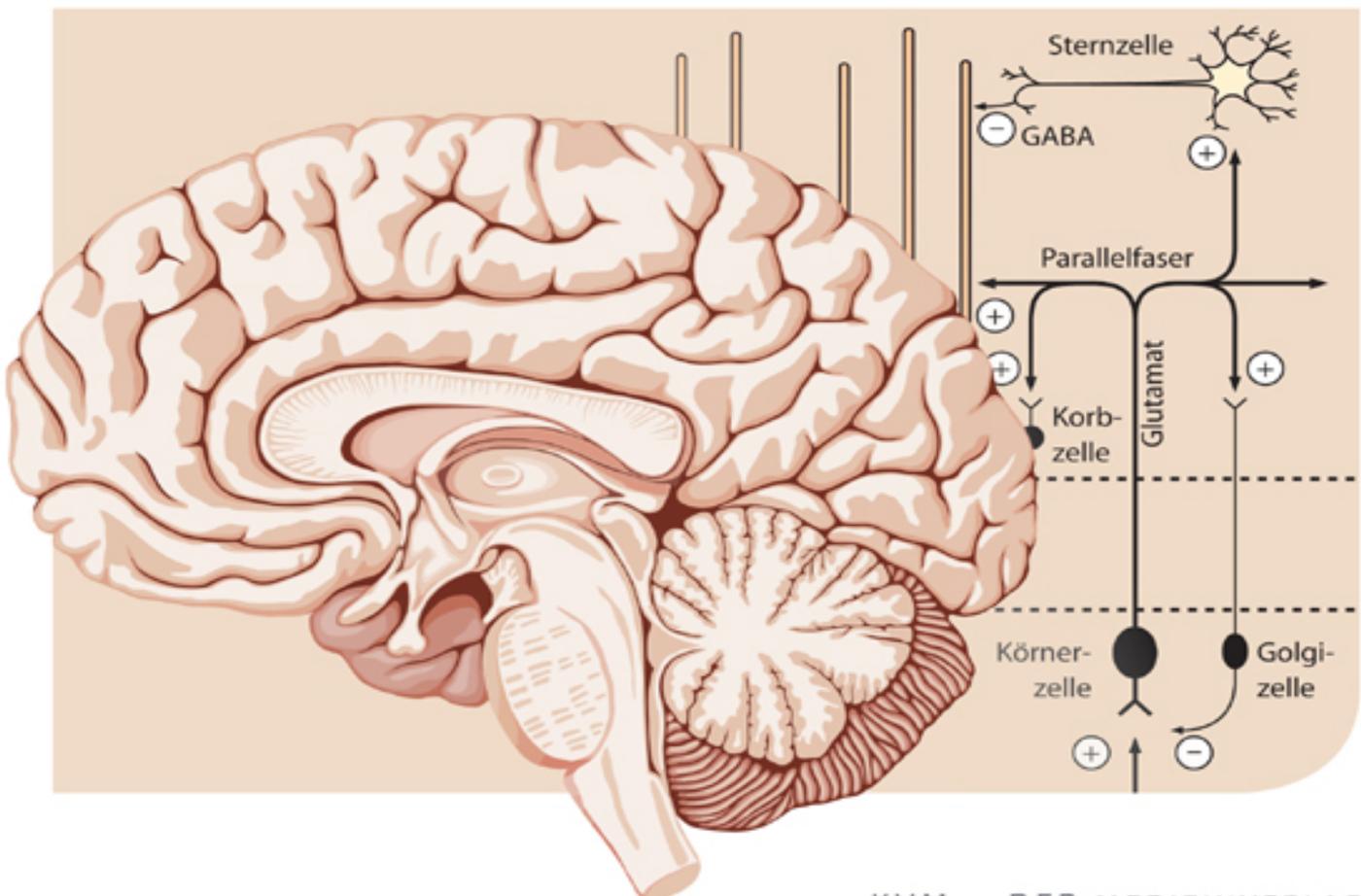


MARKUS KIPP
KALINKA RADLANSKI

NEUROANATOMIE

NACHSCHLAGEN
LERNEN
VERSTEHEN

2. AUFLAGE



NEUROANATOMIE

NACHSCHLAGEN

LERNEN

VERSTEHEN

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

Anschrift des Verlags

KVM – Der Medizinverlag
Dr. Kolster Verlags-GmbH
Ifenpfad 2-4, 12107 Berlin

Korrespondenz per E-Mail:

info@kvm-verlag.de

Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. Markus Kipp

Anatomische Anstalt der Ludwig-Maximilians-Universität München
Lehrstuhl II – Neuroanatomie
Pettenkoferstraße 11, 80336 München
E-Mail: markus.kipp@med.uni-muenchen.de

© KVM – Der Medizinverlag Dr. Kolster Verlags-GmbH, ein Unternehmen der Quintessenz-Verlagsgruppe

www.kvm-medizinverlag.de

1. Auflage 2017

2., korrigierte Auflage 2018

Produktionsleitung: Kalinka Radlanski, Berlin

Lektorat: Markus Polzer, Berlin

Grafiken: graphX & photographX, Dr. Günter Körtner, Marburg, www.photographx.de

Umschlaggrafik: fotolia.com © Soul wind (Gehirn)

Gesamtproduktion: KVM – Der Medizinverlag, Berlin

ISBN (epub): 978-3-86867-520-7

ISBN (print): 978-3-86867-409-5

Wichtige Hinweise

Wie jede Wissenschaft ist die Medizin ständigen Entwicklungen unterworfen. Forschung und klinische Erfahrung erweitern unsere Erkenntnisse. Soweit in diesem Werk Anwendungsempfehlungen gegeben werden, darf der Leser zwar darauf vertrauen, dass Autoren, Herausgeber und Verlag große Sorgfalt darauf verwandt haben, dass diese Angabe dem Wissensstand bei Fertigstellung des Werkes entspricht. Für Angaben zu Anwendungsformen, -techniken und -häufigkeiten sowie Dosierungsangaben kann vom Verlag jedoch keine Gewähr

übernommen werden. Jede Behandlung erfolgt auf eigene Verantwortung des Benutzers. Für die Vollständigkeit und Auswahl aufgeführter Medikamente und Interventionen übernimmt der Verlag keine Gewähr. Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. Geschützte Warennamen (Warenzeichen) werden in der Regel besonders kenntlich gemacht. Aus dem Fehlen eines solchen Hinweises kann allerdings nicht geschlossen werden, dass es sich um einen freien Warennamen handelt. Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle übernehmen wir keine Haftung für die Inhalte externer Websites, auf die in diesem Buch verwiesen wird. Für den Inhalt der verlinkten Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich.

MARKUS KIPP

KALINKA RADLANSKI

NEUROANATOMIE

NACHSCHLAGEN

LERNEN

VERSTEHEN

2. AUFLAGE

unter Mitarbeit von
Cordian Beyer, Tim Clarner, Moritz Mayer
und Omid Nikoubashman



1 Aufbau des Gehirns – Einführung in die Neurohistologie

Nervenzellen (Neurone)

- Der neuronale Zellkörper und das Zytoskelett

- Das Axon und die Synapse

- Axonaler Transport

- Dendriten von Nervenzellen

Gliazellen

- Astrozyten

- Oligodendrozyten und Schwann-Zellen

- Saltatorische Erregungsleitung

- Mikrogliazellen

- Ependymzellen

Zusammenfassung

Was das IMPP wissen möchte

MC-Fragen

Index

Weiterführende Literatur

2 Allgemeiner Aufbau des Nervensystems (unter Mitarbeit von C. Beyer)

Unterteilungsmöglichkeiten des Nervensystems

- Graue und weiße Substanz des Nervensystems

- Kerne und Ganglien: Definition

- Peripheres und zentrales Nervensystem

- Unterschiedliches Regenerationspotenzial von Nervenzellfortsätzen des ZNS und PNS

- Somatisches und vegetatives Nervensystem

- Afferenzen und Efferenzen

Zusammenfassendes Funktionsprinzip des Nervensystems

Topographische Betrachtung des Nervensystems

- Apikale Ansicht

- Medio-sagittale Ansicht

- Medulla oblongata – das verlängerte Mark

- Pons – die Brücke

- Mesencephalon – das Mittelhirn
- Truncus cerebri – der Hirnstamm
- Cerebellum – das Kleinhirn
- Diencephalon – das Zwischenhirn
- Telencephalon – das Großhirn
 - Lobus frontalis – der Frontallappen
 - Lobus parietalis – der Scheitellappen
 - Lobus temporalis – der Schläfenlappen
 - Lobus occipitalis – der Hinterhauptlappen

Laterale Ansicht

Basale Ansicht

Lagebeschreibungen im Zentralnervensystem: Meynert- und Forel-Achse

Systematik der Verbindungen des Nervensystems

Assoziationsbahnen

Kommissurenbahnen

Projektionsbahnen

Zusammenfassung

Was das IMPP wissen möchte

MC-Fragen

Index

Weiterführende Literatur

3 Rückenmark und Spinalnerven

Grundlagen

Verbindungen des Rückenmarks zum peripheren Nervensystem

Aszensus des Rückenmarks

Rückenmarkshäute

Mikroskopischer Aufbau des Rückenmarks

Absteigende Bahnen

Aufsteigende Bahnen

Spinalnerven und periphere Nerven

Prinzipieller Aufbau eines Reflexbogens

Das vegetative Nervensystem im Rückenmark

Zusammenfassung

Was das IMPP wissen möchte

MC-Fragen

Index

Weiterführende Literatur

4 Hirnhäute und Liquorräume des Zentralnervensystems (unter Mitarbeit von T. Clarner)

Hirnhäute

- Dura mater encephali

- Arachnoidea mater encephali

- Pia mater encephali

- Sensible und arterielle Versorgung der Hirnhäute

Liquor- und Ventrikelsystem

- Innere Liquorräume und deren Verbindungen

- Rautengrube und Rhombencephalon

- Liquor und Liquorproduktion

- Funktion des Liquors

- Erweiterungen der äußeren Liquorräume

Zusammenfassung

Was das IMPP wissen möchte

MC-Fragen

Index

Weiterführende Literatur

5 Schädelbasis und Hirnnerven

Der knöcherne Schädel

- Basis cranii interna

 - Fossa cranii anterior

 - Fossa cranii media

 - Fossa cranii posterior

- Basis cranii externa

 - Vorderer Abschnitt

 - Mittlerer Abschnitt

 - Hinterer Abschnitt

Das vegetative Nervensystem

- Funktionen des Sympathikus und Parasympathikus

- Aufbau des Sympathikus und Parasympathikus

- Sympathikus

- Parasympathikus

- Grenzstrang und Nervi splanchnici

Hirnnerven

- I. Hirnnerv: Nervus olfactorius
- II. Hirnnerv: Nervus opticus
- III. Hirnnerv: Nervus oculomotorius
- IV. Hirnnerv: Nervus trochlearis
- V. Hirnnerv: Nervus trigeminus
- VI. Hirnnerv: Nervus abducens
- VII. Hirnnerv: Nervus intermedio-facialis
- VIII. Hirnnerv: Nervus vestibulocochlearis
- IX. Hirnnerv: Nervus glossopharyngeus
- X. Hirnnerv: Nervus vagus
- XI. Hirnnerv: Nervus accessorius
- XII. Hirnnerv: Nervus hypoglossus

Zusammenfassung

Was das IMPP wissen möchte

MC-Fragen

Index

Weiterführende Literatur

6 Subkortikale Strukturen und Diencephalon

Topographische Betrachtung

Funktionelle Betrachtung der Basalganglien

Regelkreis der Basalganglien

Thalamus

Spezifische Thalamuskern

Epithalamus

Hypophyse und Hypothalamus

Kerne des Hypothalamus

Zusammenfassung

Was das IMPP wissen möchte

MC-Fragen

Index

Weiterführende Literatur

7 Hirnstamm

Topographischer Hirnstamm

Graue Substanz des Hirnstamms

- Graue Substanz der Medulla oblongata
 - Olive
 - Nucleus gracilis und cuneatus
- Graue Substanz des Pons
 - Pontine Kerne
- Graue Substanz des Mesencephalon
 - Substantia nigra
 - Nucleus ruber
 - Vierhügelplatte - Lamina quadrigemina
- Formatio reticularis
 - Atemzentrum und Kreislaufzentrum
 - Brechzentrum
 - Absteigendes motorisches retikuläres System
 - ARAS (aufsteigendes retikuläres Aktivierungssystem)
 - Miktionszentrum
 - Monoaminerge Zellgruppen
 - Augenbewegungscentren
- Wichtige Bahnsysteme des Hirnstamms
- Zusammenfassung
- Was das IMPP wissen möchte
- MC-Fragen
- Index
- Weiterführende Literatur

8 Cerebellum

- Makroskopischer Aufbau
- Kleinhirnerne
- Funktionelle Kleinhirnantteile und makroskopische Zuordnung
- Funktionelle Verbindungen des Kleinhirns
 - Pontocerebellum
 - Vestibulocerebellum
 - Spinocerebellum
 - Zusammenspiel von Olive und Kleinhirn
 - Weitere Kleinhirnbahnen
- Entwicklungsgeschichtliche Einordnung des Kleinhirns
- Histologische Verschaltung des Kleinhirns
- Zusammenfassung
- Was das IMPP wissen möchte

MC-Fragen
Index
Weiterführende Literatur

9 Telencephalon

Prinzipieller Aufbau des Telencephalons
Topographie des Cortex cerebri
 Lobus frontalis
 Lobus parietalis
 Lobus occipitalis
 Lobus temporalis
 Gyrus cinguli
Histologie des Cortex cerebri
 Histologischer Aufbau des Isokortex
 Histologischer Aufbau des Allokortex
Verschaltung der Hippocampusformation
 Extrinsische Neuronenschleife
 Intrinsische Neuronenschleife
 Hippocampus und Gedächtnisbildung
Limbisches System und Papez-Neuronenkreis
 Amygdala
Grundlagen zur Gedächtnislehre
 Räumliche Trennung verschiedener Gedächtnisinhalte
 Konsolidierung
Zusammenfassung
Was das IMPP wissen möchte
MC-Fragen
Index
Weiterführende Literatur

10 Blutversorgung des Gehirns

Grundlagen
 Getrennter Verlauf von Arterien und Venen
 Circulus arteriosus Willisii
 Blut-Hirn-Schranke
Zirkumventrikuläre Organe

Arterielle Versorgung des Gehirns

Arteria carotis interna

Arteria vertebralis

Arteria cerebri anterior

Arteria cerebri media

Arteria cerebri posterior

Capsula interna: Topographie und Blutversorgung

Venöse Versorgung des Gehirns

Zusammenfassung

Was das IMPP wissen möchte

MC-Fragen

Index

Weiterführende Literatur

11 Motorik

Motorische Areale des Zentralnervensystems

Motorik des Rumpfes und der Extremitäten

Hierarchische Gliederung der Motorik und ihr Zusammenspiel

Primärmotorischer Kortex

Motorischer Homunkulus

Pyramidales System der Motorik

Extrapyramidales System der Motorik

Motorik des Kopf-Hals-Bereiches

Tractus corticonuclearis

Frontales Augenfeld

Sprache

Weitere Besonderheiten

Basalganglien

Aufbau und Verschaltung der Basalganglien

Motivation und Belohnung als Elemente motorischen Lernens

Direkter und indirekter Weg der Basalganglien

Heterogenität der medium-sized spiny neurons

Projektionen der Substantia nigra in die Basalganglien

Kleinhirnschleife

Steuerungsmechanismen des Kleinhirns

Zusammenfassung

Was das IMPP wissen möchte

MC-Fragen

Index

Weiterführende Literatur

12 Sensibilität

Rezeptoren der Sensibilität

- Einteilung der Sinnesmodalitäten

- Rezeptoren der Exterozeption

- Rezeptoren der Propriozeption

- Weitere Rezeptortypen

Periphere und zentrale Bahnen der Sensibilität

- Lemniskales System

- Extralemniskales System

- Mechanismen der Schmerztransduktion

 - Übertragener Schmerz

 - Inhibition der Schmerzweiterleitung

- Aufsteigendes propriozeptives System

Sensible Kerngebiete des Rückenmarks

Kortikale Verarbeitung der Sensibilität

Zusammenfassung

Fallstudien zur topographischen Diagnostik

Was das IMPP wissen möchte

MC-Fragen

Lösungen zu den Fallstudien

Index

Weiterführende Literatur

13 Gleichgewicht, Sehen und Hören

Gleichgewicht

- Vestibularorgan

 - Funktionsprinzip der Makulaorgane

 - Funktionsprinzip der Bogengänge

- Zentrales vestibuläres System

 - Funktionelle Verbindungen der Vestibulariskerne

Sehen

- Allgemeiner Aufbau des Auges

- Strukturen des Bulbus

- Histologischer Aufbau der Retina
- Schaltplan der Retina
 - Rezeptive Felder der Retina
- Zellen der Retina
- Fovea centralis
- Papilla nervi optici
- Zentrale Sehbahn
- Visueller Kortex
- Hören
 - Ductus cochlearis und Corti-Organ
 - Hörvorgang
 - Zentrale Hörbahn
- Zusammenfassung
- Was das IMPP wissen möchte
- MC-Fragen
- Index
- Weiterführende Literatur

14 Bildgebende Verfahren (unter Mitarbeit von O. Nikoubashman)

- Computertomographie (CT)
- Magnetresonanztomographie (MRT)
- Positronen-Emissions-Tomographie (PET)
- Digitale Subtraktionsangiographie (DSA)
- Zusammenfassung
- MC-Fragen
- Index
- Weiterführende Literatur

15 Anhang

- Klinische Verweise
- MC-Lösungen
- Weiterführende Literatur
- Index
- Abbildungsquellen

Unter Mitarbeit von

Beyer, Cordian, Prof. Dr. hum. biol.

Direktor
Institut für Neuroanatomie
Uniklinik RWTH Aachen
Wendlingweg 2
52074 Aachen
E-Mail: cbeyer@ukaachen.de

Clarner, Tim, Dr. rer. nat.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Institut für Neuroanatomie
Uniklinik RWTH Aachen
Wendlingweg 2
52074 Aachen
E-Mail: tclarner@ukaachen.de

Mayer, Moritz, cand. med.

Student der Humanmedizin
Ludwig-Maximilians-Universität München
E-Mail: mm.moritz.mayer@gmail.com

Nikoubashman, Omid, Prof. Dr. med.

Klinik für Diagnostische und Interventionelle Neuroradiologie
Uniklinik RWTH Aachen
Pauwelsstraße 30
52074 Aachen
onikoubashman@ukaachen.de

Vorwort

Das neuroanatomische Stoffgebiet ist spannend und kompliziert zugleich. In den vergangenen Jahren, in denen ich zuerst an der RWTH Aachen und dann seit 2015 an der LMU München Neuroanatomie unterrichten durfte, musste ich feststellen, dass vielen Studenten vor allem im Bereich der Neuroanatomie der große Überblick fehlt. Das Aufzählen der zwölf Hirnnervenpaare klappt in den Physikumsprüfungen zum Beispiel erfreulicherweise recht gut, die Einordnung des Auswendiggelernten in funktionelle Zusammenhänge hingegen oft weniger. Vor allem in der Neuroanatomie verliert sich der Studierende rasch in Einzelheiten und Details - wohl auch, weil diese leider oft als prüfungsrelevant suggeriert werden. Wichtig erscheint mir jedoch, dass insbesondere das gelernt und verstanden wird, was später für die praktische Tätigkeit als Arzt wichtig ist. Bei genauer Betrachtung fragt das IMPP im Bereich der Neuroanatomie genauso diese „Essentials“ ab. Trotzdem oder gerade deswegen sollte man diese Essentials nicht einfach auswendig lernen, sondern versuchen zu verstehen: Dies ist das erklärte Ziel dieses Buches.

Wo immer es möglich war, haben wir versucht, komplizierte Zusammenhänge oder Fakten anschaulich und nachvollziehbar darzulegen. In enger Zusammenarbeit mit vielen engagierten Studenten ist uns dies hoffentlich auch gelungen. Anatomische Fotografien von echten Gehirn- und Rückenmarkspräparaten werden durch schematische Grafiken und Schaltpläne ergänzt. Dadurch soll das unweigerlich notwendige theoretische Wissen direkt mit der tatsächlichen Realität des Präpsaals und der späteren ärztlichen Tätigkeit verknüpft werden. Teil dieses uns sehr

wichtigen Konzepts sind auch unsere Infokästen mit den Verweisen zu Klinik, Wissenschaft und Pharmakologie. Diese sollen es Ihnen ermöglichen, schon während einer frühen Phase Ihres Medizinstudiums die klinische Relevanz der Neuroanatomie zu verstehen.

Selbstverständlich braucht jeder Buchautor auch Input - diesen haben wir von zahlreichen exzellenten anatomischen und neuroanatomischen Standardwerken sowie im WorldWideWeb erhalten. Hervorheben möchte ich hier Herrn PD Dr. Helmut Wicht vom Anatomischen Institut der Goethe-Universität Frankfurt am Main. Von ihm sind zahlreiche hoch spannende Beiträge im Internet zu finden, die auch Grundlage der einen und anderen Abhandlung in diesem Buch sind. Ein großes Dankeschön auch an Eugenia Kress für die Zeit, die sie mir gegeben hat. Seitens des Verlags danken wir Herrn Dr. Günter Körtner und Herrn Markus Polzer für ihre unermüdliche und hervorragende Arbeit. Ausdrücklich wollen wir uns bei allen Studenten bedanken (vor allem beim Jahrgang 2015/2016 der LMU München), die diesem Buch mit ihrem Feedback, ihrer Kritik und ihren Anmerkungen Form gegeben haben. Ohne ihre Unterstützung wäre dieses Buch nicht entstanden. Wir hoffen, mit unserem Buch viele interessierte Leser für das spannende Fach der Neuroanatomie zu begeistern und laden Sie - liebe Leserin, lieber Leser - dazu ein, uns mit Ihren Rückmeldungen und Feedback zu helfen, diesen einmal eingeschlagenen Weg erfolgreich weiterzugehen.

München/Berlin, März 2017

Markus Kipp
Kalinka Radlanski

Kapitel 1

Aufbau des Gehirns - Einführung in die Neurohistologie

Nervenzellen (Neurone)

Der neuronale Zellkörper und das Zytoskelett

Das Axon und die Synapse

Axonaler Transport

Dendriten von Nervenzellen

Gliazellen

Astrozyten

Oligodendrozyten und Schwann-Zellen

Saltatorische Erregungsleitung

Mikrogliazellen

Ependymzellen

Zusammenfassung

Was das IMPP wissen möchte

Index

Weiterführende Literatur

Vorbemerkung

Das Nervensystem ist kompliziert und faszinierend zugleich. In keinem anderen wissenschaftlichen Feld konnten im letzten Jahrzehnt größere Fortschritte verzeichnet werden als in den Neurowissenschaften.

Dieses Lehrbuch stellt sich der Herausforderung, ein komplexes Gebiet der Anatomie einerseits so zu erklären, dass Funktionsweisen und Zusammenhänge begriffen werden können, andererseits soll aber auch der Tatsache Rechnung getragen werden, dass die Neuroanatomie nur einen gewissen Prozentsatz der prüfungsrelevanten Fragen ausmacht. Bei der Konzeption dieses Lehrbuches haben wir uns deswegen am Gegenstandskatalog des IMPP orientiert. Zum Abschluss jedes Kapitels wird noch einmal gesondert auf „Spezialitäten“ des IMPP-Wissens eingegangen („Was das IMPP wissen möchte“).

Im ersten Kapitel werden wir eine Einführung in das Organisationsprinzip des Nervensystems geben. Hierbei beginnen wir mit der Histologie, da zelluläre Komponenten des Nervensystems den Baustoff für unser Gehirn liefern. Diesem histologischen Teil schließt sich ein grober Überblick über den Aufbau und die Funktionsweise des Nervensystems an. Ziel dieses einleitenden Kapitels ist es, eine Grundlage für weiterführende Betrachtungen des Nervensystems zu legen. Hier lernen Sie die wichtigsten Vokabeln und Begriffe, sowie wichtige Grundprinzipien, die immer wieder in der Neuroanatomie vorkommen werden. Sicher sind Sie nach den ersten beiden Kapiteln noch nicht in der Lage, in der „Bundesliga“ der Neuroanatomien mitzuspielen. Es reicht aber zumindest für die Kreisklasse, Sie lernen zu dribbeln, Sie lernen auf das Tor zu schießen.

In den folgenden Kapiteln gehen wir detaillierter auf die verschiedenen Abschnitte des Nervensystems ein. Dort

lernen Sie dann, einen Gegner auszutricksen und den Ball am Torwart vorbei in die Ecke zu schießen. Zum Abschluss betrachten wir das Nervensystem unter funktionellen Gesichtspunkten. Dort werden Sie lernen wie Sehen, Hören, Gleichgewicht, Bewegung und Sensibilität funktioniert und welche verschiedenen Elemente des Nervensystems daran beteiligt sind.

Lernziele

Sie sollten nach Durcharbeitung der beiden einführenden Kapitel 1 und 2 in der Lage sein:

- Den Aufbau einer Nervenzelle zu erklären.
- Elemente des neuronalen Zytoskelettes zu benennen und zu erklären.
- Verschiedene Typen von Nervenzellen zu benennen.
- Das Prinzip der Verschaltung via Synapsen zu erklären.
- Mechanismen des axonalen Transports zu erklären.
- Gliazellen zu benennen und deren unterschiedliche Funktionen zu erklären.
- Die Unterschiede zwischen grauer und weißer Substanz, peripherem und zentralen Nervensystem, somatischem und vegetativem Nervensystem sowie zwischen Afferenzen und Efferenzen zu kennen.
- Apikale, medio-sagittale, laterale und basale Ansichten des Gehirns zu erkennen und zu benennen.

Aufbau des Gehirns – Einführung in die Neurohistologie

Die Zellen des Nervensystems lassen sich in **Nervenzellen** (Neurone) und Gliazellen unterteilen. Wenngleich auch die Anzahl der Neurone des menschlichen Gehirns unsere Vorstellungskraft übersteigt (etwa 100 Milliarden), die Anzahl der **Gliazellen** übertrifft die der Neuronen noch um ein Vielfaches. Neurone sind für die Signalübermittlung innerhalb des Nervensystems verantwortlich, indem sie Aktionspotenziale generieren und weiterleiten (siehe

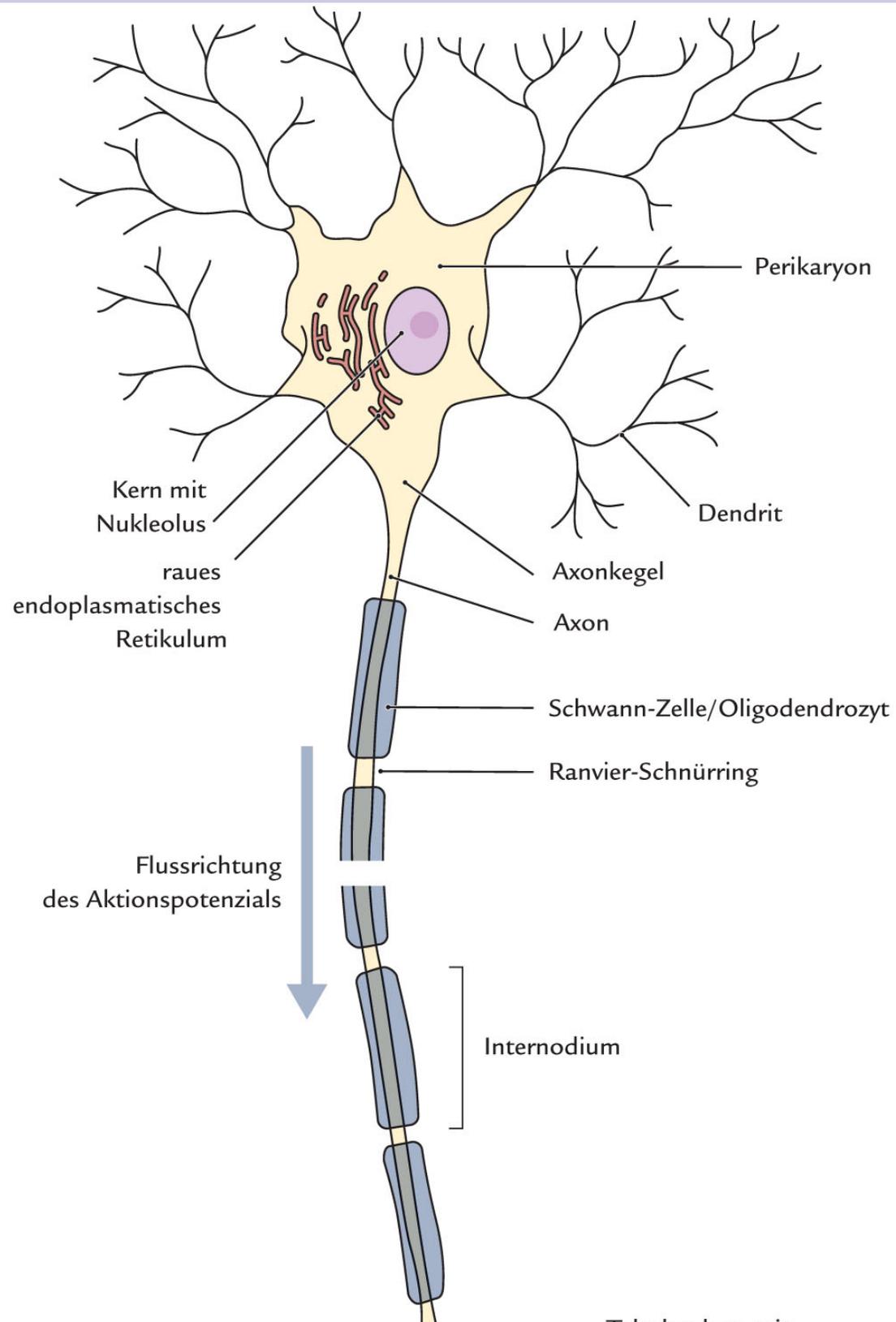
entsprechende Lehrbücher der Physiologie). Im Prinzip handelt es sich bei Aktionspotenzialen um elektrische Impulse. Nervenzellen kommunizieren also über elektrische Impulse. Dabei wird eine bestimmte Funktion in der Regel von einer Kette hintereinander geschalteter Nervenzellen erfüllt. Den Ort, an dem Nervenzellen miteinander kommunizieren, nennt man **Synapse**. Neben den Neuronen besteht das Nervensystem noch aus Gliazellen. Diese tragen zur Gehirnfunktion vor allem dadurch bei, dass sie benachbarte Neurone isolieren, stützen und ernähren.

Um die Struktur von Nervenzellen zu untersuchen, mussten Wissenschaftler etliche Hindernisse überwinden. Das erste Hindernis war die geringe neuronale Größe. Die meisten Nervenzellen haben einen Durchmesser vom Bruchteil eines Millimeters. Zum Vergleich: Die Spitze eines ungespitzten Bleistifts misst etwa 2 mm, Nervenzellen sind 40- bis 200-mal kleiner. Diese Größe liegt deutlich unterhalb der Grenze dessen, was mit bloßem Auge noch erkennbar wäre. Deshalb waren vor Entwicklung des zusammengesetzten Mikroskops im späten 17. Jahrhundert Fortschritte in der Neurowissenschaft nur bedingt möglich. Die Erfindung des Mikroskops eröffnete das Gebiet der Histologie, der mikroskopischen Untersuchung von Gewebestrukturen. Wissenschaftler, die das Gehirn untersuchen wollten, waren jedoch noch mit einem weiteren Hindernis konfrontiert: Frisch präpariertes Gehirn sieht unter dem Mikroskop mehr oder weniger einheitlich cremefarben aus. Das Gewebe zeigt keine deutlichen Unterschiede in der Pigmentierung, die es den Histologen ermöglichen würden, einzelne Zellen voneinander abzugrenzen. Der endgültige Durchbruch auf dem Gebiet der Neurohistologie war deswegen die Einführung von speziellen Färbemethoden, mit denen sich einzelne Zellteile im Hirngewebe darstellen ließen. Eine dieser Färbemethoden, die auch heute noch

Anwendung findet, wurde vom deutschen Neurologen Franz Nissl Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt. Nissl zeigte, dass basische Farbstoffe einer bestimmten Klasse die Zellkerne aller Zellen sowie Materialansammlungen um die Zellkerne von Neuronen herum anfärben. Diese Ansammlungen bezeichnet man als Nissl-Schollen, die Methode als die Nissl-Färbung. Mit dieser Färbung lassen sich zum einen Neurone und Gliazellen voneinander unterscheiden, zum anderen können erfahrene Neurohistologen so die Anordnung oder Zytoarchitektur von Nervenzellen in verschiedenen Teilen des Gehirns feststellen. Diese Untersuchungen führten zu der Erkenntnis, dass das Gehirn aus vielen spezialisierten Regionen besteht. Wir wissen heute, dass jede Region eine eigene Funktion hat, die wir im Rahmen dieses Lehrbuches allesamt kennenlernen und verstehen werden.

Nervenzellen (Neurone)

Neurone bestehen aus mindestens zwei unterscheidbaren Teilen: einem Zellkörper, der den Zellkern enthält, und zahlreichen dünnen Fortsätzen, die vom Zellkörper abgehen (Abb. 1.1).



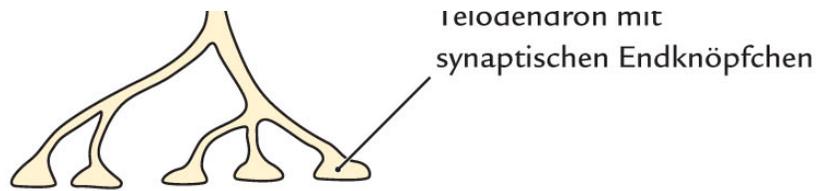


Abb. 1.1

Eine Nervenzelle besteht aus einem Nervenzellkörper (Soma/ Perikaryon) mit zwei Arten von Fortsätzen (Neuriten): Dendriten, welche die Information aufnehmen und Axone, welche die Information an die nächste Zelle weiterleiten. Ein ankommendes Aktionspotenzial wird an den Dornfortsätzen von einer Nervenzelle registriert.

Am Axonhügel, der frei von rauem endoplasmatischem Retikulum (rER) ist, entsteht bei Überschreitung eines Schwellenwertes ein neues Aktionspotenzial. Dieses wird rasch über das myelinisierte Axon an die nächste Zelle weitergeleitet. Viele Axone sind von einer Myelinscheide umgeben; diese isoliert das Axon und beschleunigt somit die Fortleitung des Aktionspotenzials (saltatorische Erregungsleitung). An den Ranvier-Schnürringen ist die Myelinscheide regelmäßig unterbrochen. Dieser Bereich wird als Nodus bezeichnet, der Abschnitt zwischen zwei Ranvier-Schnürringen als Internodium. Zur besseren Orientierung ist die Flussrichtung des Aktionspotenzials als Pfeil illustriert. An den Axonterminalen (synaptische Endköpfchen; Boutons) wird das Aktionspotenzial an die nächste Nervenzelle übergeben.

Für den Zellkörper gibt es zwei verschiedene Bezeichnungen, die gleichbedeutend verwendet werden können: **Soma** (Plural: Somata) und **Perikaryon** (Plural: Perikarya). Perikaryon bedeutet so viel wie „Bereich um den Zellkern“ (griech. περί - „um, herum“ sowie κάρυον - „Kern“). Die Fortsätze, die vom Soma ausgehen, bezeichnet man als **Dendriten** und **Axone**, die oft unter dem Oberbegriff „**Neuriten**“ zusammengefasst werden. Wie bereits erwähnt, kommunizieren Neurone untereinander durch elektrische Impulse, durch Aktionspotenziale. Dendriten nehmen die Aktionspotenziale auf, Axone leiten sie weiter. Der Fluss eines Aktionspotenzials, bezogen auf die Fortsätze der Nervenzelle, verläuft also von Dendrit über das Perikaryon zum Axon.

Eine Nervenzelle kann mehrere Dendriten, aber nur ein Axon haben. Das Axon besitzt auf seiner gesamten Länge einen einheitlichen Durchmesser und verzweigt sich an seinem Ende in mehrere Fortsätze, die Telodendra (Telodendron in der Einzahl) genannt werden. Diese enden in einer Vielzahl von Endknöpfchen (auch als Axonterminale, Synapsenendköpfchen oder Boutons bezeichnet), die den präsynaptischen Teil der Synapse bilden (Abb. 1.2).

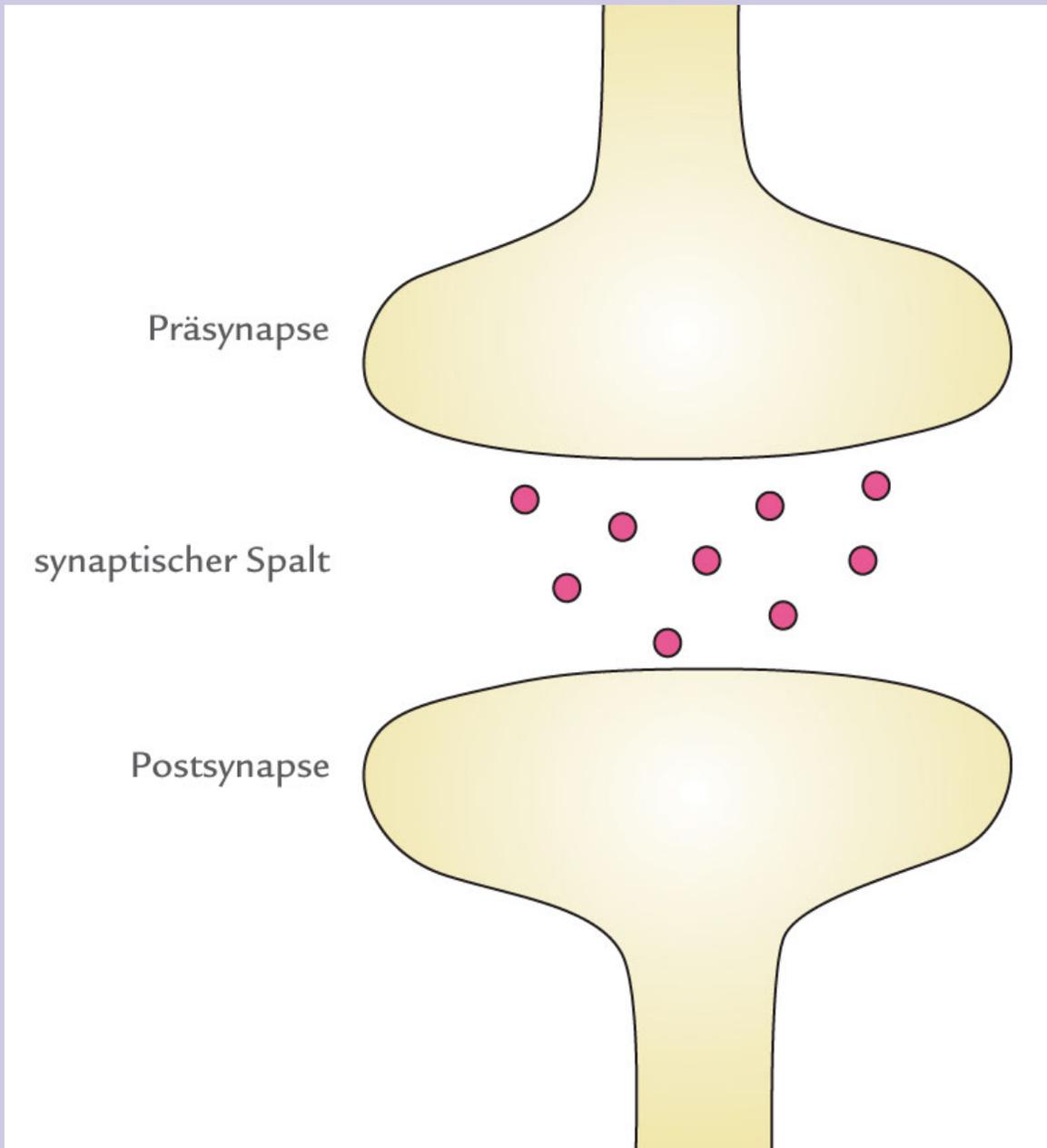


Abb. 1.2

Übersicht über die synaptischen Strukturen.

Das Axon einer Nervenzelle zweigt sich an seinem Ende in eine Vielzahl von Endknöpfchen auf. Jedes dieser Endknöpfchen bildet eine Verbindung zu einer weiteren Nervenzelle oder zu einem Erfolgsorgan (z. B. einer Drüse oder Muskelzelle) aus. Diese Verbindung nennt man Synapse. Das Endknöpfchen des Axons macht dabei den präsynaptischen Teil aus. Der

postsynaptische Teil einer Synapse entspricht den äußersten Enden der Dendriten, den sog. Dornfortsätzen (Spines) der nächsten Nervenzelle. Dazwischen liegt der synaptische Spalt.

Den zweiten Teil einer Synapse bilden die Endsegmente von Dendriten, sogenannte Dornfortsätze (Spines). Dendriten stehen in Kontakt mit vielen Axonen anderer Nervenzellen. Axone wiederum stehen über ihre Axonterminalen im Kontakt mit vielen Dendriten.

Eine Nervenzelle besteht also aus Dendriten, Zellkörper und einem Axon. Im Folgenden sollen die einzelnen Anteile einer Nervenzelle genauer betrachtet werden.

Der neuronale Zellkörper und das Zytoskelett

Der Zellkörper eines typischen Neurons hat einen Durchmesser von circa 20 µm. Die wässrige Flüssigkeit im Inneren der Zelle, das **Zytosol**, ist eine salzige, kaliumhaltige Lösung, die von der Umgebung durch die Neuronenmembran getrennt ist. Der Zellkörper einer Nervenzelle enthält die gleichen Organellen, die in allen Tierzellen vorkommen. Funktionell am wichtigsten sind der Zellkern, das **raue endoplasmatische Retikulum (rER)**, das glatte endoplasmatische Retikulum, der Golgi-Apparat und die Mitochondrien. Alles, was sich innerhalb der Grenzen der Zellmembran befindet, einschließlich der Organellen, aber ohne den Zellkern, bezeichnet man in seiner Gesamtheit als das **Zytoplasma**. Das ausgeprägte Vorhandensein von rER (Synonym: Ergastoplasma) in Nervenzellen ist Ausdruck ihrer ausgeprägten Proteinbiosynthese. Das rER lässt sich durch die bereits erwähnte Nissl-Färbung besonders schön darstellen, und wird deswegen auch **Nissl-Substanz** genannt.

Das **Zytoskelett** ist ein aus Proteinen aufgebautes Netzwerk im Zytoplasma jeder Zelle und besteht aus dynamisch auf- und abbaubaren, dünnen, fadenförmigen

Zellstrukturen (sogenannten Filamenten). Es ist für die mechanische Stabilisierung der Zelle, für aktive Bewegungen der Zelle als Ganzes, sowie für Bewegungen und Transporte innerhalb der Zelle verantwortlich. Der Name „Zellskelett“ leitet sich von der Erscheinung dieser Strukturen im Mikroskop ab, ist aber irreführend. Beim Zytoskelett handelt es sich nicht um ein steifes Skelett oder Gerüst, sondern vielmehr um ein außerordentlich flexibles Geflecht von Strukturen. Man weiß inzwischen, dass Zytoskelettelemente nicht nur für die mechanische Stabilität einer Zelle, sondern auch für sensorische Funktionen wie die Signalübertragung unerlässlich sind.

Das Zytoskelett von Nervenzellen setzt sich aus Mikrotubuli, Neurofilamenten und Mikrofilamenten zusammen. Mikrotubuli sind die größten Komponenten des Zytoskelettes, gefolgt von den Neurofilamenten und Mikrofilamenten. Diese unterscheiden sich nicht nur in ihrer Größe, sondern auch in ihrer Funktion. Mikrotubuli, die in Nervenzellen Neurotubuli genannt werden, sind röhrenförmige intrazelluläre Polymere aus globulären Tubulinuntereinheiten (Abb. 1.3).

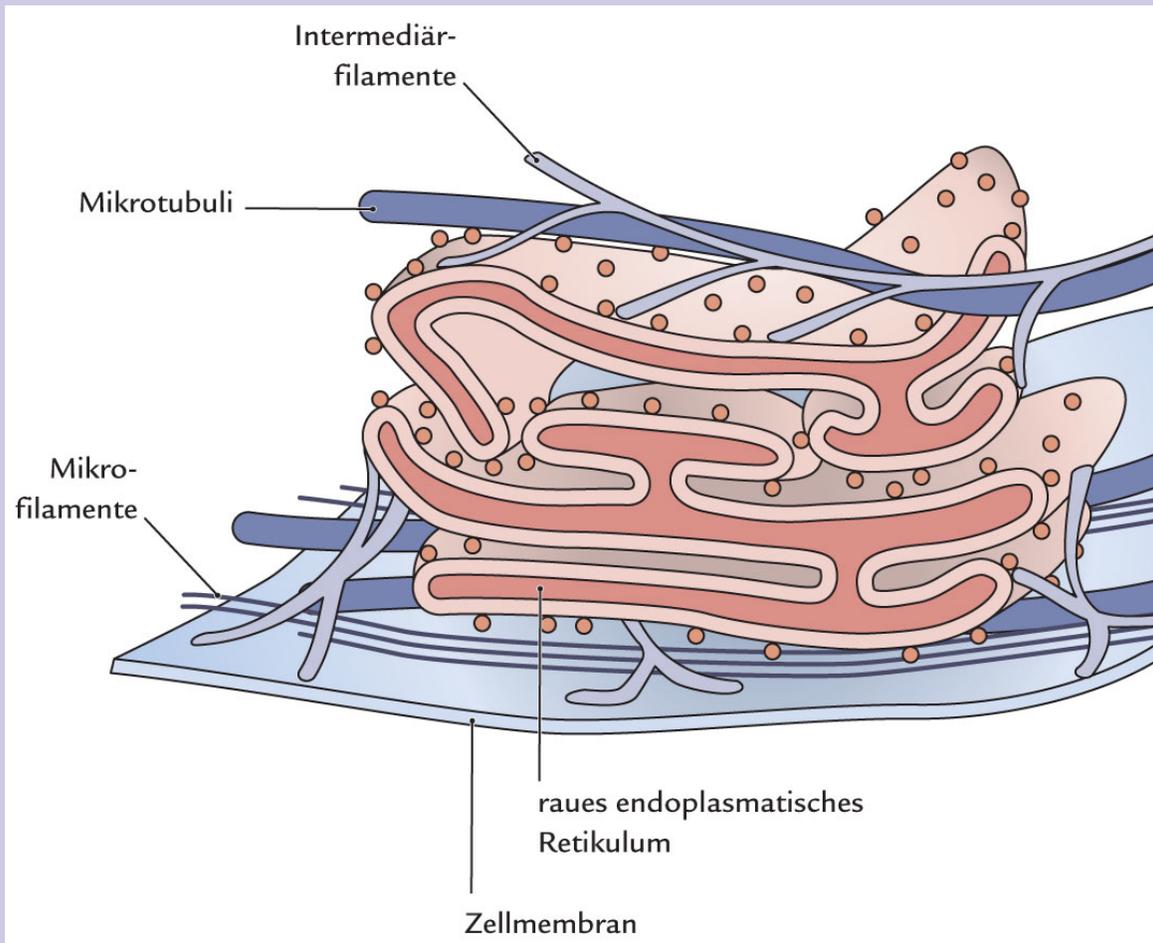


Abb. 1.3

Nervenzellorganellen

Eine Nervenzelle besitzt die gleichen Organellen wie jeder andere Zelltyp. Das raue endoplasmatische Retikulum (rER) nimmt auffällig viel Platz ein. Dies ist Ausdruck der ausgeprägten Proteinbiosynthese, die in der Zelle vorherrscht. Da sich das rER besonders gut durch die Nissl-Färbung darstellen lässt, nennt man es auch Nissl-Substanz. Die verschiedenen Elemente des Zytoskeletts sind Mikrotubuli, Intermediärfilamente und Mikrofilamente. Die Intermediärfilamente nennt man in Nervenzellen Neurofilamente.

Als größte Vertreter des Zytoskeletts verfügen **Mikrotubuli** über einen Durchmesser von 20 nm und verlaufen in Längsrichtung der Neuriten. Nebst der

Stabilisierung der Zelle sind Mikrotubuli für den Transport verschiedener Substanzen innerhalb einer Nervenzelle sowie deren Bewegung im Rahmen der Entwicklung wichtig. Eine Klasse von Proteinen, die an der Regulierung des Zusammenbaus und der Funktion der Mikrotubuli mitwirken, sind die Mikrotubuli-assoziierten Proteine (kurz MAP). Ein Vertreter dieser MAP ist das Tau-Protein. Durch die Bindung an Mikrotubuli stabilisiert und reguliert Tau die Polymerisation der Mikrotubuli.

Klinik

Fehlregulierte Tau-Proteine werden mit der Entstehung der Alzheimer-Erkrankung in Zusammenhang gebracht. Hierbei handelt es sich um eine demenzielle Erkrankung mit etwa 40 Millionen betroffenen Patienten weltweit. Sie ist somit recht häufig. Tau-Proteine als Vertreter der MAP regulieren, wie erwähnt, normalerweise die Zusammenlagerung der einzelnen Bausteine der Mikrotubuli, bilden aber beim Morbus Alzheimer unkontrolliert Aggregate. Es resultieren unter anderem sogenannte neurofibrilläre Tangles (auch **Alzheimer-Fibrillen** genannt) im Inneren der neuronalen Zellkörper, welche sich charakteristischerweise im Gehirn von Alzheimer-Erkrankten nachweisen lassen. Der eigentliche Auslöser der pathologischen Entartung von Tau-Proteinen ist noch unbekannt, ebenso die daraus resultierenden Folgen für die Nervenzelle. Die Bedeutung der Alzheimer-Fibrillen wird jedoch deutlich, wenn man deren Häufigkeit mit dem Grad der Vergesslichkeit vergleicht: Je höher die Dichte der Tau-Fibrillen, desto gravierender ist die klinische Beeinträchtigung der Patienten.¹

Mit einem Durchmesser von 10 nm besitzen **Neurofilamente** eine mittlere Größe zwischen Mikrotubuli und Mikrofilamenten. Intermediärfilamente kommen in allen Körperzellen vor, in Neuronen bezeichnet man sie als Neurofilamente (Abb. 1.4).