg).

Rezeptoren. Unter pharmakologischen Gesichtspunkten muss neben den Transmittern die Rezeptorart differenziert werden. Ein und derselbe Transmitter kann je nach Rezeptor antagonistische Wirkung entfalten. Die meisten Ausnahmen betreffen das Herz. Das Ansprechen der Rezeptoren ist zudem abhängig von der Konzentration der Transmitter.

2.4.6.4 Entwicklung des VNS

Die Genese des VNS kann nicht von der des übrigen Nervensystems getrennt werden. Es gibt zwar eindeutige morphologische und funktionelle Unterschiede, aber das VNS ist nicht unabhängig vom übrigen somatischen Nervensystem. Die kooperative Entwicklung ist der Schlüssel dafür, dass bei allen somatischen Funktionen auch das vegetative Nervensystem beteiligt ist.

Abkömmlinge der Neuralleiste. Aus der Neuralleiste gehen folgende Zellen hervor:

- Grenzstrang, Truncus sympathicus (s. Kap. 5.1.4.9, Kap. 5.2.4.5)
- vegetative Afferenzen im Spinalganglion (s. Kap. 2.4.5.2)
- vegetative Afferenzen der präaortalen Ganglien (s. Kap. 5.2.4.5)
- vegetative Afferenzen der vaskulären Ganglien
- zentrale Zellen des VNS.

Die Zellen differenzieren sich abhängig von ihrer Lage in **Sympathiko-** (zentral) oder **Parasympathi-**

koblasten (an den Polen des Embryos). Die Festlegung auf einen Transmitter hängt wahrscheinlich vom Zielorgan ab. Bei den **Wanderungsbewegungen** gelangen von den vegetativen Zellen nicht nur afferente Ganglienzellen in das Spinalganglion, sondern auch efferente Sympathikoblasten können sich – statt in den Grenzstrang zu gelangen – hierher verirren, sodass das Spinalganglion durchaus auch efferente Neurone enthält.

Vegetative Kopfganglien. Die vegetativen Kopfganglien enthalten ausschließlich **parasympathische** zweite Neurone. Sie sind alle an Äste des **N. trigeminus** assoziiert. Es handelt sich um:

- **Ggl. ciliare** (N. oculomotorius, s. Kap. 7.1.4). Es tritt von allen als Erstes auf und wird als Sinnesorgan-Ganglion mit efferentem Charakter definiert (für Mm. ciliaris und sphincter pupillae).
- **Ggll. pterygopalatinum** und **submandibulare** (N. facialis, s. Kap. 6.13.4.1). Sie sind bereits bei den Reptilien vorhanden.
- **Ggl. oticum** und **sublinguale** (Letzteres beim Menschen nur selten ausgeprägt) finden sich erst bei den Mammalia (N. glossopharyngeus). Die postganglionären Fasern erreichen mit den Ästen des N. trigeminus ihre Zielorgane (Speicheldrüsen, s. Kap. 6.14.1.2).
- Darüber hinaus finden sich vegetative Ganglien in den **Nn. glossopharyngeus** und **vagus**.

Paraganglien. Die granulierten, sympathischen Zellen sind beim Menschen in geringerer Zahl angelegt. Sie arbeiten endokrin und wirken damit generalisiert auf das Gefäßsystem. Die aus diesen Zellen hervorgegangenen (chromaffinen) Paraganglien konzentrieren sich und bilden bei den Säugetieren vor allem das Nebennierenmark.

Nur wenige weitere, vorzugsweise in der Entwicklungsphase aktive Paraganglien (größtes: **Paraggl. aorticum abdominale** = Zuckerkanal-Organ) sind beim Menschen bis zum 2. Lebensjahr zu finden. Relativ regelmäßig lassen sich im Bereich des Plexus cardiacus Paraganglien nachweisen (**Paraggl. supracardialia**). Weitere benannte Paraganglien liegen im Bereich der luftleitenden Organe. Insgesamt bilden die Paraganglien wohl eine funktionelle Einheit.

Zuweilen wurden auch Knötchen, die parasympathische Fasern erhielten (wie das Glomus caroticum), als (parasympathische) Paraganglien bezeichnet und ihnen wegen der intensiven Vaskularisation endokrine Aktivität nachgesagt. Nachgewiesen sind jedoch nur enterozeptive

Funktionen. Die Zellen stammen auch nicht aus dem Pool vegetativer Blasten.

Klinik: Paraganglien können benigne (**Phäochromozytom**) und gelegentlich maligne Tumoren (**Phäochromoblastom**) bilden, die meist endokrin (autonom) tätig sind.

System der vaskulären Nervenzellen. Das System vaskulärer Nervenzellen ist beim Menschen sehr ausgeprägt. Die Entwicklung einer differenzierten vaskulären Innervation kann als entscheidend für die Evolution der Vertebraten angesehen werden. Für den Menschen hat es überhaupt erst die Voraussetzungen für die komplexen Anpassungsvorgänge des Kreislaufes beim Übergang in den Zweibeinerstand geschaffen. Sie ermöglicht auch die mit der bipeden Lokomotion notwendig gewordene effiziente Temperaturregulation. Externe, interne und zentrale Impulse erlauben die gezielte Kontrolle einzelner Gefäßgebiete (Verdauungssystem, Genitaltrakt, Körperoberfläche, somatische Muskulatur, Thoraxorgane) und damit die separate ökonomische Anpassung an jeweilige Aktivitätszustände. Die (sympathischen) vaskulären Nervenzellen bilden zu diesem Zwecke gefäßassoziierte, möglichst Gefäßgebiet-bezogene (organnahe) Ganglien, deren **segmentale Anlage** beim erwachsenen Menschen nicht mehr zu erkennen ist. Die Ganglien lagern sich an die viszerale Gefäßstämme an. Präparatorisch ist die vaskuläre Innervation von der übrigen Organinnervation schon in den **prävertebralen Ganglien** nicht zu trennen (s. u.). Die Durchblutung hängt dabei eng mit der Organfunktion zusammen.

Beziehung zu den Gefäßen. Die phylogenetisch relativ junge Entwicklung der Lunge ist ein raumfordernder Prozess, der eine Umorganisation der segmentalen Anlagen in parallel zur Körperachse angeordneten Funktionseinheiten zur Voraussetzung bzw. zur Folge hat. Dies gilt auch für die Blutgefäße. Mit dem Deszensus der Organe geraten die Gefäße und mit ihnen die vaskulären Nervenzellen nach kaudal, sodass sich die nervöse Verbindung mit den Ausgangssegmenten um 6 und mehr Segmente in die Länge streckt (präganglionäre Fasern aus dem Thorakalmark zusammengefasst als **Nn. splanchnici thoracici**). Im Abdomen müssen sie sich dann in einem vergleichsweise kleinen Abschnitt zusammendrängen. Durch die bedeutenden ontogenetischen Umorientierungen

entsteht insgesamt eine erhebliche Variabilität in diesem Teil des VNS. Im endgültigen Versorgungsgebiet sind die an die Gefäße gebundenen Ausbreitungswege so individuell wie der Gefäßverlauf selbst. Die ausgeprägte Plexusbildung zieht sich entlang der Gefäße bis zu den Kapillaren. In der Konsequenz ist die Situation der vaskulären Innervation sehr unübersichtlich.

Klinik: Die differenzierte Steuerung der **Organ-durchblutung** erlaubt es dem menschlichen Organismus, mit weit weniger Blut auszukommen, als bei maximaler Dilatation aller Blutgefäße zur Füllung erforderlich wäre. Das Herz wird so ergonomisch entlastet. Gleichzeitig wirken sich Blutverluste stärker aus und es entsteht die Gefahr der Schock-Reaktion.

Herzinnervation. Eine besondere Situation ist bei der Innervation des Herzens durch die vaskulären Nervenzellen entstanden. Der Sinus venosus erhält allgemein nur Fasern über den nahen N. vagus, und für die Vertebraten gilt, dass auch die Atria nur über den N. vagus efferente (präganglionäre) Fasern empfangen. Demgegenüber wachsen Nervenfasern von den Plexus der Aa. subclaviae (meist aus dem mittleren und unteren zervikalen Ganglion) auf die Ventrikel und die Koronararterien. Verschiedene Anteile des Herzens werden normalerweise auch von getrennten vegetativen Fasern versorgt. Die rechte und die vordere Seite, der Sinusknoten, der AV-Knoten und das Septum interventriculare werden von rechts innerviert. Von links kommende vegetative Fasern versorgen insbesondere den linken Ventrikel (Inotropie).

2.4.6.5 Pars sympathica, Sympathicus

Die Pars sympathica ist der Teil des vegetativen Nervensystems, der morphologisch weitgehend über die Zugehörigkeit zum **Grenzstrang** abgrenzbar ist. Funktionell ist er wesentlich für die Leistungsbereitschaft des Körpers gegenüber der Umwelt verantwortlich.

Anteile. Topografisch lassen sich 3 Abschnitte auseinanderhalten:

1. **Grenzstrang, Truncus sympathicus.** Zu beiden Seiten der Wirbelsäule (paravertebral) liegt je eine Ganglienkette, der Grenzstrang, **Truncus**

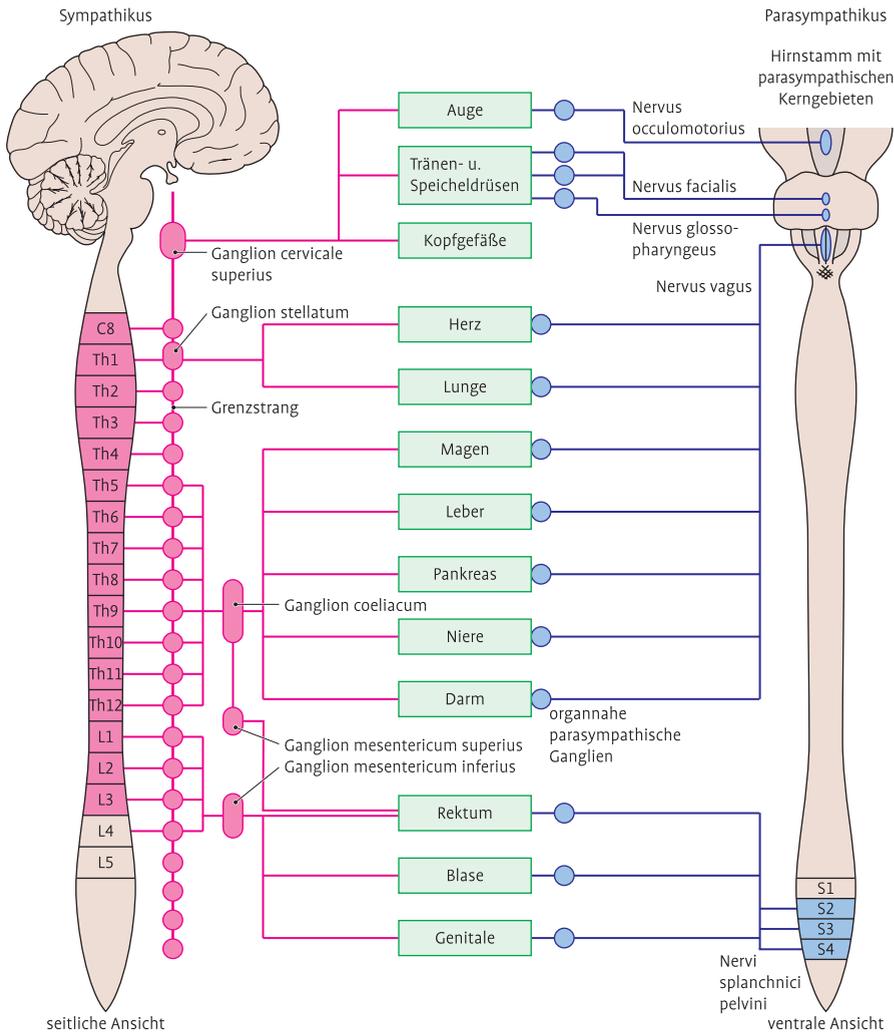


Abb. 2.36 Schematische Übersicht des Sympathicus (links), des Parasympathicus (rechts).

sympathicus. Er reicht von der Schädelbasis bis zum Steißbein und besteht aus einem Hals-, Brust-, Bauch- und Beckenteil. Jeweils die benachbarten der 22 und mehr Ganglien sind untereinander durch **Rr. interganglionares** verbunden. Direkte Verbindungen von linkem mit rechtem Grenzstrang sind unregelmäßig. Solche **Rami transversi**, Verbindungen zu den Ganglien der Gegenseite, sind im Brust- und Bauchgebiet seltener, im Beckengebiet häufiger. Kaudal kann ein singuläres **Ggl. impar** gefunden werden. Die Rr. interganglionares bestehen je zur Hälfte aus efferenten (präganglionären) und afferenten Fasern. Charakteris-

tisch ist, dass die zugehörigen zentralen Ursprünge kranial und kaudal von den Plexus der Extremitäten begrenzt sind. Dabei enthalten jeweils die kaudalen Wurzelfasern des Plexus brachialis und die kranialen Wurzelfasern des Plexus lumbalis noch präganglionäre Fasern.

2. **Prävertebrale Ganglien.** An den Abgängen der 3 unpaaren Eingeweideäste der Aorta (Truncus coeliacus, A. mesenterica superior und inferior) liegen 3 größere Ganglien, die umfangreich untereinander verbunden sind und selbst aus zahlreichen kleineren Ganglien bestehen. Bei der Präparation können diese retroperitonealen Strukturen leicht mit Lymphknoten verwechselt

werden. Die in ihrer Form sehr wechselnden prävertebralen Ganglien bekommen Fasern aus den Nn. splanchnici thoracici majores et minores, dem Truncus vagalis posterior und direkt aus dem anliegenden Grenzstrang. Die aus ihnen hervorgehenden Äste bilden Geflechte um die Gefäße und verlaufen mit ihnen zu den Eingeweiden.

3. **Sympathische Geflechte.** Die von den sympathischen Ganglien abgehenden postganglionären Nerven lagern sich entweder den Spinalnerven oder den Gefäßen an. Um die Gefäße bilden sie Geflechte, Plexus, die mit den Gefäßen gleichnamig sind. Der genauere Verlauf der Geflechte wird bei den einzelnen Regionen besprochen. Mit den Gefäßverzweigungen gelangen die postganglionären Axone zu ihren Zielgebieten. Gleichzeitig werden die entsprechenden Gefäßabschnitte selbst innerviert.

Ursprung. Der Ursprung des Sympathicus ist auf den Brust- und Lendenteil des Rückenmarks beschränkt. Üblicherweise stehen etwa 5.000 präganglionäre Neurone pro Körpersegment in der Seitensäule im Bereich von Th1 bis L2 zur Verfügung. Der Beginn dieser als **Columna intermediolateralis** bezeichneten Zellsäule (s. Kap. 8.2.7.3) schwankt mit der Höhe der Anlage des Plexus brachialis zwischen C8 und Th2. Entsprechend können die letzten kaudalen Fasern zwischen L1 bis L3 das Rückenmark verlassen. Diese Schwankungsbreite ist bei Anästhesien zu berücksichtigen.

Faserverlauf. Die Efferenzen (präganglionäre sympathische Axone), die den Spinalnerven aus den Segmenten C8–L3/4 zugeordnet werden, verlassen durch die **Radix ventralis** das Rückenmark (s. Abb. 2.35). Sie gelangen in den gemischten **N. spinalis** und ziehen durch den **R. communicans albus** zum zugehörigen **Grenzstrangganglion**. In ihm schaltet der größere Teil der Axone auf das 2. postganglionäre Neuron um. Als R. communicans griseus schließen sie sich wieder demselben N. spinalis an. Ein weiterer Teil zieht ohne Umschaltung durch die Rr. interganglionares zu benachbarten Grenzstrangganglien und schaltet dort auf das 2. Neuron um. Dabei können durchaus auch in den durchzogenen Ganglien synaptische Kontakte hergestellt sein. Oberhalb von Th7 steigt die Mehrzahl der Fasern auf, unterhalb von Th11 finden sich vorzugsweise descendierende Fasern in den Rr. interganglionares. Schließlich zieht noch ein Teil der Fasern ungeschaltet durch die Grenzstranggan-

glie, gelangt z. B. in die **Nn. splanchnici thoracici** und zieht in ihnen zu den **prävertebralen Ganglien**. Erst hier findet dann die Umschaltung auf das 2. Neuron statt.

Die **Zielorgane** in der Körperwand werden über die somatischen Nerven (via **Rr. communicantes grisei**) erreicht, wobei die dorsalen Äste der Spinalnerven bevorzugt werden. Daher sind Nacken und Rücken reich an Sympathikusfasern (es sträuben sich die Nacken-, nicht aber die Barthaare und ein Schauer läuft einem über den Rücken, nicht über den Bauch). Die Anzahl der Rezeptoren ist jedoch auf der Ventralseite exzessiv größer als auf der Dorsalseite (vgl. z. B. Bauchdeckenreflexe).

Charakteristika. Die Neuriten der 2. Neurone, deren Zellleiber im Grenzstrang oder in den prävertebralen Ganglien liegen, sind markarm oder marklos. Sie verlaufen entweder durch die Rr. communicantes grisei zurück zu den Nn. spinales oder mit den Gefäßen zu den Zielorganen. Da der Ursprung nur auf das Gebiet von C8 bis L3/4 beschränkt ist, fehlen im Hals-, unteren Lenden- und im Kreuzbeingebiet fast immer die Rr. communicantes albi. Hingegen kommen die Rr. communicantes grisei überall und auch bei einigen Hirnnerven vor.

Ein wichtiges Merkmal der peripheren, efferenten sympathischen Leitungsbahn ist, dass sie aus 2 hintereinandergeschalteten Neuronen, dem **präganglionären** und dem **postganglionären Neuron**, besteht und sowohl eine Hemmung wie eine Erregung des Zielorgans möglich ist (Unterschied gegenüber den nur erregenden somatischen Nerven).

Viszerosensible Fasern. Neben den bisher beschriebenen efferenten, sog. viszeromotorischen Fasern, welche die Hauptmasse ausmachen, ist auch eine geringere Zahl von afferenten, sog. viszerosensiblen Fasern in den sympathischen Nerven nachzuweisen, deren Zellleiber in den sensiblen Hirnnervenganglien bzw. in den Spinalganglien und im Grenzstrang liegen. Die afferenten Fasern verlaufen in der Peripherie zusammen mit den Efferenzen in den vegetativen Geflechten. In größerer Anzahl finden sie sich in den Nn. splanchnici thoracici. Die Afferenzen gelangen durch die vordere (kleiner Teil) und hintere Wurzel vorzugsweise an Nervenzellen im Seitenhorn. Sie leiten Erregungen

von den Eingeweiden in das Zentralnervensystem. Meist werden diese viszerosensiblen Erregungen nur reflektorisch auf efferente Bahnen umgeschaltet. Der Sympathicus vermittelt vorzugsweise Schmerzen (für sonstige Organempfindungen s. Parasympathicus, s. Kap. 2.4.6.6), die auch bewusst werden können (Magen-, Blasenschmerzen usw.).

Umfang. Die Zahl der postganglionären Neurone übertrifft die der präganglionären mehrfach. Das bedeutet, dass es in der Peripherie zu einer **divergenten Erregungsausbreitung** kommt. Diese Verbreiterung ist notwendig, wenn man das kleine Ursprungsgebiet mit dem Versorgungsgebiet (sämtliche Organe) in Beziehung setzt. Andererseits können auch mehrere präganglionäre vegetative Nervenzellen mit einem der zweiten Neurone Synapsen bilden, sodass zudem Konvergenz beobachtet werden kann.

Klinik: Die einfache motorische und sensorische Funktionsprüfung kann in manchen Fällen nicht zur Differenzialdiagnose einer peripheren Lähmung ausreichen. So ist die Symptomatik eines **Wurzelfaserausrissses C7** oft ähnlich einer peripheren N.-ulnaris-Lähmung (oder L5 ähnlich N. fibularis). Hier hilft eine Überprüfung der Hautfeuchtigkeit (Intaktheit der vegetativen Schweißdrüseninnervation). Da sich die Hauptmasse der vegetativen Fasern erst dem Spinalnerv beigesellt, können sie bei einem Wurzelfaserausris im Bereich eines Segmentes nicht merklich gestört sein (Schweißdrüseninnervation intakt).

2.4.6.6 Pars parasympathica, Parasympathicus

Die Pars parasympathica ist ein funktioneller, durch Physiologie und Pharmakologie geprägter Begriff. Funktionell dient das System vor allem **regenerativen und aufbauenden Prozessen**.

Anteile. Der teilweise recht komplizierte Faserverlauf des **kranialen Parasympathicus** wird im Zusammenhang mit den Kopfnerven detailliert besprochen (s. Kap. 6.1.3.4.1). Die Gefäß- und Herzmuskulatur wird nur wenig vom Parasympathicus innerviert, die Effekte sind daher gering. Eine intensivere parasympathische Versorgung erfahren jedoch die Gefäße der äußeren Geschlechtsorgane aus dem **sakralen Parasympathicus**.

- Der Kopfteil** hat seine Kerngebiete im Mittel- und Rautenhirn. Die präganglionären Fasern ziehen in den Nn. III, VII, IX und X zu den parasympathischen Ganglien, wo sie auf das postganglionäre Neuron umgeschaltet werden.

 - Der **N. oculomotorius** hat Fasern vom Nucleus oculomotorius accessorius (Edinger-Westphal), die zum **Ganglion ciliare** (s. Kap. 7.1.4) ziehen.
 - Der **N. facialis** (Intermediusanteil) enthält sekretorische Fasern von Nucleus salivatorius superior. Diese werden in der Chorda tympani zum **Ganglion submandibulare** und im N. petrosus major zum **Ganglion pterygopalatinum** geleitet (s. Kap. 6.13.4.1).
 - Der **N. glossopharyngeus** leitet Fasern vom Nucleus salivatorius inferior über den N. petrosus minor zum **Ganglion oticum** (s. Kap. 6.13.4.1).
 - Der **N. vagus** enthält alle Parasympathikusfasern für die Innervation der Hals-, Brust- und Baueingeweide bis zum **Cannon-Böhm-Punkt** (in der Nähe der linken Colonflexur). Sie entspringen im Nucleus dorsalis nervi vagi. Aus dem Geflecht des Oesophagus gehen die Trunci vagalis anterior und posterior hervor, die sich auf den Magen weiter fortsetzen (s. Kap. 5.1.4.8).
- Der Sakralteil** entstammt den Seitenhörnern im sakralen Abschnitt des Rückenmarks (S2–S4) (s. Abb. 2.35). Die präganglionären Nervenfasern bilden hier die **Nn. splanchnici pelvini**, welche den restlichen Teil des Darms, der nicht vom N. vagus innerviert wird, z. B. die Beckenorgane, **Nn. erigentes**, versorgen. Der sakrale Parasympathicus ist in Wechselwirkung mit dem Sympathicus und mit somatomotorischen Nerven an der Regelung der Genitalfunktionen einschließlich der Drüsen und der Entleerung der Harnblase und des Mastdarms beteiligt. Die Fasern verteilen sich wesentlich über die diversen pelvinen Geflechte, die teilweise zusammengefasst werden (z. B. der **Frankenhäuser-Plexus**, s. Kap. 5.3.6.2)
- Periphere Ganglien.** Bei der Auswanderung der medullären parasympathischen Ganglienzellen (vornehmlich mit dem N. vagus) in eine organnahe Lage bleiben viele Nervenzellen im Stamm des N. vagus liegen (manchmal als sichtbare Ganglien). Das **Ggl. cardiacum (Wrisbergi)** findet sich häufig im Bereich der vagalen Herznerven; sonst sind an dieser Stelle überall

Ganglienzellen zu finden. Die sympathischen Ganglien, wie das **Ggl. renale** für die Niere, enthalten auch parasympathische 2. Neurone.

Ursprung. Der Parasympathicus entspringt kranial und kaudal vom Sympathicus.

- Der **kraniale Parasympathicus** (Kopfparasympathicus) nimmt seinen Ursprung in spezifischen Kernen des Mittelhirnes und des verlängerten Rückenmarkes. Details und Umschaltungen s. Kap. 8.4.9.
- Der **sakrale Parasympathicus** hat seine Ursprungskerne im Sakralmark (zumeist S3 und S4).

Faserverlauf. Die Fasern des Parasympathicus verlaufen in der Peripherie zumeist nicht selbstständig, sondern zusammen mit anderen Nervenfasern. Die efferente Leitung besteht wie beim Sympathicus aus 2 Neuronen, einem prä- und einem postganglionären Neuron. Im Unterschied zum Sympathicus werden nur die inneren Organe, aber nicht die Leibeswand parasympathisch versorgt. Der Parasympathicus versorgt die inneren Organe, der Sympathicus die inneren Organe und die Leibeswand.

Charakteristika. Die Perikarya der 1. efferenten Parasympathikusneurone liegen im Hirnstamm (Kopfteil) und im Sakralbereich des Rückenmarks (Sakralteil). Die Umschaltung der präganglionären Nervenfasern auf das 2. Neuron erfolgt im Gegensatz zum Sympathicus nahe am Erfolgsorgan.

Viszerosensible Fasern. Ähnlich wie im Sympathicus verlaufen auch im Parasympathicus afferente Fasern von den Organen zum ZNS, deren Perikarya in den sensiblen Hirnnervenganglien bzw. in den Spinalganglien liegen. Die Hirnnerven übertragen Afferenzen aus Pharynx, Larynx und Oesophagus (für die übrigen Thoraxorgane ist der Sympathicus zuständig). Sie vermitteln ferner das Gefühl des Harn- und Stuhldranges und teilweise genitale Afferenzen. Aus dem Darmbereich kann das Gefühl der Übelkeit gemeldet werden

Interozeption. Viele wichtige vegetative Reflexe haben spezifische Sensoren (Interozeptoren). Die wichtigsten sind:

- **Chemorezeptoren** zur Messung von pH, $p\text{CO}_2$, $p\text{O}_2$ z. B. im Aortenbogen oder Glomus caroticum
- **Atriale Mechanozeptoren** erkennen Vorhofdehnung etwa infolge vermehrten Blutvolumens

- **Barorezeptoren** (z. B. Sinus caroticus) registrieren den Blutdruck, adaptieren aber und sind dadurch kein Schutz gegen sich langsam entwickelnden Hypertonus. Sie können allerdings bei einigen Menschen hypersensitiv sein und durch externen Druck (beidseitiges Pulsfühlen an der A. carotis) eine Blutdrucksenkung auslösen.
- **Zentrale Interozeptoren** sind im ZNS lokalisiert und kontrollieren den pH-Wert des Liquor cerebrospinalis, den osmotischen Druck in den Gefäßen und die arteriovenöse Blutzuckerdiffferenz.

Zwischen den Reflexen bestehen vielfältige Interaktionen. Insbesondere die pulmonalen Reflexe beeinflussen wesentlich die kardiovaskulären Reflexe.

Klinik: 1. Als **vagovasale Synkope** bezeichnet man eine extreme Vagusreizung (peripher beispielsweise durch Schmerz oder hypersensitiven Karotissinus, zentral beispielsweise durch Schreck) mit akuter ausgedehnter Vasodilatation (Sympathicus-vermittelt) und Bradykardie, die zu einer Hypotonie führt. Die dadurch bedingte Reduktion des Herzzeitvolumens kann infolge zentraler Hypoxie zur Bewusstlosigkeit führen (Synkope). **2.** Ein Schlag in die Gegend des **Plexus coeliacus** und angrenzender Plexus kann ebenfalls zu einem massiven Blutdruckabfall und zusätzlich zu Atemnot führen. Je intensiver die auslösende Ursache einer vegetativen Reaktion, desto mehr Funktionseinheiten werden aktiviert bzw. gehemmt.

2.4.6.7 Trophische Innervation

Trophik (engl. trophic state) bedeutet **Ernährungszustand** eines Gewebes oder Organs bzw. Stoffwechszustand. Der Wortteil -troph hat die entsprechende Bedeutung.

Neben der Durchblutungsregulation greift das VNS noch direkt in den **Stoffwechsel** der Organe ein. Es gibt kein Organ, welches nicht wenigstens von sympathischen Fasern versorgt wird. Bei vegetativen Innervationsstörungen können in der Haut die Empfindlichkeit der Tastsinnesorgane herabgesetzt oder die Reaktionsschwelle eines Muskels heraufgesetzt sein; auch das zentrale Nervensystem wird vegetativ versorgt.

Klinik: 1. Wegen der intensiven Überlagerung und der Divergenz von prä- nach postganglionär treten bei einer partiellen Ausschaltung des VNS keine „vegetativen Lähmungen“ auf. Der Ausfall äußert sich nur in teilweise schwer fassbaren **Funktionseinschränkungen**. Ein weiterer Grund dafür ist, dass das VNS vorhandene Funktionen nur moduliert, diese aber grundsätzlich autonom (z. B. Herz) oder durch das somatische Nervensystem (z. B. Skelettmuskelkontraktion) hervorgerufen sind. **2.** In **chronische Schmerzsyndrome** und **reflektorische sympathische Dystrophien** sind afferente und efferente Anteile des sympathischen VNS involviert. Die genaue afferent-efferente Verbindung in der Peripherie ist ungeklärt (parasympathisch ist sie nicht beschrieben). Blockade der Efferenzen ist jedoch in den meisten Fällen eine mögliche Therapie (z. B. Stellatumblockade nach posttraumatischen dystrophischen Zuständen der oberen Extremität).

2.4.6.8 Reflexe

Die Funktion des VNS wird durch **periphere Reflexbögen** aufrechterhalten, die auch nach Verlust zentraler Verbindungen (Querschnittsläsion) weiter funktionieren. Die lokal erzeugten nervösen Grundmuster (z. B. für die Peristaltik) gelten als Baustein.

Sowohl von viseroafferent auf somatoefferent als auch in umgekehrter Richtung von somatoafferent auf viseroefferent bestehen reflektorische Verbindungen. Viszerosensible Axone werden im Rückenmark mit den somatischen Motoneuronen durch Schaltzellen verbunden. Auf diesem Weg wird bei Eingeweideschmerzen der Tonus quer gestreifter Muskeln erhöht (z. B. harte Bauchdecken bei Entzündungen im Bauchraum = viszerosomatomotorische Reflexe). Es lassen sich folgende Reflexbeziehungen unterscheiden:

- **viszeroviszeral:** Viszerale Afferenzen führen zu viszeralen Reaktionen (Blasenentleerung, Peristaltik).
- **viszerokutan:** Viszerale Afferenzen führen zu Reaktionen in der Haut (die vermehrte Durchblutung kann auch durch den ausstrahlenden Schmerz bedingt sein) (Abb. 2.37).

- **viszeromotorisch:** Viszerale Afferenzen sorgen für einen erhöhten segmental zugeordneten Muskeltonus oder -spasmus (Abwehrspannung bei „akutem Abdomen“).
- **kutisviszeral:** Somatische Afferenzen stimulieren vegetative Efferenzen entsprechend den Head-Zonen (Abb. 2.37).

In Analogie zu der motorischen Einheit (s. Kap. 2.4.2) kann man auch das 2. efferente Neuron zusammen mit den von ihm innervierten Organanteilen als Funktionseinheit begreifen. Die vegetativen Ganglien werden daher zuweilen als Organganglien bezeichnet.

Klinik: 1. Bei Erkrankungen der Herzkranzgefäße strahlen Schmerzen in die Brust (**Angina pectoris**) oder in den linken Arm aus. Die umgekehrte Beziehung versucht man therapeutisch dadurch auszunutzen, dass man bestimmte Hautbezirke durch Pflaster, Bäder, Umschläge, Kälte- und Wärmeanwendungen, Quaddelung usw. stimuliert, um die segmentzugehörigen Organe zu beeinflussen und z. B. Schmerzen zu lindern (Wärmflasche = Hautreiz). **2.** Bei einer **Appendizitis**, **Salpingitis** oder **Cholecystitis** kann eine regional begrenzte oder generelle Erhöhung der Spannung der Bauchmuskulatur als Abwehrspannung auftreten. Diese ist durch viszerosensible-somatomotorische Reflexe mit bedingt. Durch die mangelnde Ausprägung des segmentalen Charakters im VNS und vor allem durch die Divergenz im Sympathicus ist die Ausbreitung vegetativer Reaktionen in der Haut mit den somatischen Dermatomen nicht in Übereinstimmung zu bringen und muss hinsichtlich einer diagnostischen Auswertung eigenständig betrachtet werden.

2.4.6.9 Übergeordnete vegetative Zentren

Die Kontrolle der **regionalen Steuerung** erfolgt zentral. Die Funktion jedes einzelnen Organs wird vom Rückenmark und vom Hirnstamm aus durch das vegetative Nervensystem überwiegend auf dem Reflexwege gesteuert.

Die zentralen vegetativen Steuereinheiten sind teils hierarchisch organisiert. In der Übersicht können 3 funktionelle Organisationsebenen unterschieden werden: die prosenzephal übergeord-

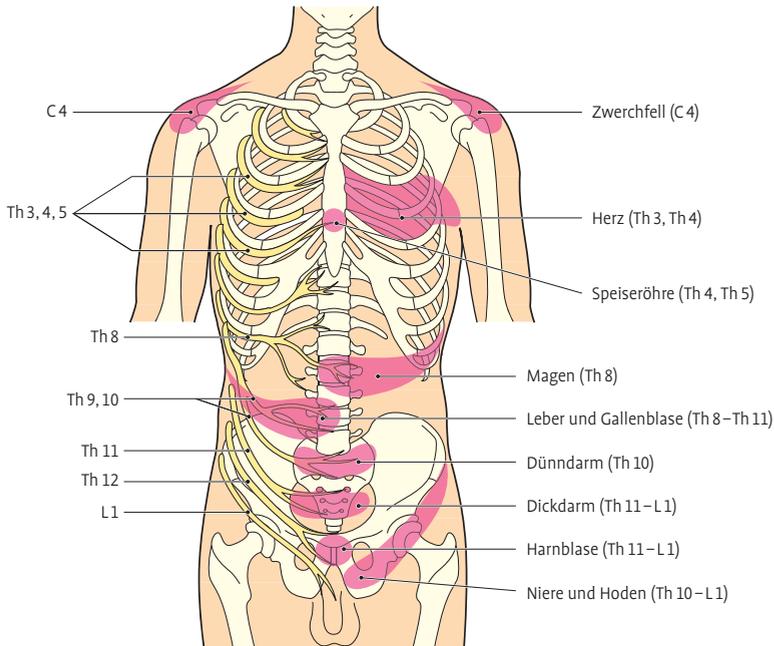


Abb. 2.37 Segmentale Versorgung einiger innerer Organe. Hautbezirke (rot), in denen bei Erkrankung dieser Organe durch viszerokutane Reflexe Hyperämie und

Hyperalgesie auftreten können (Head-Zonen). Schema, verändert nach Treves-Keith.

nete Verbindung zu Großhirn und Endokrinum, die spinotegmentale Steuerung und der periphere Reflexbogen.

Hypothalamus. Die Zusammenfassung der vegetativen Teilfunktionen zu höheren, zielgerechten Leistungen findet im Hypothalamus des Zwischenhirns statt (s. Kap. 8.4.11.2).

Formatio reticularis. Das Bindeglied zwischen der niederen Funktionsebene (Rückenmark und Hirnstamm) des vegetativen Systems und dem Hypothalamus bildet die Formatio reticularis (s. Kap. 8.4.9.2.).

Spinale Zentren. Sympathische und parasympathische spinale Ursprünge werden insbesondere hinsichtlich der Miktion, Defäkation und genitaler Funktionen zu Zentren zusammengefasst. Am Bei-

spiel des **Centrum genitospinale** sei dabei noch einmal auf die wesentlichen Einflussmöglichkeiten übergeordneter zentralnervöser Strukturen hingewiesen.

2.4.6.10 Enterisches Nervensystem (ENS)

Die diffus verteilten Nervenzellen bilden entlang des **Darmrohres** und **zugehöriger Organe** mit eigenen **Ganglien** und **Plexus** das enterische (intramurale) Nervensystem. Dieses reguliert relativ unabhängig von dem sympathischen und parasympathischen Anteil die Darmmotilität sowie Flüssigkeits- und Elektrolythomöostase. Die weitgehende Unabhängigkeit dokumentiert sich nicht nur in der eigenständigen Gliederung, sondern auch in für diesen Teil des VNS spezifischen Erkrankungen (Näheres s. Kap. 5.2.3.3).

3 Haut, Integumentum commune und Anhangsgebilde: Drüsen, Glandulae; Haare, Pili, und Nägel, Ungues

Werner Linß

Die Haut ist ein lebenswichtiges Organ und hat beim Erwachsenen eine Gesamtoberfläche von 1,6 bis 2,0 m². Sie besteht aus der Oberhaut (Epidermis, aus dem Ektoderm entstammend) sowie der aus dem Mesoderm entstammenden Lederhaut (Dermis, Corium) und Unterhaut (Subcutis, Tela subcutanea). Zum Hautsystem, das regional beträchtliche Unterschiede aufweist, gehören auch die Haare, Nägel und Hautdrüsen.

Funktionen. Die der Haut zufallenden Aufgaben können bestimmten Strukturen zugeordnet werden. Die wichtigsten Funktionen der Haut sind:

- Schutz vor mechanischen, thermischen und chemischen Einwirkungen
- Schutz vor Strahlen
- Schutz vor Infektionen
- Barrierefunktion
- Thermoregulation
- Sinnesfunktion (Tastsinn, Schmerzsin, Temperatursinn)
- Sekretions- und Exkretionsfunktion

3.1 Oberhaut, Epidermis

Embryologie. Die Oberhaut geht aus dem ursprünglich einschichtigen Oberflächenektoderm hervor. Durch Proliferation wird zunächst eine zweite Zellschicht, das Periderm, gebildet. Vor allem im 2. und 3. Trimenon der Schwangerschaft erfolgt eine starke Dickenzunahme, die zur Ausbildung eines mehrschichtigen verhornten Plattenepithels führt. In der frühen Fetalperiode dringen aus der Neuralleiste stammende Melanoblasten mit Zellausläufern in die Epidermis ein. Noch vor der Geburt beginnen die Melanozyten mit der Produktion von Melanin, welches sie an die Epidermiszellen (Keratinocyten) abgeben. Die Menge des abgegebenen Melanins bestimmt die Hautfarbe.

Klinik: Die basalen Zellen der Epidermis teilen sich lebhaft und ersetzen so kontinuierlich die an der Oberfläche ständig abschilfernden Zellen. Die abgestoßenen Zellen bilden beim Fetten zusammen mit dem Produkt der Talgdrüsen (s.u.) die weißliche, käseartige **Fruchtschmiere**, Vernix caseosa, die ihn gegen die Amnionflüssigkeit schützt und unter der Geburt die Gleitfähigkeit erhöht. Bei Übertragung = Überschreiten des Geburtstermins ist gewöhnlich die Vernix caseosa reduziert.

Schichten der Epidermis. Nach der Geburt ist die Epidermis als typisches verhorntes Plattenepithel ausgebildet. Auf eine mitotisch aktive Basalschicht, **Stratum basale**, mit hochprismatischen Zellen folgt eine Schicht mit vielgestaltigen Zellen, die über Desmosomen miteinander verbunden sind und bei histotechnisch bedingter Schrumpfung zu Stachelzellen werden (**Stratum spinosum**). Da zwar dabei die Zellen kleiner werden, aber durch Desmosomen fest miteinander verbunden bleiben, treten Brücken zwischen den Zellen hervor. Stratum basale und Stratum spinosum werden als **Stratum germinativum** zusammengefasst. Als nächste Schicht schließt sich das **Stratum granulosum** an, dessen abgeplattete Zellen Keratohyalin granula enthalten. Durch Einlagerung von amorphem Material in den Interzellularraum wird die Passage von Wasser erschwert. Die Hornschicht (**Stratum corneum**) bildet den Abschluss zur Oberfläche. Während der Keratinisierung haben die Zellen ihren Kern verloren. In den obersten Lagen lösen sich die Desmosomen, und tote Hornschüppchen schilfern ab. Die Dicke der Epidermis variiert regional beträchtlich.

Hautarten. An Handfläche und Fußsohle ist die Hornschicht besonders mächtig, nur hier findet man dem Stratum granulosum benachbart ein

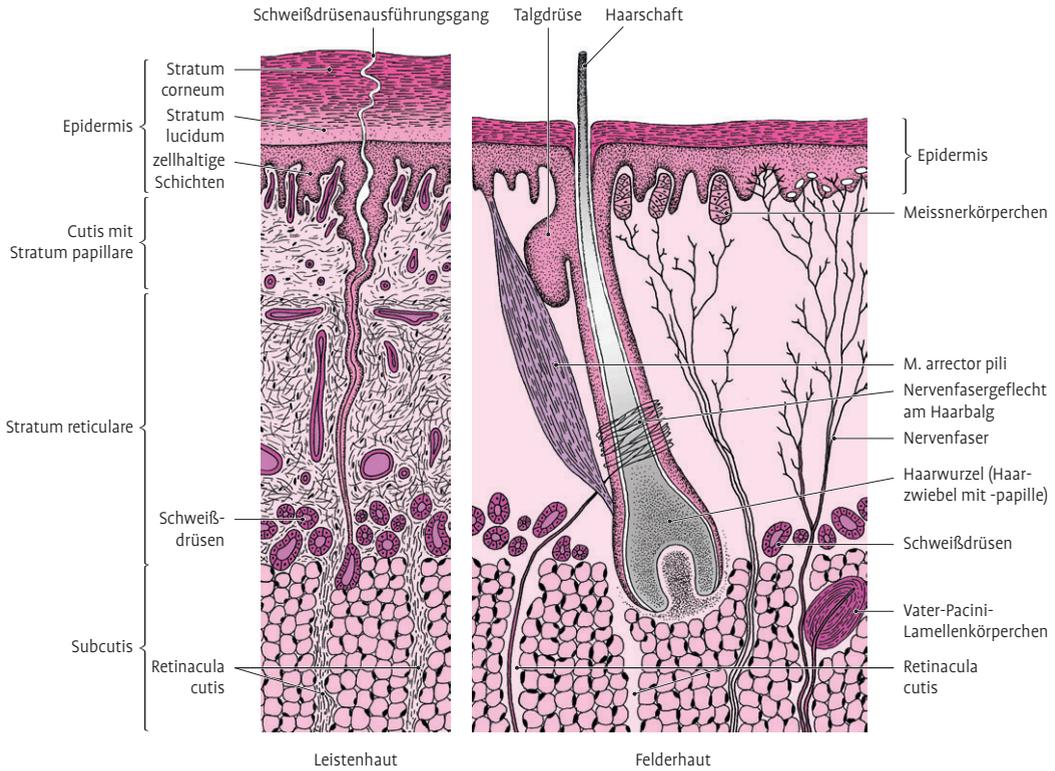


Abb. 3.1 Schematischer Aufbau der menschlichen Haut.

Stratum lucidum (Abb. 3.1 links). An der Oberfläche sind Leisten zu erkennen = **Leistenhaut**. Sie bilden charakteristische Muster aus, die personenspezifisch sind, sodass anhand der Fingerabdrücke eine eindeutige Identifikation jedes Menschen möglich ist (Daktyloskopie). Die Abbildung 3.2 zeigt typische Anordnungen der Papillarleisten als Bogen, Schleifen oder Wirbel an den Fingerbeeren. Die übrige Epidermis ist, hervorgerufen durch die Anordnung der elastischen und kollagenen Fasern in der darunter liegenden Lederhaut, in un-

terschiedlich geformte Areale gegliedert = **Felderhaut**. Zwar unterliegt auch an der Felderhaut die Dicke der Epidermis von Region zu Region beträchtlichen Schwankungen, jedoch wird nirgends ein Stratum lucidum ausgebildet (Abb. 3.1 rechts).

Klinik: Angeborene Störungen der Keratinisierung können zur **Ichthyosis** führen, ein Erkrankungsbild, bei dem durch stark überschießende Verhornung eine trockene und fischschuppenähnliche Haut vorliegt. Die Betroffenen leiden u.a. an Störungen der Wärmeregulation und an Rissbildungen der Haut, in die Bakterien leicht eindringen und Infektionen verursachen können.



Abb. 3.2 Papillarleistenmuster an Fingerbeeren: **a** Bogen, **b** Schleifen, **c** Wirbel.

3.2 Lederhaut, Dermis, Corium

Embryologie. Die Lederhaut entstammt dem Mesenchym, welches dem Oberflächenektoderm unmittelbar anliegt. Es ist entweder aus dem parietalen Blatt des unsegmentierten Seitenplattenmesoderms

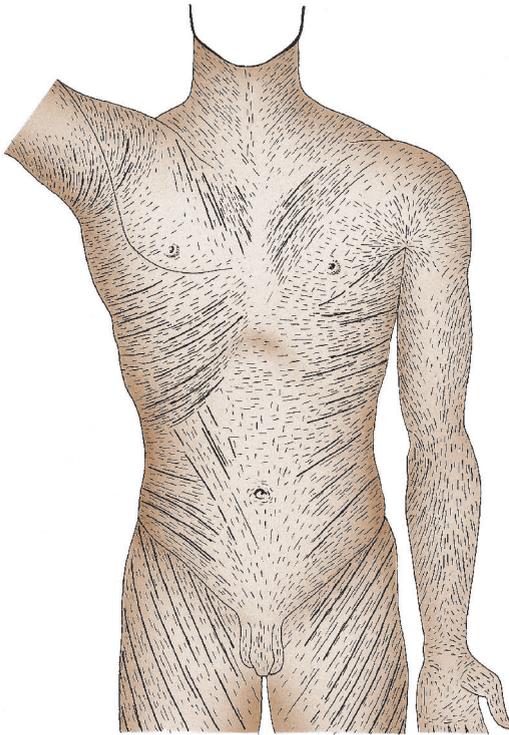


Abb. 3.3 Spaltlinien der Haut.

oder aus dem **Dermomyotom** der Somiten hervorgegangen.

An der Lederhaut werden 2 Schichten unterschieden, das epidermisnahe Stratum papillare und das Stratum reticulare (Abb. 3.1).

Stratum papillare. Es besteht aus einem relativ zellreichen lockeren Bindegewebe mit einem lockeren Geflecht aus kollagenen und elastischen Fasern, in dem Blut- und Lymphgefäße und Nervenfasern auch zur Versorgung der Epidermis verlaufen. Die Höhe des Stratum papillare ist regional sehr verschieden und korreliert positiv mit der jeweiligen mechanischen Belastung.

Stratum reticulare. Es ist zellärmer als das Stratum papillare und enthält ein Geflecht aus scherengitterartig angeordneten groben Bündeln kollagener und elastischer Fasern. Die Bündel sind entsprechend der Zugbelastung der Lederhaut ausgerichtet. Aus dieser Anordnung der Fasersysteme ergeben sich die **Spaltlinien** der Haut, die regional in bestimmter Weise angeordnet sind (Abb. 3.3). Die Masse der Faserbündel ist parallel zu den Spaltlinien ausgerichtet.

Klinik: 1. Wird die Haut parallel zu den Spaltlinien durchtrennt, so bleiben die Wundränder eng benachbart und können bei nachfolgender Naht gut adaptiert werden. Erfolgt die Schnitfführung senkrecht zu den Spaltlinien, so klaffen die Wundränder weit auseinander, bei der Wundnaht ist eine deutlich stärkere Sicherung erforderlich. Eine solche Schnitfführung birgt zusätzlich die Gefahr von Wundheilungsstörungen in sich. **2.** Die Elastizität der Lederhaut beruht auf ausreichendem Gehalt an elastischen und kollagenen Fasern sowie ungeformter Grundsubstanz, die durch ihr Wasserbindungsvermögen den Turgor bestimmt. Der Verlust von elastischen Fasern und von Grundsubstanz führt zur Runzelbildung der Haut (z. B. Altershaut), eine vermehrte Einlagerung von Flüssigkeit zur Schwellung (Ödembildung).

3.3 Unterhaut, Tela subcutanea, Subcutis

Embryologie. Die Unterhaut bildet sich erst in den letzten Wochen der Schwangerschaft durch die Entwicklung des Unterhautfettgewebes heraus, sodass die rundlichen Formen des Neugeborenen erreicht und Fettreserven angelegt werden. Bei Frühgeborenen ist in der Regel kein Unterhautfettgewebe vorhanden, sodass größere Gefäße durch die dünne Haut schimmern.

Stärke. Die Stärke des Unterhautfettgewebes variiert beim Erwachsenen von Region zu Region sehr stark. Während Epidermis und Dermis zusammen etwa 3 kg wiegen, schwankt die Masse der Unterhaut zwischen 10 und 20 kg und kann bei übergewichtigen Personen ein Mehrfaches davon betragen.

Lokalisation der Fettdepots. Sie ist bei den Geschlechtern verschieden; so liegt sie beim Mann bevorzugt am Bauch, bei der Frau auf der Hüfte, am Gesäß, an den Oberschenkeln und Oberarmen und an den Mammæ, wobei Rassenunterschiede zu beobachten sind.

Bau. Die Subcutis stellt ein **Kammerwerk** aus einzelnen Fettläppchen dar, die von Bindegewebssepten umhüllt werden. Diese Bindegewebssepten strahlen einerseits in das Stratum reticulare der Dermis ein und verbinden sich andererseits als **Retinacula cutis** (Haltebänder) mit den straffen Bindegeweben der Unterlage (z.B. Muskelfaszien,

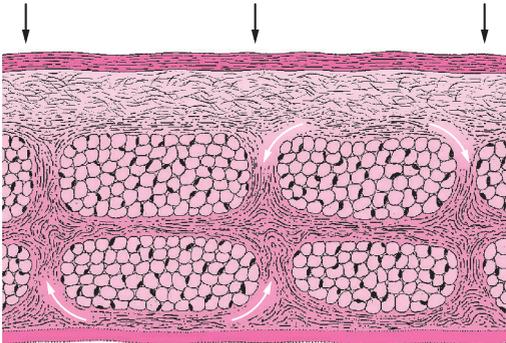
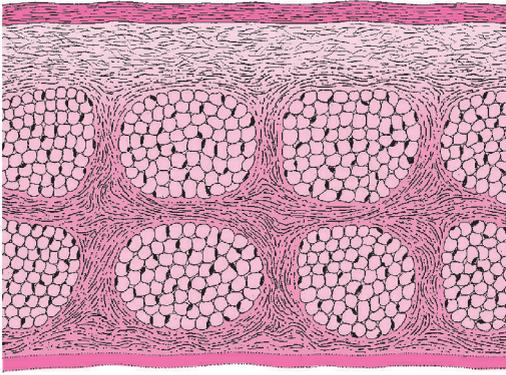


Abb. 3.4 Schema zur Belastbarkeit und elastischen Verformung des Unterhautfettgewebes. Oben: unbelastet, unten: querverformte Fettläppchen nach Belastung.

Sehnenplatten, Periost). Die Fettläppchen sind zugleich **Reservedepot** für Fett und Flüssigkeitsspeicher, in denen beträchtliche Mengen an Salzen und Wasser eingelagert sind. Diätetische und therapeutische Maßnahmen, die zu erhöhter Wasser- und Salzausscheidung führen, bewirken zwar einen raschen Gewichtsverlust; er ist aber nur von kurzer Dauer.

Wasserkissen. Da die Läppchen des Unterhautfettgewebes allseitig von straffem Bindegewebe umgeben sind, wirken sie bei Druckbelastung wie ein Wasserkissen. Sie werden durch Druck so verformt (Abb. 3.4), dass sie Zug auf das Stratum reticulare und auf ihre Unterlage ausüben und Druck von den darunter liegenden Strukturen fernhalten.

Septen. An Handteller und Fußsohle ist das Kamersystem durch eine stärkere Ausbildung der bindegewebigen Septen besonders für Druckbelastungen konstruiert. Die dort befindlichen Fettläppchen werden als „Baufett“ erst dann zur Energiegewin-

nung herangezogen, wenn das „Depotfett“ an anderen Körperstellen bereits abgebaut ist.

Klinik: Da in den Retinacula cutis die hautversorgenden Gefäße liegen, kommt es bei Dauerdruck zur Mangelversorgung der betroffenen Hautpartien, die bis zum Decubitus (Wundliegen) führen kann, d.h., alle Hautschichten gehen unter Geschwürbildung zugrunde.

3.4 Anhangsgebilde der Haut

3.4.1 Haare

Embryologie. In der 9. bis 12. Entwicklungswoche beginnt die Entwicklung der Haaranlagen in Form solider Epithelaussprossungen aus dem Stratum germinativum der Epidermis in die Dermis. Das Ende der Epithelaussprossung verdickt sich zum **Haarkolben**, dessen äußere Zelllage zur **Haarmatrix** wird. Durch proliferierendes Mesenchym aus der Umgebung entsteht die **Haarpapille**, auf der sich die **Haarzwiebel** (Bulbus pili) ausformt (Abb. 3.1 rechts). Durch mitotische Aktivität wächst aus ihr der **Haarschaft** hervor, der die Oberfläche der Felderhaut durchbricht. In der Haarpapille geben Melanozyten Melaningranula an die für den Aufbau des Haares neugebildeten Epithelzellen ab. Die Menge der eingelagerten Melaningranula bestimmt die **Haarfarbe**. Haare ohne Melaningranula sind weiß. Von der epithelialen Haaranlage leiten sich auch Talgdrüsen (s.u.) und der **Musculus arrector pili** (Abb. 3.1 rechts) ab, ein Bündelchen glatter Muskelzellen, das am Haarbalg und an der Epidermis ansetzt und bei Erregung die Haare aufrichten kann (**Gänsehaut**). Beim Haarwechsel wird die mitotische Aktivität an der Haarpapille eingestellt, der Haarschaft verliert den Kontakt zur Papille und wandert im Haarkanal zur Oberfläche. Da das in der Haut steckende Ende aufgetrieben ist, wird es als **Kolbenhaar** bezeichnet. Es verbleibt noch längere Zeit im Haarkanal. Die Anlage für das **Ersatzhaar** wird aus der Haarpapille gebildet. Es schiebt bei seinem Längenwachstum das Kolbenhaar im Haarkanal vor sich her, bis es ausfällt. Der feinere Aufbau des Haares wird in Lehrbüchern der mikroskopischen Anatomie beschrieben.

Wollhaare. Das Haarkleid des Menschen besteht zunächst perinatal aus feinen **Wollhaaren** (Lanugo), die bis auf Hand- und Fußfläche den gesamten Körper flaumartig bedecken. Das Wollhaarkleid wird individuell sehr unterschiedlich angelegt.

Terminalhaare. Im sekundären, endgültigen Haarleid kommen 2 Arten von **Terminalhaaren** vor. Es wird zwischen **Kurzhaaren** bzw. Borstenhaaren (Wimpern = Cilia, Augenbrauen = Supercilia, Haare am Eingang zur Nase = Vibrissae und zum äußeren Gehörgang = Tragi) und **Langhaaren** (Kopfhaare = Capilli, Barthaare = Barba, Schamhaar = Pubes, Achselhaare = Hirci) unterschieden. Die Lebensdauer der Terminalhaare differiert zwischen 100 und 150 Tagen bei den Kurzhaaren und 3 und 5 Jahren bei den Kopfhaaren, Letztere nehmen pro Tag etwa 0,5 mm an Länge zu. Die Ausbildung der Terminalbehaarung ist hormonabhängig, also bei Mann und Frau verschieden. Beim Mann ist neben dem Bartwuchs die Ausbildung einer dichteren Behaarung an Brust, Armen, Beinen und Rücken möglich. Genetische Anlagen spielen eine erhebliche Rolle.

Klinik: Veränderungen der Behaarung können ein Hinweis auf endokrine Erkrankungen sein.

3.4.2 Finger- und Zehennägel, Ungues

Embryologie

Primäres Nagelfeld. An den Endgliedern der Finger tritt ab der 10. Entwicklungswoche, an den Endgliedern der Zehen etwa 4 Wochen später dorsal eine Verdickung der Epidermis auf, das primäre Nagelfeld. Es wird von proximal her von einer Epithelfalte, dem **Nagelwall**, überwachsen. Durch Verhornung entsteht zunächst der **Vornagel**. Die Ausbildung des definitiven Nagels geht vom proximalen Ende des Nagelfeldes, der **Nagelmatrix**, aus. Von dort schiebt sich der Nagel nach distal vor und ist an den Fingern in der 32. Entwicklungs-

woche, an den Zehen 4 Wochen später an der Spitze der distalen Phalanx angelangt. Erreichen beim Neugeborenen die Nägel nicht die Kuppe der distalen Phalangen, so gilt dies als Zeichen für Unreife.

Reifer Nagel. Hier erfolgt das Wachstum von der an der Nagelwurzel gelegenen Nagelmatrix aus. Über das **Nagelbett** (Abb. 3.5) wird der Nagel als gewölbte Hornplatte ca. 0,1 mm pro Tag nach distal geschoben. Im Nagelbett ist das Stratum papillare sehr regelmäßig ausgebildet und gut durchblutet, was eine rosa Färbung hervorruft. Am proximalen Ende des Nagels hebt sich halbmondförmig die weißliche **Lunula** deutlich vom Nagelbett ab, sie stellt den distalen Teil der Nagelmatrix dar. Proximal wächst von der Nageltasche das verhornte Nageloberhäutchen (**Eponychium**) auf die Nagelplatte vor. Der seitliche Nagelrand ist unter dem **Nagelfalz** verborgen.

Funktion. Die Nagelplatte wirkt offensichtlich als Widerlager für die tastende Fingerbeere und ist über das Nagelbett mit gut ausgebildeten Retinacula am Knochen der Endphalanx verankert.

Klinik: Infektionen oder mechanische Verletzungen der Nagelwurzel können zu erheblichen Wachstumsstörungen oder Fehlbildungen des Nagels (z.B. Verkrümmungen) führen. Lunula und Nagelbett verfärben sich bei Sauerstoffmangel im Blut blau bzw. blauviolett, sodass bei Erkrankungen Rückschlüsse auf Durchblutung und Sauerstoffsättigung möglich werden. Eitrige Entzündungen am Nagelfalz dehnen sich mitunter auf das Nagelbett aus (**Panaritium subunguale**), das meistens chirurgisch behandelt werden muss.

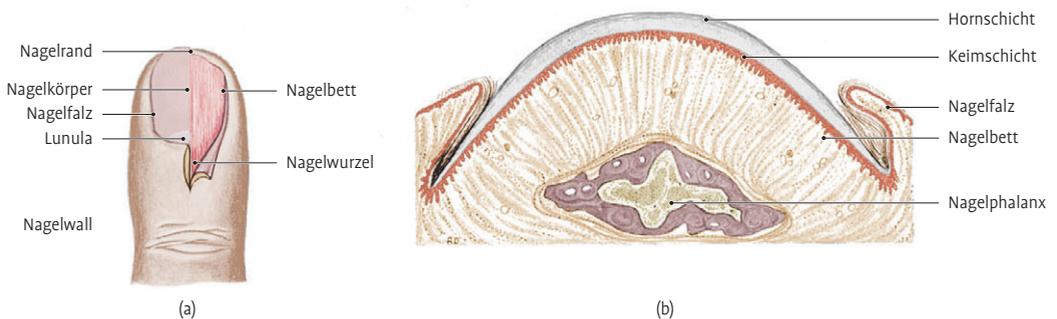


Abb. 3.5 Aufbau eines Nagels. **a:** Aufsicht mit (links) und ohne (rechts) Nagelkörper; **b:** Querschnitt.

3.4.3 Drüsen

Talgdrüsen, *Glandulae sebaceae holocrinae*

Embryologie. Zumeist entstehen Talgdrüsen aus epithelialen Knospen, die ihren Ausgang von der äußeren Wurzelscheide der Haare nehmen. Sie dringen in das umgebende Mesenchym ein und verzweigen sich.

Lokalisation. Die peripheren Abschnitte bilden alveoläre Endstücke, in denen durch holokrine Sekretion Talg gebildet wird. In den zentralen Anteilen gehen die im Inneren der Stränge liegenden Zellen zugrunde, sodass Ausführungsgänge entstehen, über die der Talg in den Haarkanal abgegeben wird. Auf ähnliche Weise werden an Übergängen zwischen Haut und Schleimhäuten freie Talgdrüsen gebildet (Lippen, Augenlid, Glans penis, Praeputium, Labium minus, Anus).

Funktion. Das holokrin gebildete Sekret = **Hauttalg** (Sebum) dient der Einfettung der Haut und der Haare. Die Talgsekretion ist hormonabhängig und wird durch Androgene stimuliert.

Klinik: 1. Der Ausführungsgang kann durch verhärtetes Sekret verlegt werden, sodass es zum Seketrückstau kommt. Bei Verschluss des Ausführungsganges entwickeln sich Retentionszysten, die mehrere cm Durchmesser erreichen können (**Atherome**) und chirurgisch entfernt werden müssen. **2.** Atypische Verhornung des Haarkanalepithels führt zur Bildung von Mitessern (**Komedonen**), die sich entzünden können (**Akne**). **3.** Komedonen sind Leit-effloreszenzen der **Akne vulgaris**, bei der große talgdrüsenreiche Areale betroffen sind (Gesicht, Rücken).

Kleine Schweißdrüsen, *Glandulae sudoriferae merocrinae*

Embryologie. Von der Epidermis wächst ein massiver Zellstrang in die Tiefe der Dermis. Er verdickt sich an der Dermis-Subcutis-Grenze und bildet Drüsenendstücke aus, aus denen sezernierende und myoepitheliale Zellen hervorgehen. Der solide Zellstrang zerfällt im Zentrum und wird zum Ausführungsgang.

Lokalisation. Die kleinen Schweißdrüsen sind über den gesamten Körper verteilt und münden an den höchsten Stellen der Epidermis sowohl der

Leisten- als auch der Felderhaut (Abb. 3.1). Mit 300 pro cm² erreichen sie im Handteller und an der Fußsohle ihre größte Dichte, während am Rücken nur 50 pro cm² vorhanden sind.

Funktion. Die kleinen Schweißdrüsen sind in die Thermoregulation eingebunden. Bei mittlerer Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit werden in 24 h 300 bis 500 ml Schweiß abgegeben, bei hoher Außentemperatur kann das Zwanzigfache und mehr erreicht werden. Im Schweiß sind u.a. Kochsalz und Harnstoff vorhanden. Starkes Schwitzen bedeutet einen erheblichen Verlust von Kochsalz und anderen Salzen, der unbedingt ersetzt werden muss. Die Schweißdrüsen können die Nieren entlasten, aber nicht ersetzen.

Große Schweißdrüsen oder Duftdrüsen, *Glandulae sudoriferae apocrinae*

Embryologie. Die Entwicklung ähnelt der der merokrinen Schweißdrüsen, jedoch nehmen die Epithelzapfen ihren Ausgang von Haaranlagen. Die Endstücke breiten sich ebenfalls an der Dermis-Subcutis-Grenze aus.

Lokalisation. Große Schweißdrüsen, Duftdrüsen, finden sich nur an einigen Prädilektionsstellen, deren Lage aus der Benennung zu entnehmen ist: Gll. ciliares, ceruminosae, vestibulares nasi, axillares, areolares mammae, circumanales; bei der Frau sind sie außerdem am Bauch, in der Leistenbeuge, am Mons veneris und am Labium majus ausgebildet. Ihre Ausführungsgänge münden stets etwas oberhalb der Talgdrüsen in einen Haarkanal ein.

Funktion. Die Duftdrüsen erreichen ihre volle Funktionsfähigkeit erst mit der Pubertät. Ihre Aktivität ist bei Frauen deutlich zyklusabhängig. Das alkalische, visköse Sekret wird unter sensiblen und emotionalen Reizen vermehrt abgegeben. Die Gll. axillares sind die am stärksten entwickelten Duftdrüsen und können als Axillarorgan präparatorisch dargestellt werden. Das Sekret enthält reichlich organische Bestandteile, die bei Zersetzung den personenspezifischen Körpergeruch wesentlich mitbestimmen.

Klinik: Durch eitrig-einschmelzende Entzündungen der Duftdrüsen entstehen **Schweißdrüsenabszesse**, wovon bevorzugt die Gll. axillares und ceruminosae betroffen sind. Nicht selten sind sie chronisch-rezidierend und bedürfen chirurgischer Behandlung.

Brustdrüse, Glandulamamma ia

Diese teils apokrine Drüse leitet sich ebenfalls aus der Epidermis ab. Aus Gründen der Zuordnung ihrer Blut-, Lymph- und Nervenversorgung sowie ihrer Topografie wird die Mamma im Kap. 4.2.2.2 besprochen.

3.5 Gefäße der Haut

Aufbau. Im Bindegewebe zwischen den Fettläppchen der Subcutis erreichen die versorgenden Arterien die Dermis und bilden an der Subcutis-Dermis-Grenze ein **großkalibriges Gefäßnetz**, das zahlreiche **arteriovenöse Anastomosen** mit dem ebenfalls dort liegenden grobmaschigen Venen-netz ausbildet.

Funktion. Werden die arteriovenösen Anastomosen geöffnet, so fließt das Blut durch die entsorgenden Venen innerhalb der Retinacula cutis rasch wieder ab. Werden sie geschlossen, so gelangt das Blut über aufsteigende Arterien in ein feinmaschiges Gefäßnetz an der Grenze zwischen Stratum papillare und Stratum reticulare. Auch hier sind arteriovenöse Anastomosen ausgebildet. Sind diese geschlossen, so gelangt das Blut vollständig in die Kapillarplexus im Stratum papillare, sodass maximale Blutmengen die Haut durchströmen und **Wärme** nach außen abgeben. Eine Steigerung der Wärmeabgabe erfolgt noch dadurch, dass bei maximalem Blutdurchfluss die Versorgung der Schweißdrüsen verbessert und über eine gesteigerte Schweißsekretion die Verdunstungskälte optimal wird.

Thermoregulation. Durch differenzierte Nutzung der arteriovenösen Verbindungen wird die Haut zum wichtigen Organ für die Thermoregulation. Die Gefäßnetze garantieren einen Blutz- und -abfluss zur Haut unabhängig von Faltenbildungen und kurzzeitigen Druckbelastungen. Langandauernder Druck auf die gleiche Stelle kann allerdings nicht bewältigt werden und führt zum **Decubitus**.

Epithellymphe. Im Interzellularraum der basalen Schichten der Epidermis entsteht die Epithellymphe, die in das Stratum papillare übertritt und dort von den Lymphkapillaren aufgenommen wird. Die größeren Lymphgefäße ziehen gewöhnlich zusammen mit den Venenstämmen durch die Retinacula cutis. Innerhalb der Cutis sind die Lymphgefäße netzartig verbunden, was die Ausbreitung von Entzündungen in der Haut begünstigt.

3.6 Hautnerven, Hautsinne

Entwicklung. Während der Frühentwicklung erfolgt durch die aussprossenden Spinalnerven eine **segmentale Innervation** der Haut. Mit der Ausbildung der Extremitäten, die mit der Entwicklung der Extremitätenknospen beginnt, werden aus den beteiligten Segmenten Anteile mit den zugehörigen Nerven verlagert.

Beim Erwachsenen sind demzufolge am Rumpf die entsprechenden sensiblen Innervationszonen = **Dermatome** gut gegliedert. Sie werden nach dem innervierenden Spinalnerven benannt (Beispiele: Th3, Th11). Die Dermatome am Arm, am Bein und in der Genitalanalregion folgen einer komplizierteren Ordnung (Abb. 3.6), da in den Innervationsbereichen des Plexus brachialis, des Plexus lumbalis und des Plexus sacralis entwicklungsbedingt Materialverschiebungen stattfinden.

Klinik: Aufgrund der engen Beziehungen zwischen dem vegetativen und dem sensiblen System können pathologische Zustände an inneren Organen Schmerzempfindungen in bestimmten Hautarealen, den **Head-Zonen**, auslösen.

Die Haut stellt mit 1,6 bis 2 m² Oberfläche das **größte Sinnesorgan** des Menschen dar, das eine große Zahl von Sinnesempfindungen wie Berührung, Druck, Vibration, Jucken, Schmerz, Wärme und Kälte wahrnimmt. Den Empfindungen steht eine große Mannigfaltigkeit von morphologisch unterschiedlichen **Nervenendigungen** gegenüber.

Nach der Morphologie werden unterschieden: freie Nervenendigungen, kapsellose Endkörperchen, eingekapselte Endkörperchen sowie zum vegetativen Nervensystem gehörende efferente Nervenfasern. Allerdings ist es bisher nicht gelungen, jeder dieser Strukturen eindeutig eine Empfindung zuzuordnen. Es ist durchaus vorstellbar, dass unterschiedliche Reizstärken am gleichen Rezeptor differente Empfindungen hervorrufen.

Freie Nervenendigungen sind in den basalen Schichten der Epidermis und in der Dermis nachzuweisen. Als sicher gilt, dass **Schmerz** von freien Nervenendigungen wahrgenommen wird, wobei Veränderungen des umgebenden Milieus den auslösenden Reiz darstellen. Freie Nervenendigungen im Hautbindegewebe werden als **Thermorezeptoren** diskutiert, wobei die **Wärmerezeptoren** mit ihrem Erregungsmaximum bei 40–42 °C und die

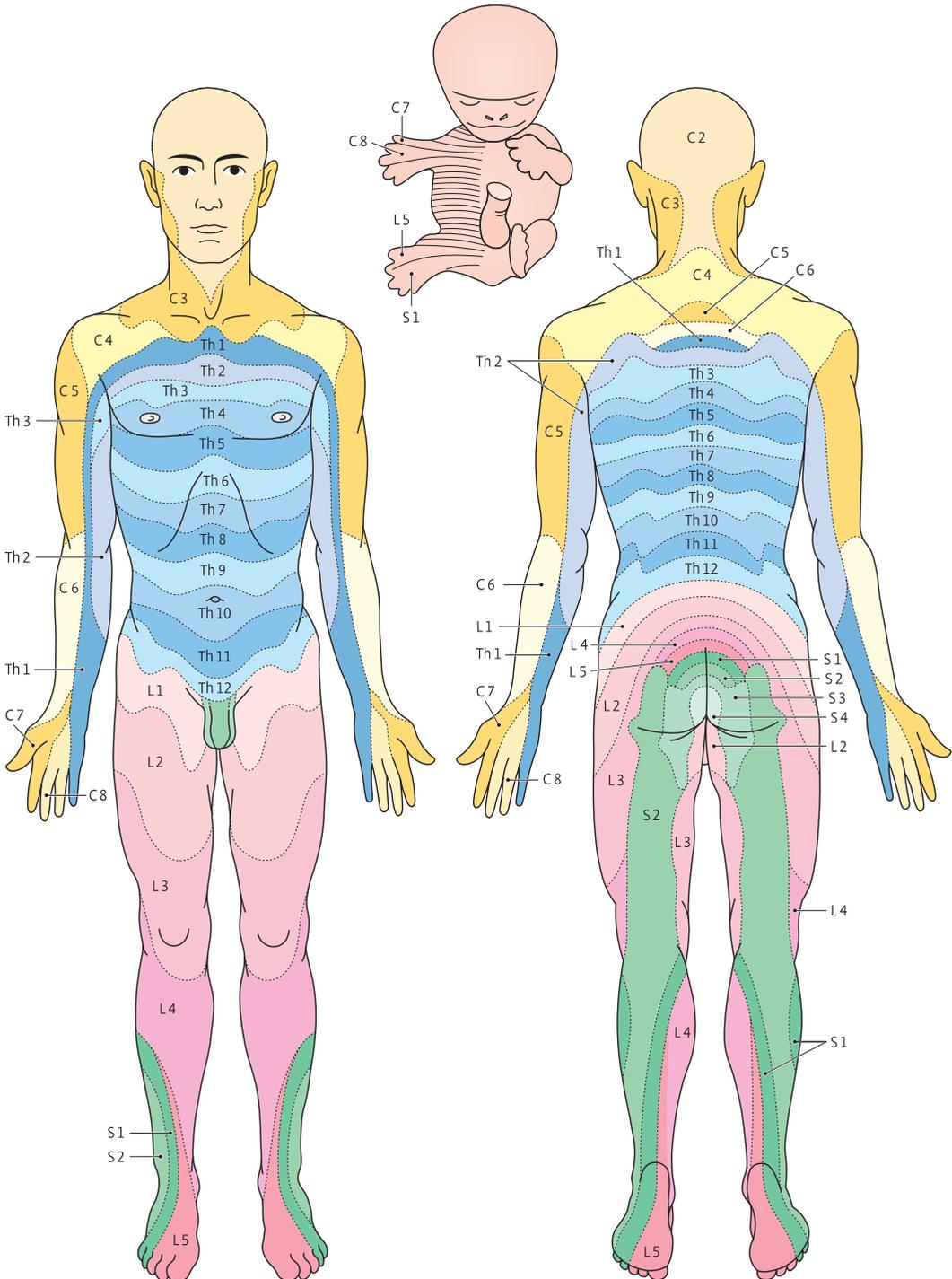


Abb. 3.6 Sensible Innervation der Haut. Beachte die Verschiebung der Dermatome an den Extremitäten.

Kälterezeptoren mit ihrem Erregungsmaximum bei 17–30 °C unterschiedlichen Endigungen zuzuordnen sind, was durch die Bestimmung der Kälte- und der Wärmepunkte objektiviert werden kann.

Nervengeflechte um die Haarwurzeln (Abb. 3.1 rechts) werden bei jeder Lageveränderung erregt, wobei die Haare als Reizverstärker dieser **Berührungsrezeptoren** wirken. Bei den Tasthaaren verschiedener Tiere ist dieses System besonders entwickelt und damit hochempfindlich. Es wird zur Orientierung im Raum herangezogen.

Kapsellose Endkörperchen. Merkel-Tastkörperchen liegen im Stratum basale und Stratum spinosum der Epidermis. Die nicht eingekapselten Merkel-Zellen entsenden Ausläufer zwischen die Epithelzellen und stehen basal über eine flache Synapse mit dem dendritischen Axon einer Spinalganglienzelle in Verbindung. Es sind **langsam adaptierende Mechanorezeptoren**.

Eingekapselte Endkörperchen. 1. Meissner-Tastkörperchen (Abb. 3.1 rechts) werden in den Papillen des Stratum papillare der Dermis gefunden. Die ovalen, von einer Kapsel umgebenen Endkörperchen sind ca. 50 µm breit und 100 µm lang. Im Inneren sind spezifische Schwann-Zellen keilförmig angeordnet, zwischen denen sich marklose Endigungen der Spinalganglienzellen ausbreiten. Sie vermitteln als schnell adaptierende Mechanorezeptoren Druck- und Berührungsempfindungen. **2. Vater-Pacini-Körperchen** (Abb. 3.1 rechts) sind

2–4 mm groß und liegen in der Subcutis und im angrenzenden Stratum reticulare der Dermis. Eine bindegewebige Kapsel umschließt den Außenkolben, der aus 50–70 lamellenförmig angeordneten Schalen von Bindegewebszellen besteht, die den Innenkolben, dessen zytoplasmatische Lamellen von Schwann-Zellen gebildet werden, einschließen. Im Innenkolben verzweigen sich die Endigungen des dendritischen Axons der Spinalganglienzelle. Es sind **schnell adaptierende Mechanorezeptoren**, die auch zur Wahrnehmung von Vibrationen befähigt sind. **3. Ruffini-Körper:** In einer Kapsel aus perineuralem Neuroepithel sind Kollagenbündel eingeschlossen. Sie werden in der Cutis, in Gelenkkapseln und im Peridontium gefunden. Es sind **langsam adaptierende Dehnungsrezeptoren**. **4. Krause-Endkolben** gehören zu den kleinen Lamellenkörperchen. Die von einer Kapsel umgebenen 0,5 mm dicken und 1–2 mm langen Gebilde, die im Stratum reticulare der Haut, aber auch an anderen Stellen wie in Gelenken und Kapseln von Organen vorkommen, gelten als **schnell adaptierende Mechanorezeptoren**.

Efferente Nervenfasern. Zum vegetativen Nervensystem gehören die efferenten Nervenfasern zur Versorgung der Blutgefäße, der Drüsen und der Mm. arrectores pilorum. Sie lösen das Erröten und Erblässen der Haut, die Schweißbildung und die Bildung einer Gänsehaut aus und stehen damit im Dienst der **Thermoregulation**. Sie erreichen zu meist mit den Arterien ihr Innervationsgebiet.

4 Bewegungsapparat

Johannes Streicher, Michael L. Pretterklieber

Der Bewegungsapparat besteht aus passiven (Knochen, Knorpel, Bänder und Gelenke) und aktiven Elementen (Muskeln), die im Zusammenspiel sowohl statische (Stütze und Schutz) als auch dynamische Funktionen erfüllen. Bis zum Erwachsenenalter wächst und entwickelt sich der Bewegungsapparat augenscheinlich, jedoch findet auch danach ein permanenter Umbau im Sinne einer physiologischen Anpassung an Belastungs- und Bewegungsbeanspruchungen statt. Scheinbar unveränderliche Knochen unterliegen in mikroskopischem Umfang ständigem beanspruchungsgetriebenem Auf- und Abbau, der über längere Zeiträume in deutlichen makroskopischen Veränderungen resultieren kann. Der Knochenstoffwechsel wird gleichzeitig auch hormonell kontrolliert und inkludiert die Funktion als Kalziumdepot. Defekte des Knochengewebes können vollwertig regeneriert werden, während alle anderen Gewebe des Bewegungsapparates von Natur aus nur minderwertig durch Narbengewebe repariert werden können.

Im Folgenden werden zuerst die allgemeinen anatomischen Prinzipien von Knochen, Gelenken und Muskeln (Osteologie, Arthrologie und Myologie) behandelt, danach die spezielle Anatomie des Rumpfes und der Gliedmaßen systematisch und topografisch erläutert. Der Bewegungsapparat von Kopf und Hals wird aus didaktischen Gründen im Zusammenhang mit den Eingeweiden in Kapitel 5 besprochen, jener des Beckens in Kapitel 5.3. Das Zwerchfell und die Biomechanik des Thorax werden im Sinne der Atemmechanik gemeinsam mit den Organen der Brusthöhle in Kapitel 5.1 behandelt.

4.1 Allgemeine Knochen-, Gelenk- und Muskellehre

4.1.1 Osteologie, allgemeine Knochenlehre

Das Skelett des erwachsenen Menschen besteht aus ca. 206 Knochen, wobei diese Zahl aufgrund einer unterschiedlichen Anzahl von Kleinknochen individuell leicht variiert. Die Knochenform ist teils genetisch, teils epigenetisch bestimmt. Während der Embryonalentwicklung wird die Mehrzahl der Knochen durch Knorpelmodelle vorgeformt, welche dann durch Knochenmaterial ersetzt werden (**chondrale Ossifikation**). Alternativ werden viele Knochen des Schädels jedoch direkt aus Bindegewebe gebildet (**desmale Ossifikation**). In der Folge passt sich der Knochen nur noch den Belastungen an. Knochen sind als aus mehreren Geweben aufgebaute Organe zu verstehen.

4.1.1.1 Knochenarten

- **Geflechtknochen** oder **Faserknochen** ist die weniger spezialisierte Form des Stützgewebes. Es handelt sich um eine Art verknöchertes Bindegewebe. Unter andauernder Zug- und Druckbelastung wandeln sich die Mesenchymzellen in Osteoblasten um und sondern **Osteoid** (Knochengrundsubstanz und Kollagen) ab, welches verkalkt. Bei jeder primären Knochenbildung entsteht zunächst Geflechtknochen. Bei einer Bruchheilung wird auch beim Erwachsenen zunächst dieser Knochentyp gebildet. Der festeste Knochen des Menschen, die Pars petrosa (petros = der Fels) des Schläfenbeins, besteht zeit lebens aus Geflechtknochen.
- **Lamellenknochen** hat eine um ein Vielfaches höhere Festigkeit in bestimmten Richtungen. Er ist komplizierter gebaut, die Baueinheit ist das

Osteon. Es handelt sich um konzentrische Knochenlamellen, wobei die ineinander geschichteten parallelfasrigen Lamellen kreuzweise angeordnet sind und durch eine Kittsubstanz verbunden werden (Sperrholzprinzip). Im Zentrum liegen jeweils Gefäße und ein Nerv in einem Kanal (**Havers-Kanal**). Die Kanäle kommunizieren durch quere Kanäle (**Volkman-Kanäle**). Dieses Kanalsystem ist Ausdruck einer komplexen und empfindlichen Mikrozirkulation. Durch die ständigen Umbauvorgänge bleiben Reste von Osteonen zwischen neu gebauten liegen (**Schaltlamellen**). Innen wird der Knochen gegen das Knochenmark durch innere, nach außen gegen die Beinhaut durch äußere **General-lamellen** abgeschlossen (Abb. 4.1).

4.1.1.2 Aufbau eines Knochens

Bestandteile. Folgende Gewebe bauen das Organ „Knochen“ auf:

- **Knochengewebe, Pars ossea**, ist Hauptträger der mechanischen Aufgaben und tritt in zwei Formen in Erscheinung: einerseits als solides Knochengewebe, **Substantia compacta**, andererseits als schwammartige **Substantia spongiosa sive trabecularis** mit Bällchenstruktur und Zwischenräumen (gewichtsparende „Leichtbauvariante“). Bildet die Substantia compacta eine rindenartige Außenzone, wird sie als **Substantia corticalis** bezeichnet.
- **Bindegewebe, Pars membranacea**, überzieht als **Beinhaut, Periosteum**, Teile der Knochenaußenfläche und dient der Regeneration, der nervösen und der vaskulären Versorgung. Über **Sharpey-Fasern** vermittelt das Periost die Verbindung von Sehnen und Bändern mit der Pars ossea (Abb. 4.1). Sind Hohlräume im Inneren eines Knochens vorhanden, sind diese ebenfalls mit Bindegewebe, **Endosteum**, ausgekleidet.
- **Knochenmark, Medulla ossium**, füllt die inneren Hohlräume der Knochen aus. Das Knochen-

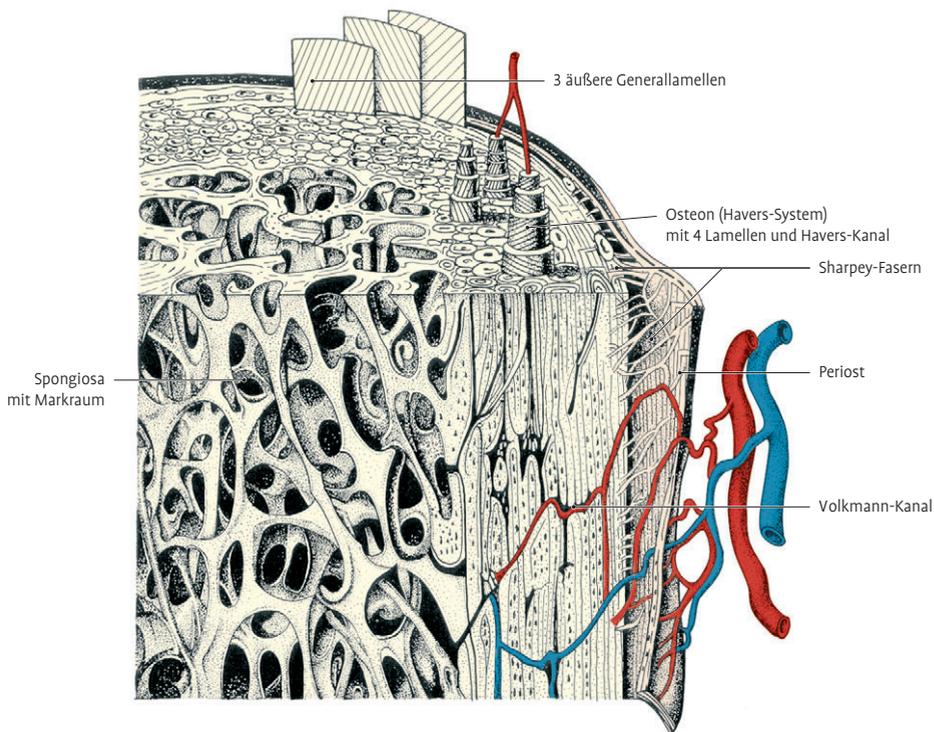


Abb. 4.1 Schema zum Bau eines Knochens (in Anlehnung an A. Benninghoff). 3 Osteone und 3 Generallamellen sind aus der Oberfläche herausragend gezeichnet, um die differente Anordnung der kollagenen

Fasern in benachbarten Lamellen zu demonstrieren. Vom Periost ziehen Sharpey-Fasern und Blutgefäße in den Knochen. Die Ernährung erfolgt auch aus den Markraumgefäßen.

mark kann entweder blutbildend und rot gefärbt, **Medulla ossium rubra**, oder fetthaltig und gelb gefärbt, **Medulla ossium flava**, sein.

- **Knorpelgewebe, Pars cartilaginea**, überzieht (so weit vorhanden) die Gelenkflächen der Knochen.
- **Versorgende Blutgefäße und Nerven**

Konstruktion. Äußere Form und innerer Aufbau des Knochens sind den mechanischen Aufgaben angepasst. Die Konstruktion orientiert sich mittels der Trabekelbauweise (Knochenbälkchen) nach Druck- und Zugtrajektorien. Dabei wird die Knochensubstanz so angeordnet, dass bei geringstem Materialaufwand die auftretenden Kräfte bestmöglich aufgefangen und übertragen werden können. (Abb. 4.2). Durch diese Leichtbauweise können Körpergewicht und Muskelkraft für die Bewegung gespart werden.

Die Gestalt ist in ihrer Anlage genetisch bestimmt und wird unter äußeren Einflüssen (mechanische Kräfte, Schwerkraft) modifiziert. Die Regulation erfolgt durch Feedback-Mechanismen u. a. auf zellulärer Ebene durch piezoelektrische Phänomene. Günstig ist demnach eine mit Entspannungsphasen alternierende Belastung. Kommt es zu einer langsamen Änderung der Beanspruchung (im Rahmen der motorischen Entwicklung), kann sich die Konstruktion des Knochens funktionell anpassen (Transformationsgesetz nach Roux) (Abb. 4.3).

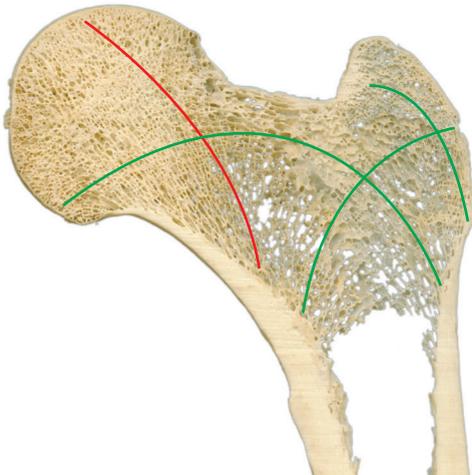


Abb. 4.2 Knochenscheibe des proximalen Femoralabschnitts. Verteilung und Orientierung der Spongiosa (Trajektorien) sind Kennzeichen der funktionellen Anpassung an die Belastung (Spannungslinien). Exemplarisch sind Drucklinien (rot) und Zuglinien (grün) eingezeichnet

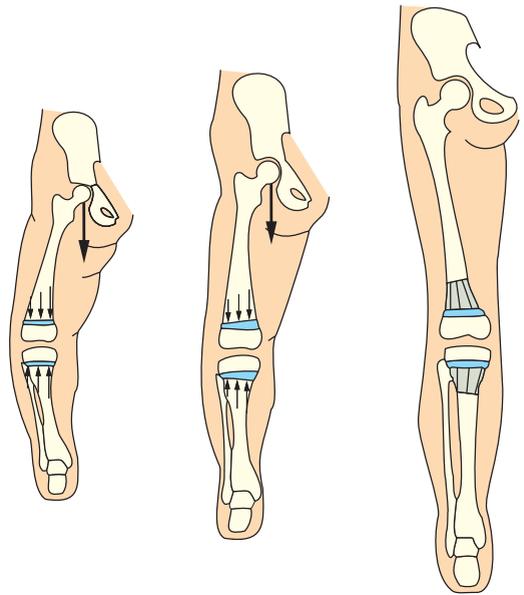


Abb. 4.3 Der Säugling hat physiologischerweise O-Beine (links). Mit Beginn des Standes entsteht eine Biegebelastung, die die distale Epiphysenfuge des Femurs und die proximale Epiphysenfuge der Tibia medial mehr als lateral unter Druck setzt (Mitte). Reaktiv wächst der Epiphysenfugenknorpel daher medial stärker und erzeugt so die physiologische X-Stellung (rechts).

Klinik: 1. Atrophie. Knochen, der nicht mechanisch beansprucht wird, verschwindet durch Apoptose und die Aktivität der Osteoklasten. Beispiele sind Verschwinden von überschüssigem Kallus und überstehendem Knochen nach erfolgter Frakturheilung, Osteoporose der Astronauten, Knochenabbau bei Nichtgebrauch durch Schmerzen, Ruhigstellung oder Lähmung als sog. Inaktivationsatrophie. Auch unter dem Druck benachbarter Weichteile (pulsierender Gefäße, Tumoren) kann es zu Bildung von Rillen und Dellen führender Atrophie kommen.

2. Hyperplasie. Umgekehrt wird Knochensubstanz unter vermehrter lokaler Beanspruchung angebaut: Brückenkallus, subchondrale Sklerose bei Arthrose, Spornbildung, Osteophyten bzw. Randwulste bei Spondylose, nach Umstellungsosteotomien. **3. Ermüdungsbruch bzw. schleichende Fraktur.** Bei inadäquater Belastung kann es zur Materialermüdung kommen.

Gefäßversorgung. Knochen werden über **Vasa nutriticia** (ernährende Gefäße) versorgt. Diese treten an wenigen Stellen in den Knochen ein. Sie verteilen sich mit einem endostalen Netzwerk, das zentrifugal und transkortikal den Knochen von innen nach außen versorgt. Der Blutfluss ist langsam und erfolgt nur mit geringem Druck. Die Eintrittsstellen der Gefäße, **Foramina nutriticia**, liegen an Stellen mit geringer Abknickungsgefahr, bei Röhrenknochen daher meist im Schaftbereich. Ist das endostale nutritive Netzwerk gestört (Thrombose, endarterielle Erkrankungen, Knochenmarksaufbohrung), muss das Periost vermehrt zur Ernährung beitragen. Aus dem spongiösen Bereich wird das Blut schnell und effektiv über regionale oberflächliche und tiefe Venen abgeführt. Der periostale Venenplexus erhält sein Blut aus den intrakortikalen Kapillargefäßen an der Knochenoberfläche und führt es über portale Gefäße in die Venen der umgebenden inserierenden Muskeln ab.

4.1.1.3 Knochenformen

Nach dem äußeren Erscheinungsbild unterscheiden wir 6 Grundformen: *Ossa longa*, *Ossa brevia*, *Ossa plana*, *Ossa pneumatica*, *Ossa irregularia* und *Ossa sesamoidea*.

- **Ossa longa.** Lange oder Röhrenknochen sind lange Knochen der Gliedmaßen. Sie bestehen aus einem Mittelstück, dem Schaft, **Diaphyse**, und 2 verdickten Enden, den **Epiphysen**. Die Diaphyse besitzt eine kompakte, lamellär aufgebaute Außenwand, **Kortikalis**. Sie umschließt den Markraum, **Cavitas medullaris**, in dem sich während der Entwicklung rotes, blutbildendes Knochenmark und beim Erwachsenen gelbes Fettmark befindet. Die röhrenförmige Konstruktion der Diaphyse verbindet optimal hohe Trag- und Biegefestigkeit mit geringem Materialaufwand und Gewicht. Die Epiphysen besitzen nur eine dünne Kortikalis und sind im Inneren aus *Substantia spongiosa* aufgebaut, in deren Maschen oft auch beim Erwachsenen blutbildendes Knochenmark vorhanden ist. Die Knochenbälkchen sind nach Druck- und Zugkräften angeordnet (Abb. 4.2). Zwischen Dia- und Epiphyse liegt jeweils die **Metaphyse**. Sie entspricht der Zone des Längenwachstums (Wachstumsfuge, **Epiphysenfuge**). Ein Röhrenknochen ist an seinen **Epiphysen** teilweise von Gelenkknorpel und sonst von Periost bedeckt.

- **Ossa brevia.** Kurze Knochen sind z. B. Hand- und Fußwurzelknochen. Die kurzen Knochen besitzen, wie die Epiphysen der Röhrenknochen, eine Kortikalis und eine mit Knochenmark ausgefüllte *Spongiosa*. Die *Spongiosabälkchen* zeigen eine belastungsorientierte Ausrichtung.
 - **Ossa plana.** Platte Knochen sind Brustbein, Rippen, Schulterblatt, Hüftbein und Knochen des Schädeldaches. Die platten Knochen bestehen aus einer äußeren und inneren kortikalen Wand, **Lamina externa** und **interna**, die eine unterschiedlich dicke *Spongiosa* umschließen. Im Bereich des Schädeldaches wird sie als **Diploë** (Doppeltafel) bezeichnet. Im dünnen Teil des Schulterblattes fehlt die *Spongiosa* aus phylogenetischen Gründen.
 - **Ossa pneumatica.** Lufthaltige Knochen sind Sieb-, Keil-, Stirnbein, Oberkiefer sowie *Processus mastoideus* und *Cavum tympani*. Die lufthaltigen Knochen (pneumatisierte Knochen) besitzen mit Schleimhaut ausgekleidete Hohlräume (Nasennebenhöhlen, Mittelohr). Diese Hohlräume kommunizieren mit der Umwelt und können so belüftet und dem Umgebungsdruck angepasst werden, bzw. vermeiden so ihre Evakuierung.
 - **Ossa irregularia.** Zu diesen Knochen zählt man diejenigen, die keiner der anderen Grundformen entsprechen, z. B. Wirbelknochen.
 - **Ossa sesamoidea.** Sesambeine besitzen eine rundliche, abgeflachte Form, sind biomechanisch bedingt, erfüllen Hebel- und Zugkraft-Umlenkfunktionen und sind typischerweise an besonders druckbelasteten Stellen in Sehnen eingeschaltet. Das größte Sesambein ist die Kniescheibe, **Patella**, kleine Sesambeine ergänzen in individuell variabler Anzahl das Hand- und Fußskelett.
- Über diese Grundformen hinaus, sind die einzelnen Knochen durch weitere funktionsangepasste reliefbildende Details individuell typisch gestaltet. Für den Ansatz und Ursprung von Sehnen und Bändern und als Verstärkungen dienen Vorsprünge (**Apophysen**) in Form von Höckern (**Tubercula**, **Tubera**), Leisten (**Cristae**), Dornen (**Spinnae**), Fortsätzen (**Processus**) und Rauigkeiten (**Tuberositates**). Löcher (**Foramina**), Kanäle (**Canales**), Vertiefungen (**Impressiones**), Rinnen (**Sulci**), Gruben (**Fossae**, **Foveae**) und Einschnitte (**Incisure**) entstehen im Wechselspiel mit Nerven und Gefäßen.

Klinik: 1. Die Leichtbauweise der Knochen führt zu höherer **Frakturgefährdung** bei Gewalteinwirkung aus unphysiologischer Richtung. Gewaltsame Verdrehung (Skiunfälle) führt zu **Torsionsbrüchen**. **2.** Anzahl und Stärke der Trabekel sind Parameter der Bruchfestigkeit und für **Osteoporose**-Untersuchungen relevant. Die Rarifizierung der Knochenbälkchen korreliert jedoch nicht direkt mit einer erhöhten Bruchgefahr, da sich die verbleibenden Bälkchen verstärken können. Sind die Trabekel überbelastet, treten durch Mikrofrakturen Schmerzen auf (**Ermüdungsbruch, Marschfraktur**). **3.** Für Knochenmarksdiagnostik und Transplantationen wird rotes Knochenmark aus den Spongiosamaschen durch **Sternalpunktion** bzw. **Beckenkammpunktion** entnommen.

4.1.1.4 Knochenentwicklung und Knochenwachstum

In der Ontogenese können sich Knochen auf zwei Arten entwickeln:

- **Desmale (direkte) Osteogenese.** Die Knochenbildung erfolgt direkt ohne Zwischenstufen aus dem mesenchymalen Bindegewebe.
- **Chondrale (indirekte) Osteogenese.** Ein Modell des Knochens wird aus Knorpelgewebe angelegt und sekundär durch Knochengewebe ersetzt (**Ersatzknochen**). Dabei kann die im Knorpelinneren beginnende **enchondrale Osteogenese** entweder in Form sogenannter **Knochenkerne** (bei Röhrenknochen in den Epi- und Apophysen) oder im Bereich der Epiphysenfuge am Übergang zur Diaphyse erfolgen. Im Schaftbereich findet die **perichondrale Osteogenese** statt, bei der von außen her Knochengewebe schichtweise aufgelagert wird (Abb. 4.4, 4.5).

Während die anatomische Struktur des Knochens genetisch festgelegt ist, ist der wichtigste Faktor für das Knochenwachstum die (physiologische) mechanische Beanspruchung (Druck). Ohne sie (z. B. bei Lähmungen) ist das Wachstum erheblich reduziert. Epiphysenfugen orientieren sich in der Proliferation senkrecht zur Hauptbelastung (Abb. 4.3).

Die Form eines Knochens ist genetisch festgelegt; der wichtigste Faktor für sein Wachstum ist die mechanische Beanspruchung.

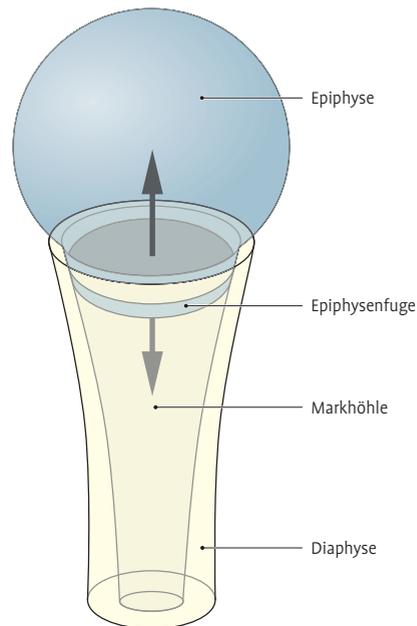


Abb. 4.4 Schematische Darstellung des Knochenwachstums zur Verdeutlichung des Mechanismus zum Längengewinn durch Knorpelzellteilung in der Epiphysenfuge. Die laterale Einengung durch die diaphysäre Knochenmanschette lässt den neuen Zellen nur in Längsachse des Knochens Platz.

Außerdem werden 2 Formen des Knochenwachstums unterschieden, nämlich Längenwachstum, ausgehend von den Epiphysenfugen, und Dickenwachstum, welches durch äußere Anlagerung von Knochengewebe erfolgt. Die Knochen wachsen unterschiedlich lange. Lediglich die Gehörknöchelchen haben bei der Geburt bereits ihre endgültige Größe erreicht. Die letzten Epiphysenfugen, die sich schließen und das Ende des Längenwachstums markieren, sind die distalen Epiphysen von Ulna und Femur (18.–20. Lebensjahr) und die der Apophyse des Tuberculum majus humeri (20.–25. Lebensjahr).

Klinik: 1. Eine dauernde Mehrdurchblutung stellt einen erheblichen Wachstumsstimulus dar. So kann eine Monate oder Jahre dauernde **Hyperämie** (Entzündung, Angiom) im Bereich der Epiphysenfugen der Röhrenknochen eine therapiebedürftige Längenzunahme bewirken. **2.** Die Ossifikation vieler platter Knochen (insbesondere des Schädels) verläuft desmal und kann isoliert gestört sein (**Dysostosis cleidocranialis**).

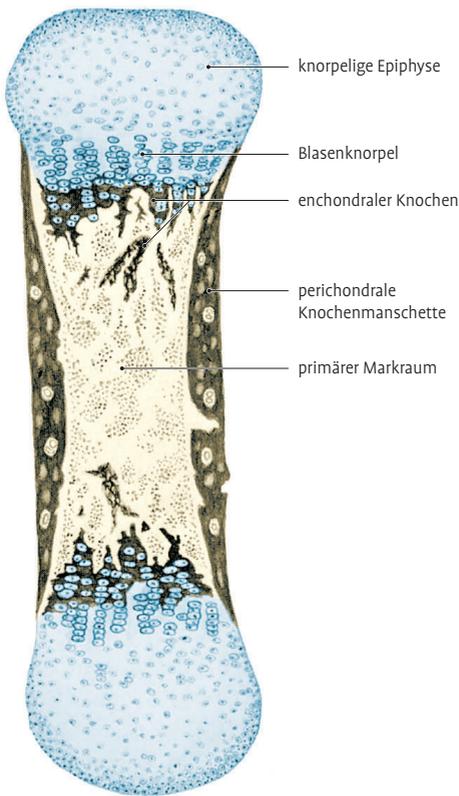


Abb. 4.5 Perichondrale und enchondrale Ossifikation eines Röhrenknochens.

4.1.1.5 Apophysen

Apophysen sind vorzugsweise an Röhrenknochen auftretende **Knochenvorsprünge** mit wesentlicher mechanischer Bedeutung. Zumeist dienen sie als Hebel für eine günstigere Kraftentfaltung der ansetzenden Muskeln oder sind eine eigens eingerichtete Knochenverstärkung für die durch die Muskelinsertion bedingte lokale Zugbelastung.

Entwicklung. Die Vorstellung, dass sich diese Vorsprünge erst durch die Tätigkeit des Muskels entwickeln, wie es beispielsweise bei dem Proc. mastoideus und dem M. sternocleidomastoideus beobachtet werden kann, trifft nicht zu. Vielmehr handelt es sich um **selbstständige Knochenkerne ähnlich den Epiphysen**. Die Knochenkerne entsprechen einem gemeinsamen Zentrum von Druck- und Zugspannungslinien eines unter Bie-

gekräften stehenden Knochens (Theorie der kausalen Histogenese nach Pauwels). Bemerkenswert ist, dass die Knochenkerne teilweise erst im 2. Lebensjahrzehnt auftreten. Die Verschmelzung mit der Epiphyse findet entsprechend ebenfalls spät statt, z. B. bei der proximalen Humerusapophyse erst im 3. Lebensjahrzehnt. In einigen Fällen sind es eigene Knochenkerne in den Epiphysen. So besteht die distale Humerusepiphyse neben dem Capitulum und der Trochlea aus 2 weiteren Epikondylenkernen. Apophysen tragen häufig eigene Namen, nicht selten nach ihrer Form, z. B. Coracoid, Acromion, Trochanter. Auch hinter einer Rauigkeit kann sich eine Apophyse verbergen (Tuberositas tibiae).

Varianten. Die **Apophysis anularis**, die Randleiste der Wirbelkörper, ist eine Sonderform. Sie verknöchert nicht wie üblich enchondral, sondern perichondral (desmal). Es handelt sich bei ihr um die ringförmige Verknöcherung der ansonsten knorpeligen Wirbelkörperepiphyse, die mit dem übrigen Wirbelkörper bis zum 18. Lebensjahr verschmilzt. In diesem Bereich bleibt zeitlebens ein hohes Wachstumspotenzial erhalten, das sich in teilweise extremer Osteophytenbildung (**Spondylophyten**) in höherem Alter äußern kann.

Klinik: Apophysen sind nicht selten Lokalisation juveniler aseptischer Knochennekrosen (z. B. für die Tuberositas tibiae **Morbus Osgood-Schlatter**), Erkrankungen mit mechanischer Insuffizienz und konsekutiver Destruktion der Knochenstruktur der betroffenen Gebiete.

4.1.1.6 Biomechanik von Knochen

Die Biomechanik befasst sich mit den Reaktionen lebenden Gewebes auf mechanische Kräfte. Dabei können innere und äußere Kräfte das Wachstum, den Umbau, die Regeneration und den Stoffwechsel von Zellen beeinflussen.

Beanspruchung. Die Beanspruchung eines Knochens ergibt sich aus der auf ihn einwirkenden Muskelkraft und äußeren Belastungen. Solche Kräfte führen zu Spannungen und damit zu elastischen, mikroskopisch sichtbaren Verformungen. Diese Wirkung der Kräfte nennt man Beanspruchung. Sie drückt sich in den Gegenkräften des