

1 Vom Gehirn und vom Neuron

Das menschliche Gehirn besteht aus etwa 100 Milliarden Nervenzellen (*Neurone*), die durch etwa 100 Billionen Kontaktstellen (*Synapsen*) miteinander in Verbindung stehen. Unter dem Begriff *Zentralnervensystem* (ZNS) werden das Gehirn und das Rückenmark zusammengefasst. Als peripheres Nervensystem werden alle Anteile außerhalb des ZNS bezeichnet: vor allem die motorischen Nerven, die das Rückenmark verlassen, und die sensiblen Nerven, die vom Gewebe zum Rückenmark kommen, und auch das vegetative Nervensystem. Der *Kortex*, die Rinde des Großhirns, ist 2–5 mm dick und so stark gefaltet, dass seine Oberfläche 1800 Quadratzentimeter einnimmt. Diese dichte Zellschicht wird die graue Substanz genannt, während die zu- und wegführenden Nervenfasern die weiße Substanz bilden. Die Nervenfasern verbinden die Hirnzentren miteinander, oder sie verlassen das Gehirn in dichten Bündeln zum Rückenmark hin, von wo sie ihre Signale als motorische Nerven zu den Muskeln (*efferente* Nerven) leiten, oder dem Gehirn als sensible Nerven Informationen aus der Peripherie (*afferente* Nerven) bringen.

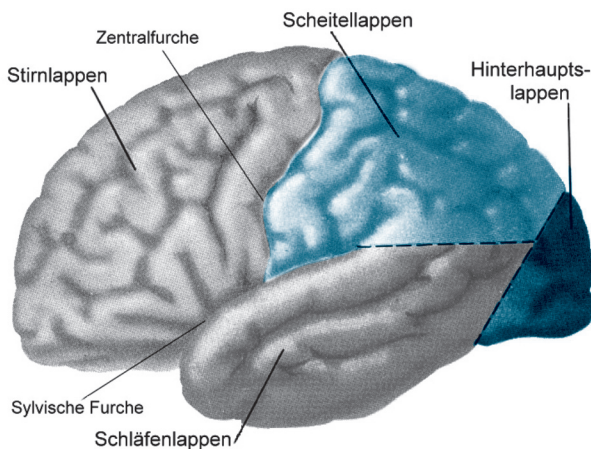


Abb. 1.1: Die Lappen des Großhirns und zwei wichtige Hirnfurchen

Den größten Raum im ZNS nimmt das Großhirn ein. Es besteht aus einer linken und einer rechten Großhirnhemisphäre. Beide sind durch ein breites Faserbündel, den Balken (*Corpus callosum*), miteinander verbunden. Sie werden in jeweils vier Lappen

unterteilt (► Abb. 1.1): Stirnlappen (*Frontallappen*), Scheitellappen (*Parietallappen*), Schläfenlappen (*Temporallappen*) und Hinterhauptslappen (*Okzipitalappen*). Das Stirnhirn und der Scheitellappen sind durch eine tiefe Furche, die Zentralfurche (*Sulcus centralis*) voneinander getrennt. Jeder Lappen hat seine eigenen Windungen und Furchen. So liegt die vordere Zentralwindung (*Gyrus präzentralis*) vor, die hintere Zentralwindung (*Gyrus postzentralis*) hinter der Zentralfurche. Die *Sylvische Furche* trennt den Stirnlappen vom Schläfenlappen.

Zwischen den Großhirnhemisphären und um den dritten Hirnrinnenraum (*Ventrikel*) herum liegt das Zwischenhirn. Es besteht aus dem *Thalamus*, dem darunter liegenden *Hypothalamus* und der kleinen, hormonbildenden *Hypophyse*. Der Thalamus ist eine außerordentlich wichtige Sammel- und Umschaltstelle. Außer der Riechbahn werden dort alle ankommenden Informationen (sensorisch, optisch, akustisch) von der einen Nervenbahn auf mehrere andere verteilt. Solche Umschaltzentren werden im Gehirn auch häufig Kern (*Nucleus*) genannt. Für das Sehen und das Hören gibt es im Thalamus Umschaltstationen, die dem Thalamus wie kleine Vorwölbungen aufgesetzt sind, die so genannten *Knienböcker*. Aber auch alle ausgehenden Signale wie z. B. die motorischen Befehle werden im Thalamus umgeschaltet. Der Thalamus ist daher das unter der Rinde liegende Tor zum Kortex des Großhirns. Im Hypothalamus werden wichtige unbewusste Regulationen gesteuert: der Wasserhaushalt, die Temperaturregulation, die Nahrungsaufnahme.

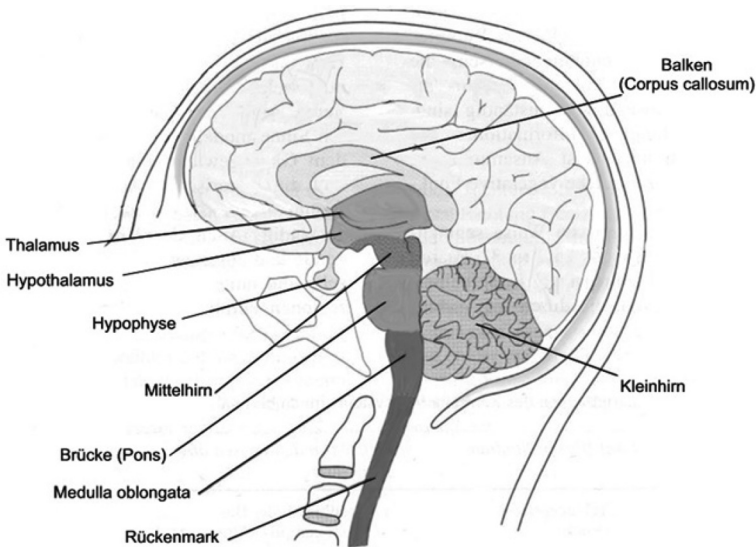


Abb. 1.2: Zwischenhirn, Mittelhirn, Hirnstamm, Kleinhirn

Das Mittelhirn ist ein kleiner Gehirnteil, der das Zwischenhirn und die Brücke (*Pons*) miteinander verbindet. Brücke und das darauf sitzende Kleinhirn (*Zerebellum*) bilden zusammen eine funktionelle Einheit (► Abb. 1.2). Das Kleinhirn übernimmt Auf-

gaben in der Feinsteuerung der Motorik und in der Seh- und Hörwahrnehmung. Seine Fältelung und seine Zellstruktur sind besonders fein differenziert und dicht. Die Oberfläche des Kleinhirns erreicht eine erstaunliche Größe: Sie entspricht 75 % der Oberfläche des Großhirns.

Unterhalb des Zwischenhirns liegt der *Hirnstamm*. Dazu gehören das Mittelhirn, die Brücke und das verlängertes Rückenmark (*Medulla oblongata*). (Der Begriff *Stammhirn* bezeichnet den Hirnstamm und zusätzlich noch das Zwischenhirn.). Im Hirnstamm verlaufen nicht nur auf- und absteigende Bahnen, sondern er ist auch der Sitz zahlreicher Hirnnervenkerne. Als Hirnnerven werden diejenigen Nerven bezeichnet, die nicht aus dem Rückenmark entspringen, sondern direkt aus dem Gehirn kommen. Sie verlassen den knöchernen Schutz des Gehirns an verschiedenen Stellen des Schädels und versorgen überwiegend die Organe des Kopfes. Die Hirnnervenkerne III, IV und VI steuern die Bewegungen der Augäpfel, der Hirnnervenkern VII (*Fazialisnerv*) ist für die Steuerung der Mimik wichtig und der VIII. Hirnnerv sammelt die Informationen vom Innenohr und vom Gleichgewichtsorgan. Nur der X. Nerv, der sogenannte Vagusnerv, zieht eine längere Bahn: Er ist ein Hauptnerv des vegetativen Nervensystems und steuert die Tätigkeit vieler innerer Organe.

Abbildung 1.3 zeigt die Mitte des Gehirns in einer mittleren Schnittebene, gewonnen mit einer Untersuchung, die Kernspintomographie oder Magnetresonanztomographie (*MRT*) genannt wird. Das MRT ist ein bildgebendes Verfahren, das eine Darstellung der Struktur des Gewebes erlaubt. Das Bild zeigt auch die Gürtelwindung (*Gyrus cinguli*) oberhalb des Balkens, die zum limbischen System gehört (► Abb. 1.3).

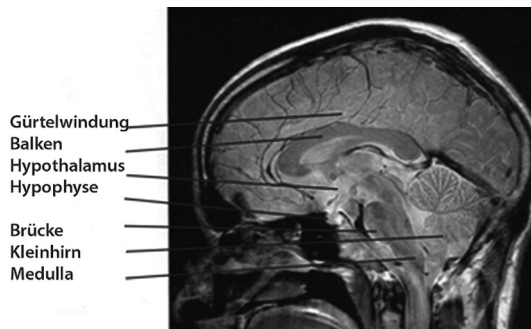


Abb. 1.3: Mittelschnitt durch das Gehirn in der Magnetresonanztomographie (MRT)

Ein anderes wichtiges Kernsystem befindet sich im Hirnstamm: die *Formatio reticularis*. Der Name (»netzartige Bildung«) rührt aus der diffus und maschenartig miteinander verbundenen Struktur, die wie ein Netz von vielen Kerngebieten wirkt und Anschluss an den Thalamus und an das Rückenmark hat. Die *Formatio reticularis* ist für zahlreiche unbewusste Funktionen verantwortlich: Kreislauf und Atemzentrum, Brechzentrum, Schmerz, Emotionen, Harnblasensteuerung, Anteile der Be-

wegungssteuerung und über den *Nucleus accumbens* und den *Nucleus ruber* Anteile der Aufmerksamkeitssteuerung.

Nach diesem Blick auf das Gehirn von außen wenden wir uns nun der *Feinstruktur des ZNS* zu. Beginnen wir mit der Funktion der Nervenzellen, den *Neuronen* (► Abb. 1.4). Sie erfassen und verarbeiten alle Informationen, die das Gehirn erhält, und sie können gleichzeitig senden und empfangen. Das eingehende Signal kommt entweder über ankommende (afferente) Nervenfasern anderer Neurone oder durch eigene Fasern, die *Dendriten*. Die Verbindungsstellen (*Synapsen*) mit anderen Nervenzellen kontaktieren mit ihnen direkt am Zellkörper oder über Synapsen, die auf den Dendriten liegen. Bei manchen Nervenzellen gibt es eine besonders starke und lange auslaufende Faser: das *Axon*. Eine Erregung im Neuron wandert besonders schnell über das Axon, weil es über Abschnitte verfügt, die Markscheiden genannt werden. Diese Markscheiden-Abschnitte haben Verengungen und Einschnürungen, die *Schnürringe*.

Markscheiden bestehen aus *Myelin*-Lamellen, die von speziellen Zellen gebildet werden und sich wie Spiralen um die Axone winden. Myelin heißt Mark und ist eine gewundene Membran. Solche markumwickelten Axone können die Erregung schneller leiten als marklose Fasern. Die hohe Übertragungsgeschwindigkeit der markhaltigen (myelinisierten) Fasern kommt dadurch zustande, dass das Myelin wie eine Isolationsschicht wirkt. Dadurch wird die Veränderung der elektrischen Ladung nicht kontinuierlich fortgeleitet, sondern sie springt von einem nicht markumlagerten Schnürring zum nächsten. Myelin bildet sich in der ganzen Kindheit und Jugend und ist der Grund dafür, dass die Erregungsübertragung mit zunehmendem Alter immer schneller wird und das Volumen des Gehirns noch ständig zunimmt, obwohl ab der Geburt keine neuen Neurone mehr gebildet werden.

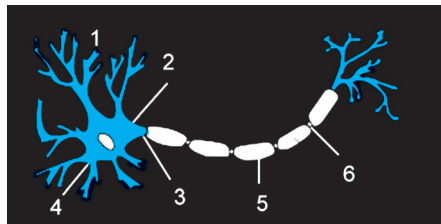


Abb. 1.4: Ein Neuron (1: Dendriten (blau), 2: Zellkörper, 3: Axon, 4: Zellkern, 5: Myelinscheide (weiß), 6: Schnürring)

Die Fortleitung von Signalen im Neuron beruht auf chemischen und elektrischen Vorgängen. Zwischen dem Inneren der Nervenzelle und der Umgebung besteht ein elektrisches Spannungsgefälle, ein *elektrisches Potenzial*. Diese Spannung kann an der Zellmembran fein abgestuft werden, je nach der Stärke der Erregung des Neurons. Diese wiederum wird von der Stärke der eingehenden Signale bestimmt. Überschreitet das Potenzial an den ausgehenden (efferenten) Fasern eine bestimmte Schwelle, wird plötzlich ein Aktionspotenzial ausgelöst. Die Auslösung folgt dem Alles-oder-Nichts-Prinzip, d. h. entweder ist die Erregung überschwellig und das

Potenzial wird ausgelöst oder es wird nicht ausgelöst. Es gibt nur Null (Ruhe) oder Eins (Erregung). Das *Aktionspotenzial* breitet sich mit großer Geschwindigkeit in den auslaufenden Fasern aus.

Den elektrischen Ruhezustand eines Neurons nennt man *Ruhepotenzial*. Damit ist gemeint, dass die Zellmembran eine Spannung aufrechterhält, indem ständig durch eine chemische Reaktion Natrium aus der Zelle herausgepumpt und Kalium eingelassen wird. Diese Natrium-Kalium-Pumpe führt an der Zellmembran zu einem Spannungsungleichgewicht, eben dem Ruhepotenzial. In der Membranwand gibt es Kanäle für *Ionen*, durch die bei einer bestimmten Spannung zwischen dem Inneren der Zelle und dem Zellaußenraum schlagartig innerhalb einer Millisekunde Natriumionen in das Zellinnere einströmen. Das Ruhepotenzial, eine im Zellinneren negative Ladung, kehrt sich nun plötzlich in eine positive Ladung um. Diesen Potenzialumschwung nennt man ein *Aktionspotenzial*. Es kann über das Axon an andere Zellen fortgeleitet werden. Das Aktionspotenzial besteht aus einem Entladungsanteil (*Depolarisation*) und einer kurzen Phase, in der der Natriumeinstrom nach einer Millisekunde abgestoppt und Kalium ausgeschleust wird (*Repolarisation*), um den ursprünglichen Ruhezustand wiederherzustellen. Nach Ablauf des Aktionspotenzials ist das Neuron für 1–2 Millisekunden nicht wieder erregbar (*Refraktärzeit*). Von außen kommende Reize können zwar aufgenommen werden, aber sie führen nicht zu einem neuen Aktionspotenzial.

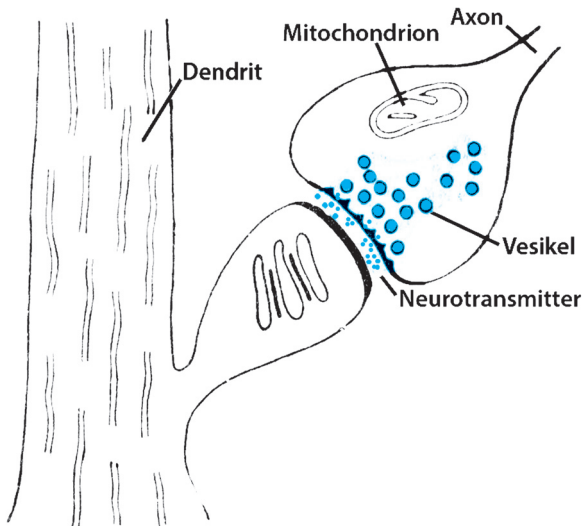


Abb. 1.5: Struktur einer Synapse zwischen Axon und Dendrit

Wenn die Erregung mit einem Aktionspotenzial über ein Axon läuft, wird sie über viele knospenartige Ausläufer (Synapsen) an benachbarte Zellkörper und deren Dendriten weitergegeben. In diesen Synapsenknöpfchen gibt es Bläschen, die prall mit Botenstoffen (*Neurotransmittern*) gefüllt sind. Ihnen gegenüber liegt an der

Synapse des benachbarten Zellkörpers oder Dendriten eine Empfangsmembran. Kommt nun das Aktionspotenzial an die Synapse, werden die Neurotransmitter innerhalb von einer Millisekunde aus den Bläschen entlassen und durch die Synapsenmembran in den Zwischenraum zwischen Synapse und Empfangsmembran (*postsynaptische* Membran) geschickt (► Abb. 1.5). Den Synapsenspalt überschreiten sie und gelangen an der Empfangsmembran auf spezielle Rezeptoren, die spezifisch immer nur einen bestimmten Botenstoff binden. Die Bindung der Botenstoffe an die Rezeptoren löst in der Nachbarzelle wieder einen Spannungsunterschied aus. Je nach Art des Neurotransmitters und je nach Art des Rezeptors wirkt dieses Potenzial an der Nachbarzelle erregend oder hemmend.

Das einzelne Neuron kann also nach dem Alles-oder-Nichts-Prinzip erregt werden und eine Erregung aussenden oder nicht. Wie kann es dann eine Abstufung der Erregung geben? Es gibt zwei Antworten: Zum einen wirkt sich die Stärke des Reizes auf die Anzahl der Aktionspotenziale pro Zeiteinheit aus. Die andere Antwort ergibt sich, wenn man eine Gruppe von Neuronen betrachtet: Manchmal überwiegen die hemmenden, manchmal die erregenden Impulse. Die Modulation einer Information geschieht durch die Summe von erregenden und hemmenden Einflüssen. Die Feinjustierung ist also in der Zusammenarbeit von funktionell kooperierenden Neuronen möglich.

Eine Sonderform einer synaptischen Verbindung ist die Verbindung zwischen einem Axon und einer Muskelzelle: Die Stelle, an der eine Synapse auf eine Muskelfaser trifft, nennt man die *motorische Endplatte*. Das ankommende Axon bildet einen synaptischen Endkolben, der viele kleine Energie liefernde Zellorganellen (*Mitochondrien*) und Bläschen (*Vesikel*) enthält (► Abb. 1.6).

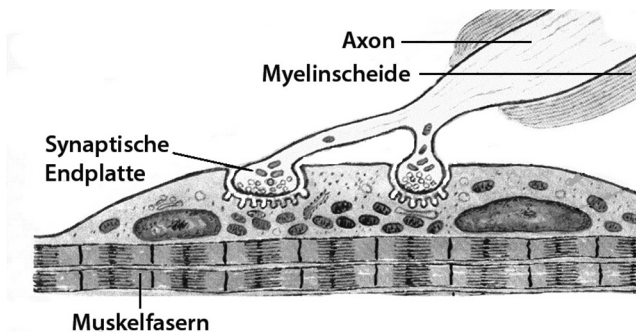


Abb. 1.6: Motorische Endplatte: eine Synapse an der Muskelfaser

Die Vesikel sind vollgestopft mit dem Neurotransmitter *Acetylcholin*. Kommen Aktionspotenziale über das zuleitende Axon an, so öffnen sich Kalziumionenkanäle. Die acetylcholinhaltigen Bläschen entleeren sich an der Zellmembran in den synaptischen Spalt. Das freigesetzte Acetylcholin bindet sich an die Rezeptoren der Muskelfaser-Endplatte. Dies ist das Signal zur Kontraktion der darunter liegenden Muskelfaser. Die Größe einer motorischen Einheit entscheidet, wie viele Skelettmuskelfasern sich gleichzeitig zusammenziehen.

Zusammenfassung in Form eines Glossars

1. Makroskopie

Aufbau des Zentralnervensystems

Großhirn und Zwischenhirn: Das Großhirn wird beidseits in vier Lappen eingeteilt: Stirn-, Scheitel-, Schläfen- und Hinterhauptslappen. Die Hirnwindungen (Gyri) haben eine symmetrische Architektur. Von den trennenden Rinnen (Sulci) sind zur Orientierung besonders die Zentralfurche und die Sylvische Furche wichtig. Das darunterliegende Zwischenhirn besteht aus dem Thalamus, dem Hypothalamus und der Hypophyse.

Brücke und Kleinhirn: Die Brücke (Pons) und das Kleinhirn (Zerebellum) bilden eine funktionelle Einheit. Das Kleinhirn ist in sehr feine Falten gegliedert und hat annähernd so viele Neuronen wie das Großhirn. Die Großhirnschenkel und der dicke Beginn des Rückenmarks (Medulla oblongata) bilden den Hirnstamm. Dort verlaufen auf- und absteigende Bahnen und entspringen die Hirnnerven. Dies sind Nerven, die direkt aus dem Gehirn kommen.

Kern: Als Kern (Nukleus) bezeichnet man dichte Ansammlungen von Neuronen, die als Umschaltstelle und Verbindung zwischen verschiedenen Hirnzentren dienen. Das netzartige Kerngebiet der Formatio reticularis hat vielfältige unbewusste Funktionen: Steuerung von Kreislauf und Atmung, Schmerz, Emotionen, Harnblasensteuerung, Anteile der Bewegungssteuerung und der Aufmerksamkeitssteuerung.

2. Mikroskopie

Aufbau des Neurons

1. Nervenzellkörper
2. Ausläufer:

Dendrit: kurz und verzweigt; zuführende Fortsätze nehmen die ankommende Erregung auf und leiten sie zum Nervenzellkörper. Axon: wegführender Fortsatz, leitet die Erregung vom Nervenzellkörper fort; entspringt im Zellleib und zieht als Fortsatz zu anderen Nervenzellen oder zu einem Muskel

Synapse: Umschaltstelle für die Erregungsübertragung von einer Nervenzelle auf eine zweite oder von einer Nervenzelle auf ein Erfolgsorgan. Die Erregungsübertragung erfolgt durch chemische Überträgerstoffe (Transmitter)

Markscheidenzellen: Zellen, die Mark (Myelin) bilden

Schnürring: Einschnürung zwischen zwei Markscheidenzellen

Leitungsrichtung von Nervenfasern:

1. afferent: von der Peripherie zum Gehirn und Rückenmark, z. B. sensible Nervenfasern, die Reize von einem Sinnesorgan an das ZNS vermitteln
2. efferent: vom ZNS zum peripheren Nervensystem

Alles-oder-nichts-Gesetz: Als Antwort auf einen Reiz kommt entweder ein vollständiges oder gar kein Aktionspotenzial. Ausschlaggebend ist, ob der Reiz über dem Schwellenwert liegt. Nach einer Reizung bleibt der Nerv für eine bestimmte Zeit unerregbar (refraktär). Die Stärke des Reizes wirkt sich auf die Anzahl der Aktionspotenziale pro Zeiteinheit aus. Neuronengruppen können die Stärke einer Reizantwort über die Zahl der erregenden oder hemmenden Synapsen modulieren.

Der periphere Nerv: In einem peripheren Nerv laufen mehrere Nervenfasern, die von Markscheiden umhüllt sind. Er enthält afferente und efferente Nervenfasern, teilt sich mehrfach auf oder vereinigt sich mit anderen Nerven. Die über die Schnürringe springende Erregung pflanzt sich schneller fort als bei marklosen Axonen, an denen die Erregung kontinuierlich entlangläuft.

Weiterführende Literatur

- Carter, R. (2019). *Das Gehirn*. München: Dorling Kindersley.
Faller, A. & Schünke, G. (2016). *Der Körper des Menschen*. Stuttgart: Thieme.
Huch, R. & Jürgens, K. (2019). *Mensch, Körper, Krankheit*. München: Urban & Fischer.

2 Motorik

Definition

Motorik bedeutet sowohl *Bewegung* als auch *Haltung*. Haltung und Bewegung werden vom zentralen und vom peripheren Nervensystem gesteuert und kontrolliert, teils bewusst und teils unbewusst.

Zu Beginn sollen einige Begriffe erläutert werden. Die vom Zentralnervensystem (ZNS) kontrollierte, bewusste Bewegung ist die *Willkürmotorik*. Als *Körpermotorik* bezeichnet man die Koordination der Haltung und Bewegung von Rumpf und Extremitäten. Unter *Handmotorik* versteht man die Handgeschicklichkeit und die Koordination der Fingerbewegungen. *Statomotorik* meint die Regulierung von Gleichgewicht, Aufrichtung und Gang.

Motorik ist eingebettet in ein System, das sich gegenseitig beeinflusst und kontrolliert. Dazu gehören das motorische, das sensible und das vegetative System. Diese drei Systeme haben unterschiedliche Aufgaben.

- *Motorisches System*
Steuerung der Willkürbewegungen und der reflektorischen, unbewussten Anpassung der Muskelaktivitäten an die äußeren Bedingungen.
- *Sensorisches System*
Erfassung und Verarbeitung (*taktil-kinästhetische Wahrnehmung*) von Signalen der Sinnesorgane in der Muskulatur, den Sehnen und den Gelenken an die Gehirnzentren, evtl. mit Bewusstwerdung.
- *Vegetatives (autonomes) System*
Koordination und Anpassung der Tätigkeit der inneren Organe (Atmung, Herz und Kreislauf, Verdauung, Blase). Es arbeitet »autonom«, also ohne bewusste Kontrolle.

Die *Sensorik* ist das System des Fühlens und der Körperwahrnehmung. Betrachten wir beide Systeme, Motorik und Sensorik, als eine Einheit, in der das eine System ständig Informationen des anderen Systems verarbeitet und rückmeldet, so sprechen wir von *Sensomotorik* (auch ► Kap. 11). Die Steuerung der Motorik ist jedoch nicht allein Aufgabe des taktil-kinästhetischen Systems, sondern es sind auch Teilbereiche der visuellen Verarbeitung, der Hörverarbeitung und des Gleichgewichtssystems beteiligt. Denken wir hingegen vor allem an ein Zusammenwirken von Motorik mit der psychischen und kognitiven Entwicklung, so sprechen wir von *Psychomotorik*.

Der unbewusste Antrieb zu einem Bewegungsablauf geht von subkortikalen, also unter der Hirnrinde gelegenen *Motivationsarealen* im Stirnhirn und im limbischen System aus. Das limbische System hat eine besondere Bedeutung bei der Verarbeitung von Emotionen und bei Gedächtnisleistungen. Emotionen sind ja oft ein wichtiger Antrieb für Bewegungsleistungen (ausführlich dazu ► Kap. 15). Automatisierte Bewegungen wie Hüpfen und Fahrradfahren werden anfangs bewusst erlernt, später unbewusst gesteuert.

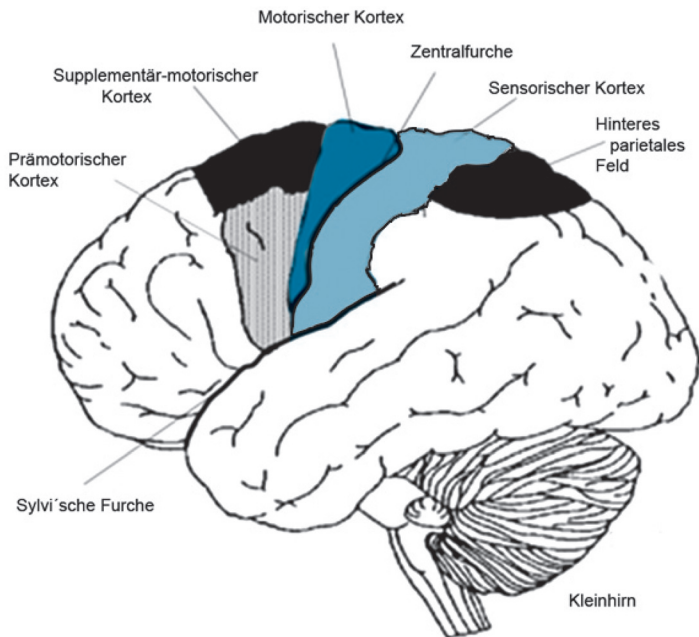


Abb. 2.1: Großhirnareale der motorischen Steuerung

Bewusste Bewegungsmuster wie z.B. das Ausweichen vor einem Hindernis werden im *supplementär-motorischen Kortex* und im prämotorischen Kortex geplant (► Abb. 2.1). Das detaillierte *Bewegungsprogramm* entsteht in einem Zusammenwirken von supplementär-motorischem Kortex, Basalganglien (das sind große Kerngebiete unterhalb der Hirnrinde) und Kleinhirn.

2.1 Das pyramidale System

Die *Aktivierung* der Bewegung ist Aufgabe der Pyramidenzellen des motorischen Kortex, einer Hirnwindung, die vor der großen Zentralfurche liegt (*Gyrus präzentralis*).