

Funktionelle Neuroanatomie

K. Amunts, K. Zilles

2.1 Einführung und Grundlagen – 8

- 2.1.1 Aufbau und Gliederung des Gehirns – 8
- 2.1.2 Feinbau des Nervensystems – 9
- 2.1.3 Aufbau des Kortex – 12
- 2.1.4 Große Faserbahnsysteme – 14

2.2 Hirnhäute, Ventrikel und Blutgefäße – 16

- 2.2.1 Hirnhäute – 16
- 2.2.2 Ventrikel – 17
- 2.2.3 Blutgefäße – 18

2.3 Funktionelle Systeme – 19

- 2.3.1 Visuelles System – 19
- 2.3.2 Auditorisches System – 26
- 2.3.3 Gleichgewichtssystem – 30
- 2.3.4 Mechanorezeption – 33
- 2.3.5 Schmerz – 37
- 2.3.6 Olfaktorisches System – 39
- 2.3.7 Gustatorisches System – 40
- 2.3.8 Motorisches System – 41
- 2.3.9 Neuroanatomische Grundlagen affektiven Verhaltens – 47
- 2.3.10 Lernen, Gedächtnis und Aufmerksamkeit – 51
- 2.3.11 Neuroendokrines System – 53
- 2.3.12 Koordinierung und Modulation durch die Formatio reticularis – 54
- 2.3.13 Transmittersysteme – 55
- 2.3.14 Transmitterrezeptoren und intrazelluläre Signalverarbeitung – 57

Literatur – 59

- Zitierte Literatur – 59
- Weiterführende Literatur – 60

Zum Thema

Die funktionelle Kernspintomographie zeigt umschriebene Aktivierungen im Gehirn, die eine anatomische Identifizierung benötigen. Aus diesem Grund geben wir hier einen kurzen Überblick über die neuroanatomischen Grundlagen des Gehirns mit dem Kortex im Mittelpunkt. In fast allen funktionellen bildgebenden Untersuchungen ist jedoch nicht nur eine kortikale Region aktiviert. Für ein tieferes Verständnis komplexer kognitiver Funktionen ist es deshalb notwendig, auch die Verbindungen zwischen kortikalen Arealen oder mit tiefer gelegenen Kerngebieten und dem Rückenmark zu kennen. Diese Verbindungen werden hier in Form von »Schaltschemata« dargestellt. Das vorliegende Kapitel gibt eine Einführung in den Bauplan des Gehirns einschließlich seiner Mikrostruktur, der regionalen Gliederung der Hirnrinde und die Topographie der Faserbahnen. Anschließend werden die wichtigsten funktionellen Systeme beschrieben.

2.1 Einführung und Grundlagen

2.1.1 Aufbau und Gliederung des Gehirns

Das zentrale Nervensystem (ZNS) lässt sich in verschiedene Bereiche gliedern. Die gewaltige Anzahl von Nervenzellen (verschiedene Schätzungen gehen von 19 bis 22 Mrd. Neuronen allein in der Hirnrinde aus) ist die Grundlage einer kaum vorstellbaren Anzahl von Verschaltungsmöglichkeiten. Das menschliche Gehirn ist in seinem äußeren, makroskopischen und inneren, mikroskopischen Aufbau als Ausdruck des Prinzips der strukturellen und funktionellen Segregation und Interaktion hoch differenziert.

Die Zellkörper (Perikarya) von Nervenzellen (**Neuronen**) zeigen unterschiedliche Verteilungsmuster im Gehirn: Sie können gleichmäßig verteilt liegen, z. B. in der netzartigen **Formatio reticularis** des Hirnstamms, wohingegen es in anderen Bereichen zu Clustern von Nervenzellkörpern kommt, z. B. in Kerngebieten (**Nuclei**). Schließlich zeigt die Hirnrinde (Cortex cerebri) ebenfalls eine hohe Konzentration von Nervenzellen, die aber in oberflächenparallelen Schichten (Laminae) und senkrecht dazu stehenden Zellsäulen (Columnae) angeordnet sind.

Oft bilden die von den neuronalen Zellkörpern wegführenden Fortsätze (**Axone**) Faserbündel, die als Bahnen (**Tractus, Fasciculi, Lemnisci, Fibrae, Striae**) bezeichnet werden. Diese Bahnen stellen die Verbindungen mit anderen Gebieten des ZNS her. Im peripheren Nervensystem heißen diese Strukturen **Nervi** (Nn.). Einige Faserbahnen werden gemeinsam von verschiedenen funktionellen Systemen genutzt. Dabei wird aber die funktionelle Spezifität der verschiedenen Faserbündel innerhalb einer Bahn bei-

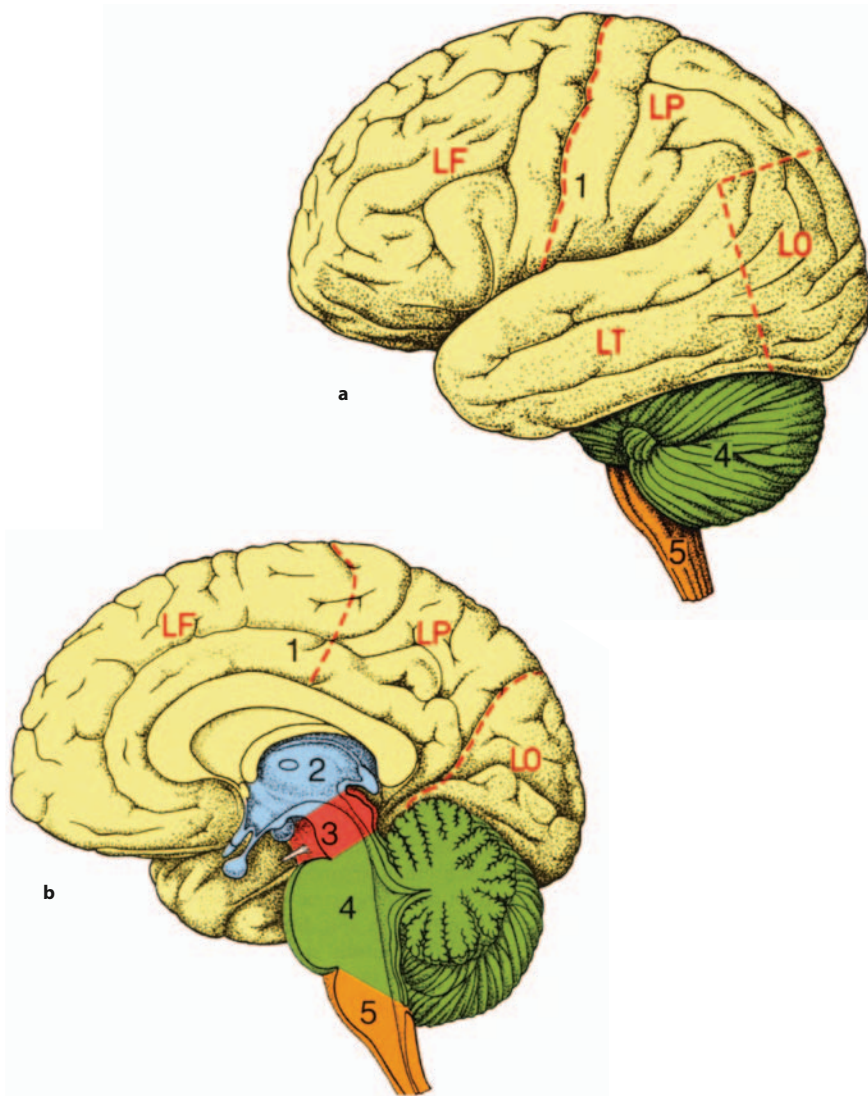
behalten. So werden auch Fasern aus verschiedenen Abschnitten der Retina in ihrem Verlauf im Sehnerv nicht vermischt, und diese retinotopie Gliederung bleibt bis in die Sehrinde erhalten (► Abschn. 2.3.1).

Das Gehirn ist **bilateral symmetrisch** angelegt. Es finden sich aber dennoch anatomische und funktionelle Unterschiede zwischen linker und rechter Hirnhälfte, **Lateralisation** oder Asymmetrie. Beide Hälften interagieren miteinander: homotope Kommissurenbahnen verknüpfen nach ihrer Lage gleiche, heterotope Kommissurenbahnen nach ihrer Lage unterschiedliche Ziel- und Ursprungsgebiete der beiden Hirnhälften. Während der Begriff der Lateralisation eher eine funktionelle Spezialisierung beschreibt, wird »Asymmetrie« anatomisch und/oder funktionell verwendet. Rechts- bzw. Linkshändigkeit und Sprachdominanz sind in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung.

Das **Prosenzephalon** (Vorderhirn) mit seinen beiden Anteilen **Telenzephalon** (Endhirn) und **Dienzephalon** (Zwischenhirn) ist beim Menschen besonders stark entwickelt. Es ist vor allem das Telenzephalon mit seinem **Pallium** (Hirnmantel), das wesentlich die Hirngröße des Menschen bestimmt (■ Abb. 2.1). Das Pallium wird aus der **Hirnrinde** (Cortex cerebri) und der darunter liegenden **weißen Substanz**, die aus den zum Kortex hinführenden (afferenten) und vom Kortex wegführenden (efferenten) sowie vor allem intrakortikalen Faserbahnen besteht, gebildet. Die Oberfläche des Kortex ist durch die Vorwölbungen (Windung, **Gyrus**) und Einbuchtungen (Furche, Sulcus, Fissura) gefaltet. Das Pallium wird in verschiedene Lappen, **Lobi**, (Frontallappen [Lobus frontalis], Parietallappen [Lobus parietalis], Okzipitallappen [Lobus occipitalis], Insel [Lobus insularis] und Temporallappen [Lobus temporalis]) gegliedert (■ Abb. 2.1).

Gliederung des zentralen Nervensystems

1. Rückenmark
2. Gehirn
 - Rhombenzephalon
 - Myelenzephalon (Medulla oblongata)
 - Metenzephalon mit Zerebellum
 - Mesenzephalon mit Tectum
 - Prosenzephalon
 - Dienzephalon
 - Hypothalamus mit Hypophyse
 - Subthalamus
 - Thalamus (dorsalis) mit Metathalamus
 - Epithalamus mit Epiphyse
 - Telenzephalon
 - Corpus striatum und Globus pallidus
 - Pallium (Kortex und weiße Substanz)



■ **Abb. 2.1** Lateral- (a) und Medialansicht (b) der rechten Hirnhälfte (aus Zilles u. Rehkämper 1998). Die gestrichelten Linien markieren die Grenzen zwischen den verschiedenen Loben. 1 Pallium, 2 Diencephalon, 3 Mesenzephalon, 4 Metenzephalon, 5 Myelenzephalon; LF Lobus frontalis, LO Lobus occipitalis, LP Lobus parietalis, LT Lobus temporalis. Der Lobus insularis ist von außen in der Lateralansicht nicht sichtbar, da er von den Loben frontalis, parietalis und temporalis überdeckt wird. Dies bezeichnet man als Operkularisation.

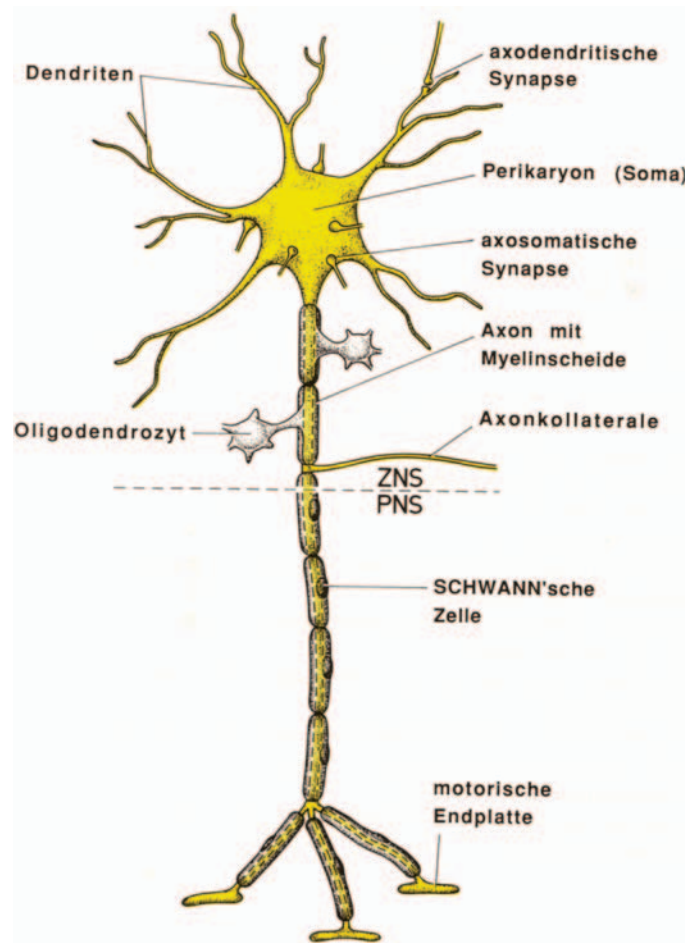
2.1.2 Feinbau des Nervensystems

- — Das Nervengewebe besteht aus 2 Zelltypen: Neuronen und Gliazellen
- Oligodendrozyten sind besondere Gliazellen, die im ZNS Myelinscheiden bilden
- Die efferenten Fortsätze der Perikarya, Axone, übernehmen die Weiterleitung des Aktionspotenzials über teilweise lange Strecken
- An den afferenten Dendriten der Perikarya finden Erregungsaufnahme und Erregungsleitung statt

- Am Axoninitialsegment wird das Aktionspotenzial gebildet
- Synapsen übertragen die Erregung von einem auf das nächste Neuron

Das **Neuron** ist die strukturelle und funktionelle Einheit des Nervensystems. Es bildet Fortsätze, einen Neuriten (Axon) und meist mehrere Dendriten, die vom Zellleib (Soma, Perikaryon), ausgehen (■ Abb. 2.2). **Gliazellen** übernehmen vielfältige Aufgaben und sind in den Prozess der Neurotransmission eingebunden, z. B. durch die Regulation der extrazellulären Transmitterkonzentration.

Das **Soma** von Neuronen wird vom Zellkern, Nukleus, und dem Perikaryon mit den Zellorganellen gebildet



■ **Abb. 2.2** Schema eines motorischen Neurons aus dem Vorderhorn des Rückenmarks. Die gestrichelte Linie markiert die Grenze zwischen peripherem und zentralem Nervensystem (PNS/ZNS). (Aus Zilles u. Rehkämper 1998)

(■ Abb. 2.2). Die äußere Form von Neuronen wird stark von der Ausprägung der abgehenden Fortsätze beeinflusst. Das Perikaryon ist von Gliazellen umgeben, zwischen denen Axone anderer Neurone an das Perikaryon herantreten und synaptische Kontakte ausbilden können. Der relativ große Zellkern liegt zumeist im Zentrum des Perikaryons, dessen Chromatin über den gesamten Kernbereich fein verteilt ist.

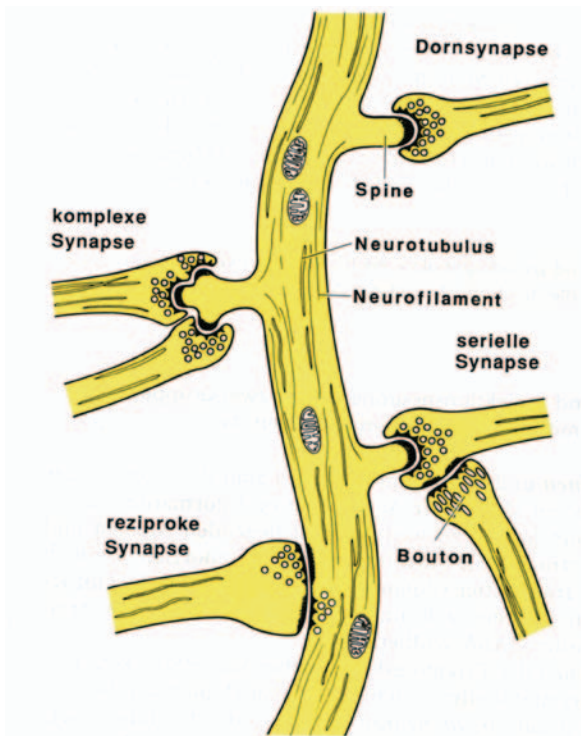
Die Hülle des **Nucleus** besteht aus 2 Elementarmembranen. Das äußere Blatt der Kernmembran hat Verbindung mit dem endoplasmatischen Retikulum (ER) im Zytoplasma. Das ER ist reich mit Ribosomen besetzt (rauhes oder granuläres ER, rER) und in zahlreichen, konzentrischen Stapeln (Nissl-Schollen; ► Abschn. 2.1.3) organisiert. Der Golgi-Apparat ist in Nervenzellen stark ausgeprägt. Mitochondrien liegen in großer Anzahl im Perikaryon und sichern den Energiebedarf.

Das Perikaryon bildet Fortsätze, die **Dendriten** (afferent) und das **Axon** (efferent). Während Dendriten in unterschiedlicher Anzahl pro Neuron ausgebildet sein können,

gibt es immer nur ein Axon. Bei Projektionsneuronen und Spinalganglienzellen können die Axone länger als einen Meter sein (z. B. im motorischen System; ► Abschn. 2.3.8). Diese beiden Zelltypen sind meist exzitatorisch und bilden v. a. den Transmitter Glutamat (► Abschn. 2.3.13). Interneurone dienen der Erregungsleitung über kurze Strecken. Ihre Axone sind daher kurz. Interneurone sind oft inhibitorisch und bilden meist den Transmitter GABA.

Das **Axon** (auch Neurit) beginnt mit einem Axonhügel am Perikaryon und dem Axoninitialsegment, gibt Kollaterale ab und zweigt sich am Ende als Telodendron auf. Die Enden (Axonterminale) bilden Auftreibungen (»boutons«), deren Zellmembran die präsynaptische Komponente der Synapse darstellen (■ Abb. 2.3).

Im Inneren des Axons findet sich das **Axoplasma**, das viele Neurofilamente (Durchmesser: ca. 10 nm) und Neurotubuli (20 nm) enthält. Die Neurotubuli sind die strukturelle Grundlage des axonalen Transports, der mithilfe von Adenosintriphosphat (ATP), dem mikrotubu-



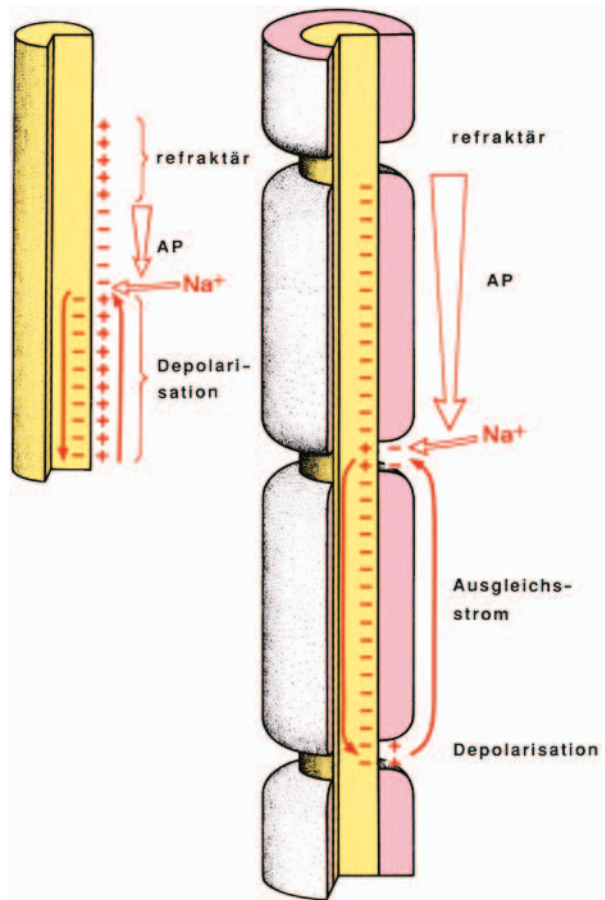
■ Abb. 2.3 Dendrit mit verschiedenen Synapsentypen. (Aus Zilles u. Rehkämper 1998)

lusassoziierten Protein (MAP) und Kinesin durchgeführt wird.

Die Weiterleitung der Erregung von einem zu einem anderen Neuron geschieht über **Synapsen**. Der weitaus häufigste Kontakt ist die chemische Synapse. Die Boutons an den Endverzweigungen der Axone sind der nachgeschalteten Zellmembran eng angelagert, und es entsteht ein 20–30 nm breiter synaptischer Spalt. Die Boutons als präsynaptische Struktur enthalten neben zahlreichen Mitochondrien zur Bereitstellung von Energie vor allem Vesikel mit Botenstoffen (**Transmitter**) (► Abschn. 2.3.13), die in der Regel im Perikaryon gebildet werden. Synapsen sind die Grundlage der Informationsverarbeitung bzw. -integration und spielen eine wichtige Rolle bei Lern- und Gedächtnisvorgängen.

Die Oberfläche der Dendriten und des Perikaryons ist mit einer Vielzahl von Synapsen verschiedener Herkunft und Funktion besetzt. Inhibitorisch wirksame Synapsen kommen besonders häufig am Zellkörper vor. Die Perikarya von Pyramidenzellen des Kortex und das Axoninitalsegment sind überwiegend von inhibitorischen Synapsen besetzt. Da dort auch das Aktionspotenzial entsteht, nehmen diese inhibitorischen Synapsen durch ihre Lage eine strategisch besonders günstige Position in der Verschaltungsstruktur des Nervensystems ein.

Unter dem Begriff der (**Neuro**-)**Glia** werden morphologisch und funktionell unterschiedliche Zelltypen zusam-



■ Abb. 2.4 Kontinuierliche (*links*) und saltatorische Erregungsleitung (*rechts*). Ein Aktionspotenzial (AP) ist mit einem erhöhten Na^+ -Einstrom verbunden, was zu einer Depolarisation führt. Nach einer Refraktärphase kann dann erneut ein AP gebildet werden. Bei einem nichtmyelinisierten Axon läuft dieser Prozess kontinuierlich an der Membran des Axons entlang. Bei einem myelinisierten Axon bleiben die Bildung des AP und die Depolarisation auf die Zonen der Ranvier-Schnürringe beschränkt und springen von Schnürring zu Schnürring über. Dadurch kommt es zu einer erheblichen Beschleunigung der Erregungsleitung. (Aus Zilles u. Rehkämper 1998)

mengefasst. In der Hirnrinde kommen Glia- und Nervenzellen im Verhältnis 1:1 vor. Gliazellen sind nicht direkt an der Erregungsleitung beteiligt und bilden keine Aktionspotenziale und Synapsen. Sie haben aber z. B. Rezeptoren für Neurotransmitter und Hormone und spielen bei der Transmitterregulation und -bildung eine wichtige Rolle.

Astrozyten sind u. a. an der Steuerung der Ionenkonzentration im Interzellularraum beteiligt, wirken am Aufbau der Blut-Hirn-Schranke mit und haben regulatorische Funktion bei der Erregungsübertragung. **Mantelzellen** und **Lemnozyten** tragen zur Isolierung neuronaler Elemente bei, da sie Perikarya in Ganglien und afferente Zellfortsätze in der Haut umhüllen. **Mikroglia** ist zur Phagozytose von Zellen und Zellbruchstücken fähig.

Oligodendrozyten bilden im ZNS die **Myelinscheiden** oder **Markscheiden**, die Axone umhüllen und gegeneinander isolieren (■ Abb. 2.4). Im peripheren Nervensystem bilden Schwann'sche Zellen die Markscheiden. Neben markhaltigen gibt es auch marklose Fasern. Eine Gliazelle umhüllt ca. 1 mm der Axonlänge. Zwischen den benachbarten Abschnitten der Gliaumhüllungen bleibt ein schmaler Spaltraum, in dem die Zellmembran des Neurons frei liegt – **Ranvier-Schnürring**. Während bei einem Neuron ohne Myelinscheide die Erregung kontinuierlich über die gesamte Membranstrecke weitergeleitet wird, springt sie im Fall der myelinisierten Fasern von Schnürring zu Schnürring (**saltatorische Erregungsleitung**; ■ Abb. 2.4). Dadurch wird die Erregungsleitungsgeschwindigkeit um ein Vielfaches erhöht. Für die Geschwindigkeit ist darüber hinaus die Dicke der Myelinscheide wichtig: Stark myelinisierte Fasern leiten bis zu 100-mal schneller als Axone gleichen Durchmessers ohne Myelinscheide. Myelinscheiden können in histologischen Präparaten sichtbar gemacht werden und ermöglichen so z. B. eine Darstellung von großen Faserbahnen (► Abschn. 2.1.4) und eine differenzierte Darstellung unterschiedlicher Kortexregionen (► Abschn. 2.1.3).

2.1.3 Aufbau des Kortex

- — Der Kortex lässt sich in den 6-schichtigen **Neokortex (Isokortex)** und den **Allokortex (Paläokortex und Archikortex)** untergliedern
- **Paläo- und Archikortex sind phylogenetisch älter, der Neokortex ist phylogenetisch jünger**
- **Der Kortex zeigt regionale Unterschiede in seinem mikroskopischen Aufbau (Architektonik)**



- **Diese Unterschiede sind Grundlage einer Untergliederung des Kortex in Areale**
- **Die kortikalen Areale dienen unterschiedlichen Funktionen**

Der beim Menschen besonders hoch entwickelte **Neokortex** (Neokortikalisierung) bildet den 6-schichtigen **Isokortex** und liegt zwischen den beiden Anteilen des **Allokortex**, dem **Paläokortex** und dem **Archikortex**. Isokortex und Allokortex gehen schrittweise ineinander über. Proisokortex ist Teil des Isokortex am Übergang zum Allokortex; Periallokortex gehört zum Allokortex am Übergang zum Isokortex (■ Abb. 2.5).

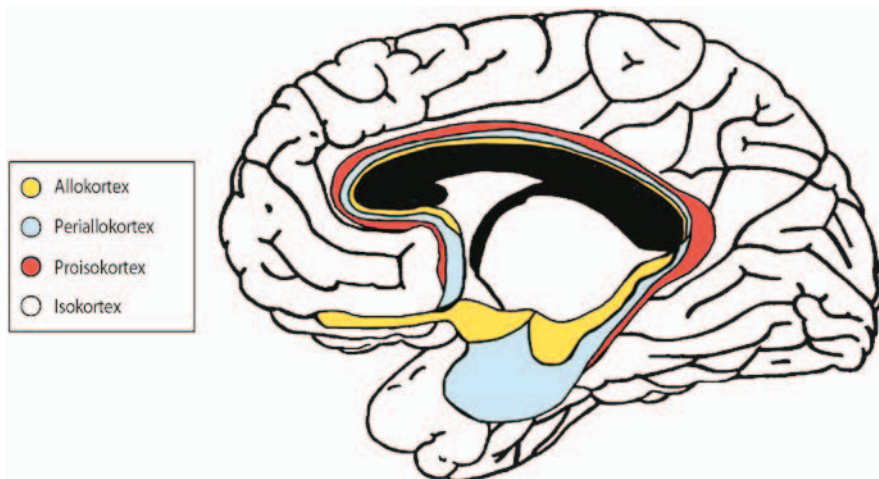
Die Begriffe »Archi-«, »Paläo-« und »Neokortex« stammen aus der vergleichenden Anatomie und beschreiben ursprünglich eine zeitliche, d. h. phylogenetische Sequenz. Danach ist der Neokortex eine Neubildung, die erst die Säugetiere kennzeichnen soll. Man weiß heute, dass funktionell, wenn auch nicht architektonisch, dem Neokortex vergleichbare Strukturen bei allen tetrapoden Wirbeltieren gefunden werden.

Die Bezeichnungen »Allo-« und »Isokortex« beziehen sich dagegen auf die histologische Struktur: Der Isokortex ist im Allgemeinen durch einen 6-schichtigen Aufbau gekennzeichnet, in den verschiedenen allokortikalen Regionen dagegen kommt es zur Ausbildung von weniger oder auch von mehr Schichten.

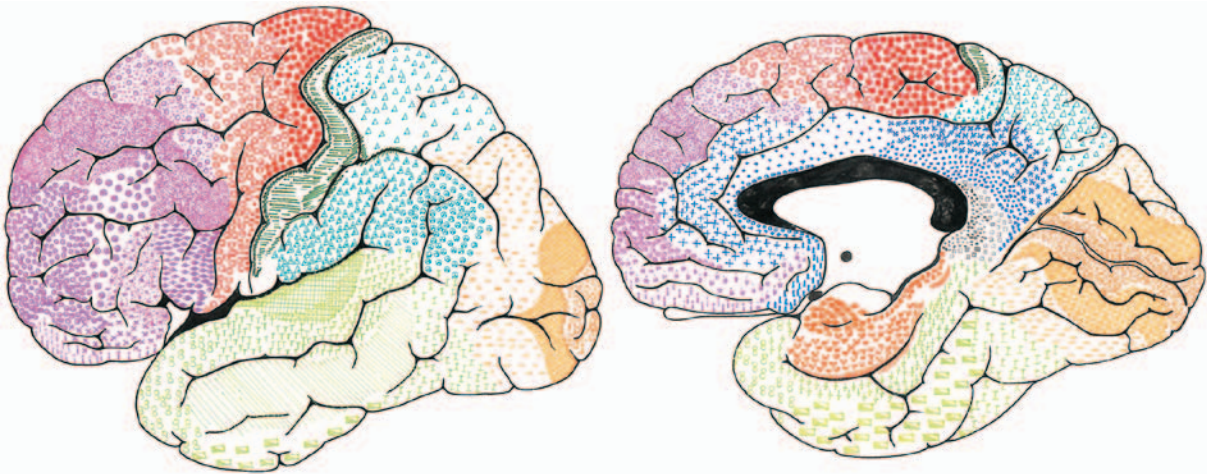
Allokortex

Der **Paläokortex** umfasst folgende Rindengebiete:

- Bulbus olfactorius
- Regio retrobulbaris
- Regio amygdalaris (kortikaler Anteil der Amygdala)
- Tuberculum olfactorium
- Septum mit Regio periseptalis und Regio diagonalis



■ **Abb. 2.5** Medianansicht einer rechten Hemisphäre mit der Einteilung des Kortex. (Mod. nach Stephan 1975)



■ **Abb. 2.6** Hirnkarte der allo- und isokortikalen Areale der menschlichen Hirnrinde nach Brodmann (1909). Die einzelnen Areale sind mit unterschiedlichen Farben und Schraffuren dargestellt

- Regio praepiriformis
- Teile des Inselkortex (Regio peripalaeocorticalis claustralis)

Der **Archikortex** umfasst folgende Regionen:

- Hippocampus retrocommissuralis (Cornu ammonis, Fascia dentata, Subiculum)
- Hippocampus supra- und precommissuralis
- Presubiculum und Parasubiculum
- Regio entorhinalis
- Regio retrosplenialis
- Regio cingularis

Isokortex

Hier finden sich Repräsentationsgebiete für alle Sinnesysteme mit Ausnahme des olfaktorischen Systems und die Ursprungsgebiete motorischer Bahnen (**Primärgebiete**). Die Größe des Isokortex geht jedoch in besonderem Maße auf die Ausdehnung solcher Gebiete zurück, die zwischen den Primärgebieten liegen. Diese Regionen sind als unimodale Gebiete mit der Analyse spezieller Aspekte einer bestimmten Modalität befasst (**unimodale Sekundär- und Tertiärgebiete**). In den **multimodalen Assoziationsgebieten** werden dann verschiedene Modalitäten zusammengeführt. Diese Gebiete bilden letztlich die Grundlage für eine ganzheitliche Wahrnehmung der uns umgebenden Welt und die Voraussetzung für komplexes und flexibles Verhalten.

Der Kortex ist an der Gyrusuppe breiter als im Fundus eines Sulcus. In den meisten Regionen ist der Kortex ca. 3 mm dick. Er ist besonders schmal im Gyrus postcentralis und im Bereich des Sulcus calcarinus (ca. 2 mm) und besonders dick im Gyrus praecentralis (ca. 4 mm).

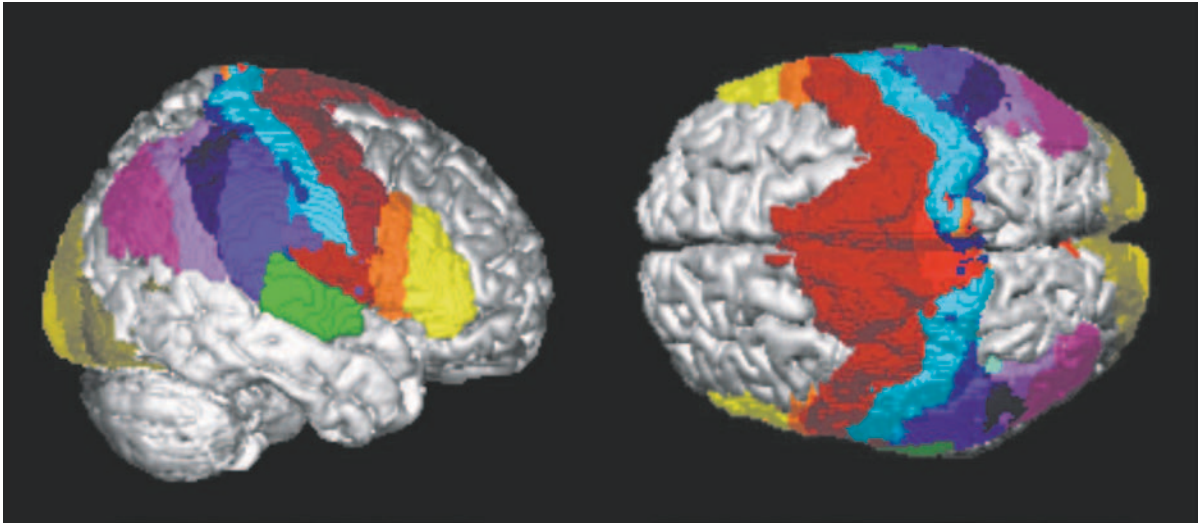
Zellkörperfärbungen des menschlichen Kortex (z. B. Nissl) zeigen, dass unterschiedlich geformte und ver-

schieden große Neurone in den Schichten des Kortex gefunden werden. Im Isokortex heißen die 6 Schichten Lamina molecularis (I), Lamina granularis externa (II), Lamina pyramidalis externa (III), Lamina granularis interna (IV), Lamina pyramidalis interna (V) und Lamina multiformis (VI).

Die Ausprägung dieser 6 Schichten bzgl. ihrer Breite, Packungsdichte der Nervenzellen und Anordnung variiert regional (**Zytoarchitektur**). Beispiele für kortikale Regionen mit unterschiedlicher Zytoarchitektur sind der agranuläre motorische Kortex, bei dem die Lamina granularis interna nicht ausgeprägt ist (► Abschn. 2.3.8) und der primäre visuelle Kortex, der im Gegensatz dazu eine sehr breite und reich differenzierte Lamina granularis interna aufweist, in die afferente Fasern aus der Sehbahn ziehen (► Abschn. 2.3.1).

Unterschiede in der Zytoarchitektur wurden schon früh dazu herangezogen, um die Hirnrinde in unterschiedliche Areale zu untergliedern. Eine der bekanntesten und auch heute noch weit verbreiteten Karten ist die von Korbinian **Brodman** aus dem Jahr 1909 (■ Abb. 2.6). Neben regionalen Unterschieden in der Zytoarchitektur kann man auch bauliche Besonderheiten einzelner Hirnregionen in Bezug auf **Myeloarchitektur** (erkennbar in Markscheidenfärbungen histologischer Präparate), Transmitter und Enzyme (immunohistochemische und histochemische Marker) sowie die Rezeptoren (Autoradiographie, Immunhistochemie, In-situ-Hybridisierung) feststellen. Die Mikrostruktur hat einen direkten Bezug zu den modernen bildgebenden Verfahren – so beeinflussen z. B. Zyto- und Myeloarchitektur das MR-Signal und regionale Rezeptorverteilungen für Transmitter lassen sich mit Rezeptor-PET in vivo erfassen.

Die Brodmann-Karte zeigt eine schematisierte Darstellung eines »typischen« Gehirns. Sie berücksichtigt nicht



■ **Abb. 2.7** Oberflächenrekonstruktion des individuellen MNI-Referenzgehirns mit »maximum probability maps« kortikaler Areale. Die Darstellung basiert auf Kartierungen der Areale in histologischen Serienschnitten von 10 Post-mortem-Gehirnen. Ansichten von lateral und dorsal. Jedes Areal ist mit einer anderen Farbe gekennzeichnet. Areale in der Tiefe des Gehirns, z. B. Te 1 auf dem Heschl-Gyrus, sind nicht zu sehen

die interindividuelle Variabilität, ein Umstand, dessen sich Brodmann durchaus bewusst war. Die Karte erlaubt es deshalb nicht, auf die genaue Lage der Grenze eines zytoarchitektonischen Areals in Bezug auf Gyri und Sulci zu schließen. Die zytoarchitektonischen Areale und das Sulcuspuster variieren unabhängig voneinander. Schließlich benötigen funktionell bildgebende Untersuchungen zur topographischen Interpretation von Befunden dreidimensionale Vorlagen und keine zweidimensionale schematische Zeichnung.

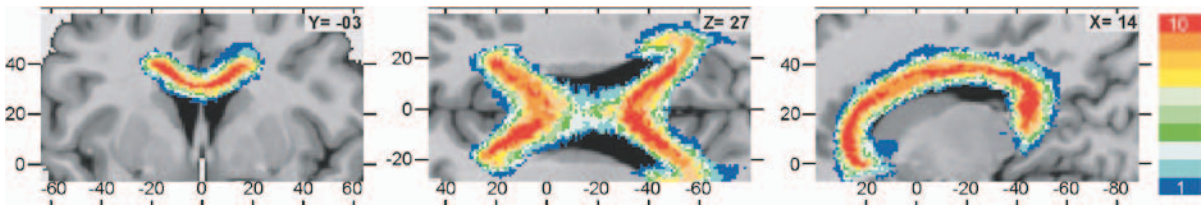
Eine Weiterentwicklung der klassischen architektonischen Karten wie der von Brodmann sind die **probabilistischen, architektonischen Karten**, die in den Arbeitsgruppen der Autoren dieses Kapitels entwickelt werden (■ Abb. 2.7). Diese Karten basieren auf einem untersucherunabhängigen Verfahren zur Grenzfindung der verschiedenen kortikalen Areale in 10 Post-mortem-Gehirnen. Sie beinhalten neben kortikalen Arealen auch subkortikale Kerngebiete und Faserbahnen, die nach dreidimensionaler Rekonstruktion der histologischen Schnittserien auf ein Referenzgehirn wie das »MNI-Gehirn« (<https://www.jubrain.fz-juelich.de> [Zugriff: 27.09.2012]) registriert wurden. Dieses Referenzsystem wird im Rahmen vieler bildgebender Studien zur räumlichen Normierung genutzt und eignet sich deshalb für Struktur-Funktions-Vergleiche. Hierbei können z. B. auf probabilistischer Grundlage funktionelle und strukturelle MR-Befunde von Untersuchungen an Probanden oder Patienten zu bestimmten neuropsychologischen Paradigmen mit den in Post-mortem-Gehirnen gewonnenen mikrostrukturellen Karten direkt verglichen werden.

2.1.4 Große Faserbahnsysteme

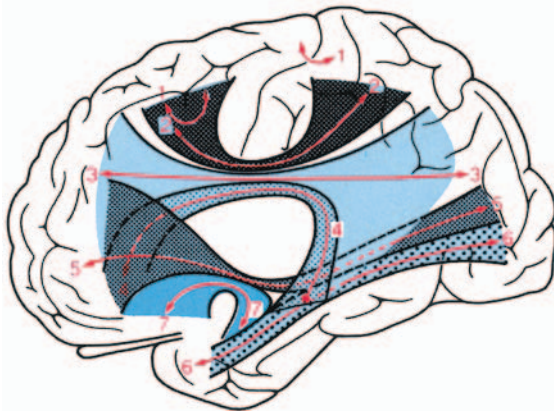
Die weiße Substanz des Telenzephalons enthält myelinisierte und nichtmyelinisierte Nervenfasern, die in 3 Fasersystemen mit unterschiedlichem Verlauf organisiert sind:

- — **Projektionsbahnen verlaufen zwischen Rindengebieten und Kerngebieten, auf- und absteigend; ein großer Teil verläuft durch die Capsula interna**
- **Kommissurenbahnen verbinden Rindengebiete der beiden Hemisphären**
- **Assoziationsfasern verbinden Rindengebiete einer Hemisphäre**

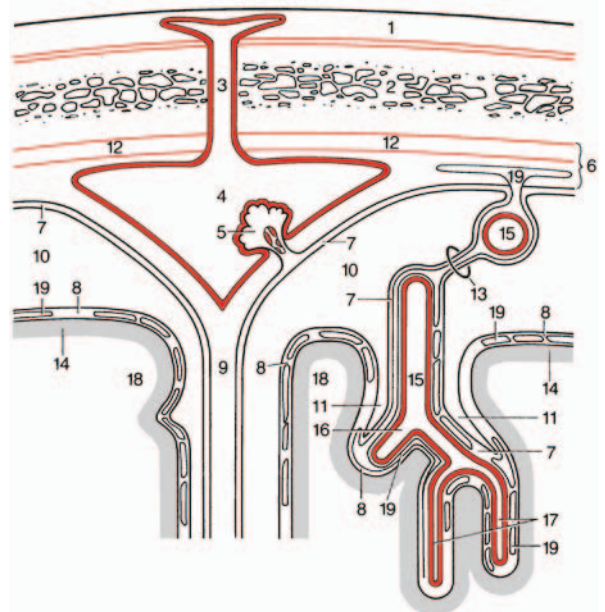
Für die funktionelle Bildgebung und Orientierung im stereotaxischen Raum haben die **Commissura anterior** (CA) und die **Commissura posterior** (CP) eine besondere Bedeutung (■ Abb. 2.8). Die gedachte Verbindung zwischen oberem Rand der CA und unterem Rand der CP (**CA-CP-Linie**) definiert die 3 orthogonal zueinander stehenden Raumrichtungen (frontal, horizontal, sagittal), der Schnittpunkt zwischen oberem Rand von CA und der Interhemisphärenebene definiert den Ursprung nach der Konvention von Talairach und Tournoux (1988). Diese Konvention ermöglicht eine räumliche Vergleichbarkeit von Bilddatensätzen in einem gemeinsamen Referenzraum. Neben dem Talairach-Raum werden auch andere Konventionen (z. B. der MNI-Raum, der anatomische MNI-Raum) verwendet.



■ **Abb. 2.10** Probabilistische Karte des Corpus callosum. Die Karte zeigt die interindividuelle Variabilität der Faserbahn in 10 Post-mortem-Gehirnen. Frontal-, Horizontal- und Sagittalschnitt. Ausrichtung entlang der CA–CP-Linie. Die Überlagerung der individuellen Karten vor dem Hintergrund des individuellen MNI-Gehirns ist farbkodiert (z. B. rot – Überlagerung aller 10 Gehirne)



■ **Abb. 2.11** Wichtige Assoziationsbahnen in den Endhirnhemisphären. 1 Fibræ arcuatae, 2 Fasciculus occipitofrontalis superior (verbindet Lobi frontalis und occipitalis), 3 Fasciculus longitudinalis superior (verbindet Lobi frontalis, parietalis und occipitalis), 4 Fasciculus arcuatus (verbindet Wernicke- und Broca-Region), 5 Fasciculus occipitofrontalis inferior (verbindet Lobi frontalis und occipitalis), 6 Fasciculus longitudinalis inferior (verbindet Lobi temporalis und occipitalis), 7 Fasciculus uncinatus (verbindet Amygdala mit basalen Regionen des Lobus frontalis). (Aus Zilles u. Rehkämper 1998)



■ **Abb. 2.12** Hirnhäute und äußere Liquorräume im Frontalschnitt. 1 Kopfhaut, 2 Schädeldach, 3 V. diploica, 4 Sinus sagittalis superior, 5 Pacchioni-Granulationen, 6 Dura mater, Periost und Subduralspalt, 7 Arachnoidea, 8 Pia mater, 9 Falx cerebri, 10 Subarachnoidalraum, 11 Virchow-Robin-Raum, 12 Periost, 13 Arachnoideatrabekel, 14 von Astrozytenfüßen gebildete Glimembran (Membrana limitans), 15 Arterie, 16 Arteriole, 17 Kapillare, 18 Gehirn, 19 Interzellularraum der Leptomeninx. (Aus Zilles u. Rehkämper 1998)

2.2 Hirnhäute, Ventrikel und Blutgefäße

2.2.1 Hirnhäute

- **Es werden harte (Pachymeninx) und weiche Hirnhaut (Leptomeninx) voneinander unterschieden**
- **Die harte Hirnhaut stellt ein mechanisches Schutzsystem für das Zentralnervensystem dar**
- **Die weiche Hirnhaut bildet die Liquor-Blut-Schranke**

Das ZNS ist von außen nach innen von 3 Bindegewebshüllen (Meningen) umgeben (■ Abb. 2.12):

- Dura mater
- Arachnoidea
- Pia mater

Arachnoidea und Pia mater bilden die Leptomeninx, die Dura mater die Pachymeninx.

Dura mater

Die Dura mater (■ Abb. 2.12) besteht aus straffem Bindegewebe mit geflechtartig angeordneten Kollagenfasern, die von Mesothel bedeckt sind. Sie hat ein inneres und ein äußeres Blatt. Die Dura ist fest mit dem Periost (äußeres Blatt) der Schädelknochen verwachsen. Sie bildet innere Duplikaturen: Falx cerebri, Falx cerebelli und Tentorium cerebelli.

- **Die Falx cerebri** ragt in die Fissura longitudinalis cerebri hinein und bildet die Sinus sagittales superior und inferior

Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie

Schneider, F.; Fink, G.R. (Hrsg.)

2013, XX, 827 S., Hardcover

ISBN: 978-3-642-29799-1