

Die evolutionäre Entwicklung des Nervensystems

Die grundlegenden Funktionen des Nervensystems

Wir nehmen die Welt wahr und agieren mit ihr: Sensorik und Motorik

Jetzt wird es komplex: Höhere kognitive Prozesse und der präfrontale Kortex

Kapitel 1

Ein Kurztrip durch das Nervensystem

Das Gehirn, das Sie in Ihrem Kopf herumtragen, ist eine der komplexesten Strukturen, die wir derzeit in unserem Universum kennen. Die etwa 1.400 Gramm schweren Ansammlung von 100 Milliarden Nervenzellen bestimmt, wie Sie die Welt sehen. Gleichzeitig beeinflussen Ihre Erfahrungen, wie sich Ihr Gehirn dann verändert und neu anordnet. Dies geschieht nicht nur während Ihrer Entwicklung und Kindheit, sondern während Ihres gesamten Lebens. Sie lernen nun Schritt für Schritt das Gehirn und das Nervensystem kennen.

Wie unser Nervensystem entstand

Unsere Erde entstand vor etwa 4,5 Milliarden Jahren. Evolutionsbiologen gehen davon aus, dass weniger als eine Milliarde Jahre später einzellige *Prokaryoten* (Zellen ohne Zellkern) auf der Erde existierten. Geophysiker glauben, unser Planet hatte sich damals so weit abgekühlt, dass Leben entstehen konnte. Jedoch sind wir zu diesem Zeitpunkt noch weit entfernt von unserem jetzigen Gehirn!

Es dauerte weitere Milliarden Jahre, bis sich *Eukaryoten* (Zellen mit einem Zellkern) und erste Mehrzeller entwickelten. Die Entstehung des mehrzelligen Lebens fand in den Ozeanen unseres Planeten statt.

Spezialisieren und kommunizieren



Mehrzellige Organismen bestehen aus verschiedenen Zellen, die im Organismus verschiedene Aufgaben übernehmen. Dazu mussten sich die Zellen spezialisieren und einen Weg finden, um miteinander zu kommunizieren.

Stellen Sie sich einen Zellklumpen aus einigen Dutzend Zellen vor, der vor Milliarden von Jahren in einem primitiven Ozean schwamm. Die Zellen im Inneren dieses Zellklumpens haben keinen Kontakt zum Meerwasser, erledigen dafür aber einige Stoffwechselaufgaben besser als andere Zellen. Die inneren Zellen besitzen allerdings keine Möglichkeit, an die Nährstoffe im Meerwasser heranzukommen und die Abbauprodukte wieder loszuwerden. Um diese Aufgabe zu bewältigen, müssen sie mit den Zellen, die sie umgeben, zusammenarbeiten.

In den Zellen im Inneren des Zellklumpens werden nun andere Gene aktiviert als bei den Zellen an der Oberfläche der Mehrzeller. Sie beginnen zudem, Stoffe auszuschütten, die als *Signalstoffe* auf andere Zellen wirken. Diese Schritte beschreiben den Prozess der Spezialisierung und Kommunikation von Zellen in Mehrzellern.

Vor ca. 2 bis 4,2 Millionen Jahren begann so langsam die Geschichte des Menschen und unseres Gehirns. Spuren des ersten Homo sapiens – der moderne Mensch, wie er heute noch in Form Ihrer Nachbarin oder Ihres Steuerberaters existiert – reichen etwa 300.000 Jahre zurück. Wenn wir also die Gesamtzeitspanne der Evolution betrachten, erkennen wir zwei Fakten: Erstens, uns Menschen gibt es erst seit Kurzem auf der Erde, zweitens, das menschliche Gehirn hat sich Zeit für seine Entwicklung gelassen. Gut Ding will Weile haben!

Sich koordiniert bewegen

Strömungen, Gezeiten und Wellen trieben diese Mehrzeller durch den Ozean. Einige Organismen spezialisierten sich auf die Fotosynthese und entwickelten Auftriebsmechanismen, um in die oberen Wasserregionen, in die das Sonnenlicht noch reicht, zu gelangen.

Ein Teil der mehrzelligen Organismen hatte den Vorteil, sich aktiv mithilfe von kleinen *Geißeln* zu bewegen. Doch Geißeln, die sich ungeordnet bewegen, sind wenig hilfreich. (Stellen Sie sich ein Ruderboot vor, in dem jeder Ruderer in eine andere Richtung rudert.) Ohne eine Form der Kommunikation, mit der die Geißelbewegungen synchronisiert werden, ist es unmöglich, schnell voranzukommen. Deshalb entwickelten sich Netzwerke spezialisierter Zellen, die durch sogenannte *Gap Junctions* (Zell-Zell-Kanäle) miteinander verbunden waren. Diese Netzwerke ermöglichten eine schnelle Signalweiterleitung innerhalb ringförmiger Nervennetze, die auf die Geißelbewegung spezialisiert waren.

Die Entwicklung komplexer Tiere

Aus den Zellklumpen, die ein einfaches Nervensystem besaßen und in der Lage waren, sich im Ozean zielgerichtet zu bewegen, entwickelten sich komplexe Tiere mit sensorischen und anders spezialisierten Nervenzellen.

Viele Neurowissenschaftler unterteilen das Tierreich in Säugetiere, Wirbeltiere, die nicht zu den Säugetieren zählen, und wirbellose Tiere. Dazu ein kleiner Überblick über diese Kategorien:

- ✓ **Wirbellose:** Die entwicklungsgeschichtlich ältesten vielzelligen Tiere sind die Wirbellosen. Ihre Entstehung war vor etwa 500 Millionen Jahren. Dazu gehören beispielsweise Weichtiere, Würmer und Insekten. Sie stellen den größten Teil aller Tierarten. Die Wirbellosen haben Neuronen, die einige Ähnlichkeiten mit den Neuronen der Wirbeltiere aufweisen, doch ihre Nervensysteme unterscheiden sich deutlich voneinander. Einige Wirbellose besitzen ein großes Gehirn oder sind sehr anpassungsfähig. Besonders sind Weichtiere wie der Oktopus, die Forscher immer wieder mit ihren Fähigkeiten überraschen. Oktopoden sind sehr einfallsreich, wenn sie an Nahrung kommen wollen, die sich in verschlossenen Kästen oder Gläsern befindet.
- ✓ **Wirbeltiere, die nicht zu den Säugetieren zählen:** Diese Tiere stehen den Säugetieren viel näher. Dazu gehören Reptilien (Krokodile), Amphibien (Frösche), Fische, Vögel und auch die Vorgänger der Vögel, die Dinosaurier. Diese Wirbeltiere besitzen relativ zentralisierte Gehirne, die viele Strukturen aufweisen, die man auch bei Säugetieren findet. Dazu gehören der Hirnstamm, das Kleinhirn und die Colliculi inferiores und superiores (untere und obere Hügelchen). Diese Strukturen unterscheiden sich deutlich von denen der Wirbellosen.
- ✓ **Säugetiere:** Die Entwicklung der Säugetiere fand in der Ära statt, in der Dinosaurier die Erde dominierten. Erst nachdem diese vor 65 Millionen Jahren ausgestorben waren, stiegen die Säuger zu den vorherrschenden Landtieren auf. Das Nervensystem der Säugetiere weist untereinander eine hohe Ähnlichkeit auf, die ausgeprägter ist als bei den nicht säugenden Wirbeltieren. Ein markanter Unterschied zwischen den Gehirnen dieser beiden Tiergruppen (Säugetiere versus Wirbeltiere) liegt in der Entwicklung des Neokortex.

Der Neokortex

Wenn Sie ein menschliches Gehirn von oben oder von der Seite betrachten, ist fast alles, was Sie sehen, die *Großhirnrinde* – auch Neokortex genannt. Er wird »neo« genannt, weil er der stammesgeschichtlich jüngste Teil des Gehirns von Säugetieren ist. Der Neokortex vergrößerte sich massiv bei Säugetieren in der Evolution und legte sich über alle älteren Hirnbereiche. Der Neokortex ließ den Rest des Gehirns, der sich davor entwickelt hatte, vergleichsweise klein erscheinen. Er besteht aus ca. 20 bis 23 Milliarden *Neuronen* (das sind die Nervenzellen im Gehirn), die in spezifisch strukturierten Schichten und Säulen angeordnet und organisiert sind. Der Neokortex wurde zu einer zusätzlichen Verarbeitungsebene für sensorische Reize und für die motorische Kontrolle. Der Neokortex ist ausschließlich bei Säugetieren zu finden. Er ist bei Primaten und besonders beim Menschen am stärksten ausgeprägt. Reptilien und Vögel haben zwar keinen Neokortex, verfügen jedoch über relativ kleine Gehirne mit hoch spezialisierten Bereichen, die ähnliche Funktionen übernehmen. Es ist offensichtlich, dass Vögel trotz ihrer kleineren Gehirne ebenfalls komplexe Probleme lösen können. Ein Beispiel hierfür ist die Intelligenz und Geschicklichkeit von Krähen und Raben. Diese beeindruckenden Vögel nutzen Werkzeuge, meistern Intelligenztests und sind in der Lage, sich in die Perspektive anderer Wesen hineinzuversetzen, was auf ausgeprägte soziale Fähigkeiten hindeutet.

Abbildung 1.1 zeigt eine Seitenansicht des Gehirns verschiedener Tiere – Frosch, Katze, Rhesusaffe und Schimpanse – im Vergleich zu einem menschlichen Gehirn. Die Darstellungen sind nicht maßstabsgetreu.

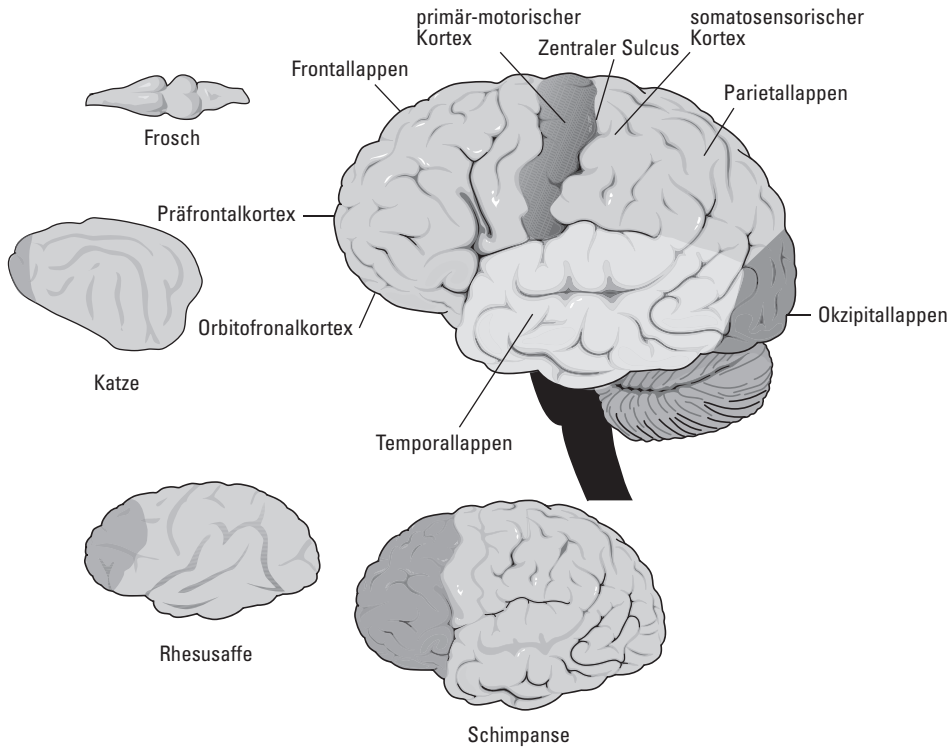


Abbildung 1.1: Größenvergleich verschiedener Großhirnrinden

- ✓ **Frosch:** Das Gehirn eines Frosches ist relativ einfach aufgebaut und ist eher eine Erweiterung des Rückenmarks. Frösche haben zusätzlich zum *optischen Tectum* noch ein Hirnareal, das *Cerebrum anterior* genannt wird. Dieses entspricht jedoch nicht dem Neokortex.
- ✓ **Katze:** Bei Katzen ist das Gehirn von einem Neokortex bedeckt, wobei der Präfrontalkortex klein ist. Sie zeigen ein gewisses Maß an Intelligenz, nutzen aber keine Werkzeuge und kommunizieren vorwiegend durch Laute.
- ✓ **Affen und Schimpansen:** Bei diesen Tieren sind die präfrontalen Hirnareale größer. Sie leben oft in komplexen sozialen Gruppen mit ausgeprägten Hierarchien, nutzen Werkzeuge und kommunizieren über verschiedene Gesichtsausdrücke und Laute.
- ✓ **Mensch:** Der Frontallappen bildet etwa die Hälfte der menschlichen Hirnrinde, und ein großer Teil davon ist der präfrontale Kortex. Ein Sagittalschnitt durch das menschliche Gehirn zeigt die Dominanz des Neokortex über subkortikale Strukturen, die sich während der Evolution der Säugetiere entwickelt haben.

Es kommt nicht immer auf die Größe an ...

Die Leistungsfähigkeit eines Gehirns hängt weniger von seiner Größe ab, sondern eher von der beeindruckenden Anzahl von Nervenzellen und deren Verknüpfungen. Die Verbindungen zwischen Neuronen werden *Synapsen* genannt. Diese Verbindungen werden im menschlichen Gehirn auf ca. 100 Billionen geschätzt und ermöglichen es den Neuronen, miteinander zu kommunizieren und Informationen zu übertragen.

Neurowissenschaftler sind sich nicht ganz sicher, wie und warum sich der Neokortex bei Säugetieren entwickelt hat. Im Vergleich zu Vögeln, die wegen des Fliegens mehr die Größe und das Gewicht des Gehirns optimieren mussten, war der Mensch weniger eingeschränkt und konnte sich ein größeres Gehirn leisten. Leisten, weil die Entwicklung, aber auch die Versorgung eines großen Gehirns kostspielig ist. Das menschliche Gehirn, dessen Gewicht nur ca. zwei Prozent des gesamten Körpergewichts ausmacht, benötigt etwa 20 Prozent des gesamten Energiebedarfs unseres Organismus.

Der Neokortex scheint jedoch einer der wichtigsten Schritte für die Entwicklung der Säugetiere zu sein, denn er ermöglicht es ihnen, sich an veränderte Umweltbedingungen anzupassen. Ein offensichtlicher Vorteil besteht darin, dass ein Areal des Neokortex, das eine bestimmte Funktion hat, seine Größe leicht zugunsten einer anderen Funktion verschieben kann, wenn besondere Bedingungen das notwendig machen.

Nehmen Sie beispielsweise an, dass ein Säugetier sich primär visuell orientiert. Doch aufgrund von veränderten Umweltbedingungen muss es sich plötzlich mehr auf akustische Signale verlassen, um zu überleben. Die visuellen und akustischen Signale liegen auf dem Kortex eng beieinander und konkurrieren um Synapsen. Diese Konkurrenzsituation ermöglicht es dem Säugetier, die kortikale Verarbeitung von visuell auf akustisch umzulernen/ umzuschalten.

Die Funktion des Nervensystems

Zuvor haben Sie erfahren, dass Spezialisierung und Kommunikation ein Erfolgsrezept für das effiziente Zusammenspiel komplexer Strukturen sind. In Bezug auf unser Nervensystem ergeben sich nun drei wichtige Fragen:

- ✓ Welche funktionalen Einheiten gibt es im Nervensystem?
- ✓ Wie sind die einzelnen Einheiten verbunden, und wie kommunizieren sie miteinander?
- ✓ Wie unterscheiden sich diese Einheiten in ihrer Spezialisierung und ihrem Aussehen?

In den folgenden Abschnitten werden Sie die Antworten auf diese Fragen finden.

Die wichtige Rolle der Nervenzellen

Das Nervensystem, das detailliert in Kapitel 2 beschrieben wird, besteht aus dem *zentralen Nervensystem* (Gehirn, Retina und Rückenmark), dem *peripheren Nervensystem* (sensorische und motorischen Nervenaxone, die das Zentralnervensystem mit den Gliedmaßen und den Organen verbinden) und dem *vegetativen Nervensystem* (siehe auch Kapitel 4). Zum vegetativen Nervensystem zählen das *autonome Nervensystem*, das Körperfunktionen wie Verdauung oder Herzfrequenz regelt, und das *enterische Nervensystem*, das das gastrointestinale System kontrolliert.



In der kurzen Geschichte der Neurowissenschaften gab es schon viele haarsträubende, pseudowissenschaftliche Theorien dazu, wie das Gehirn funktionieren könnte. Zwei dieser Theorien sind die *Äquipotenzialtheorie* und die *Phrenologie*.

Die Äquipotenzialtheorie besagt, dass das Gehirn ein einziger großer neuronaler Schaltkreis ist und vor allem die Masse des Gehirns seine Leistungsfähigkeit ausmacht. Man war der Meinung, dass der Aufbau des Gehirns wenig mit seiner Funktion zu tun hat. Das ist gefährlich, denn aus der Architektur wissen wir, wie kläglich es enden kann, wenn man sich beim Bau keine Gedanken über die Funktion macht.

Das andere Extrem waren die Phrenologen. Sie waren der Ansicht, dass verschiedene geistige Fähigkeiten und Charakterzüge einschließlich Vorsicht, Mut, aber auch kriminelle Neigungen in bestimmten Hirnarealen liegen. Sie glaubten, dass die Entwicklung dieser Eigenschaften am knöchernen Schädel über diesen Hirnregionen ablesbar sei. Phrenologen nahmen an, dass diese Hirnregionen wachsen und den darüberliegenden Schädel nach außen drücken. Diese Annahmen waren stark vereinfacht, nicht auf wissenschaftlichen Beweisen basierend und führten oft zu Vorurteilen und Fehltritten. Zum Glück hat die Phrenologie heute keinen wissenschaftlichen Wert mehr und wird als nicht haltbar angesehen. Die Phrenologie wird noch einmal im Kontext der Intelligenz in Kapitel 15 behandelt.

Die Spezialisierung unseres Nervensystems spiegelt sich in den verschiedenen Typen von Neuronen wider. Die vier wichtigsten Arten von Nervenzellen sind:

- ✓ **Sensorische Neuronen:** Diese Nervenzellen sind auf Sinneswahrnehmungen spezialisiert. Sie geben Informationen der Sinnesorgane wie Haut, Augen und Ohren oder der inneren Organe an das Gehirn weiter.
- ✓ **Motorische Neuronen:** Sie leiten elektrische Signale vom Gehirn oder Rückenmark zu den Muskeln, was die Kontraktion der Muskelfasern auslöst. Dies ermöglicht es uns, willkürliche Bewegungen auszuführen, unsere Körperhaltung zu kontrollieren und auf äußere Reize zu reagieren, beispielsweise wenn Sie zur Tür hinausstürmen, weil Sie gehört haben, dass der Postbote klingelt.
- ✓ **Projektionsneuronen:** Die langen Axone dieser Neuronen (auch Pyramidenzellen genannt) übertragen Signale von einer Gehirnregion in eine andere.

Interneuronen: Sie haben eine zentrale Rolle bei der Kommunikation zwischen anderen Nervenzellen und leiten Signale von einem Bereich des Nervensystems zu einem anderen weiter. Außerdem verarbeiten sie eingehende Informationen, vergleichen beispielsweise, ob diese bereits im Gedächtnis gespeichert sind, und nutzen Informationen, um eine bestimmte Reaktion zu planen und auszuführen.

Was das Nervensystem grundlegend von anderen funktionellen Gruppen von Zellen unterscheidet, ist die Komplexität, mit der die Nervenzellen untereinander verschaltet sind. Das menschliche Gehirn besteht aus etwa 100 Milliarden Neuronen. Ein typisches Neuron kann eine beeindruckende Anzahl von Verbindungen zu anderen Neuronen aufbauen – von Hunderten bis Tausenden. Die Pyramidenzellen als echte Netzwerkkönige können sogar noch mehr synaptische Verbindungen herstellen. Das macht in Summe etwa 100 Billionen Synapsen im Gehirn! Da bekommt der Begriff »vernetzt sein« eine ganz neue Bedeutung – nicht nur im digitalen Zeitalter. (In Kapitel 3 erfahren Sie mehr über Neuronen und ihre Funktion.)

Signalverarbeitung in Schaltkreisen, Segmenten und Modulen

Von der Seite oder von oben betrachtet macht die Großhirnrinde (oder der Neokortex) den größten Teil des Gehirns aus. Diese ist fast einen viertel Quadratmeter groß und liegt in vielen Falten (sogenannte Gyri; Einzahl: Gyrus), damit sie überhaupt in den Schädel passt.



Das Gehirn ist in verschiedene funktionelle Areale oder Schaltkreise unterteilt, die jeweils spezialisierte Aufgaben erfüllen. Diese funktionellen Unterteilungen helfen bei der Verarbeitung von Reizen, die von den Sinnesorganen aufgenommen werden (zum Beispiel akustische oder optische Reize), der Steuerung von Bewegungen (zum Beispiel die Bewegung der Gliedmaßen oder der Zunge), der Verarbeitung von Sprache und vielen anderen komplexen kognitiven Prozessen. Dabei bestimmt nicht der Bereich des Gehirns selbst seine Funktion, sondern die Art der Signale und der Ort, an dem sie entstehen, entscheiden darüber. Selbst wenn die Nervenzellen des Hörzentrums denen im Sehzentrum oder im motorischen Zentrum gleichen, ist das Hörzentrum eben das Hörzentrum, weil es die Signale aus der Hörschnecke (einem Teil des Innenohres) verarbeitet und an Bereiche sendet, die akustische Informationen weiterverarbeiten.

Auch andere Teile des Nervensystems bestehen aus Schaltkreisen oder Leitungsbahnen:

- ✓ **Das Rückenmark** verläuft im Wirbelkanal der Wirbelsäule und ist in verschiedene Abschnitte unterteilt, die als Rückenmarkssegmente bezeichnet werden. Jedes Segment ist mit spezifischen Bereichen des Körpers (Hals, Brust, Lende und so weiter) verbunden und hat Nervenwurzeln, die aus dem Rückenmark austreten und Informationen zu Muskeln und Sinnesorganen transportieren.
- ✓ **Das Kleinhirn**, eine markante Struktur an der Rückseite des Gehirns unterhalb der Großhirnrinde, steuert die Feinabstimmung von Bewegungen und spielt eine wichtige Rolle beim Erlernen von Bewegungsabläufen. Im Kleinhirn formen neuronale Schaltkreise verschiedene Module, die für die Planung und Ausführung von Bewegungen und das Gleichgewicht verantwortlich sind.

Die graue und die weiße Substanz

Die Struktur des Neokortex kann man mit einem gefalteten Tuch vergleichen. Die äußeren drei bis vier Millimeter dieses Tuches bilden die *graue Substanz*. Im Querschnitt des Gehirns erkennen Sie, dass das Gehirn zu einem viel größeren Teil aus *weißer* als aus der *grauen Substanz* besteht. Die weiße Substanz bilden die myelinisierten *Axone*. Das sind Nervenfasern, die die Nervenzellen miteinander verbinden und mit einer fetthaltigen Substanz umzogen sind. Die graue Substanz besteht aus den Nervenzellkörper und Dendriten, die dunkler sind als ihre Axone und ihr die graue Farbe verleihen. Die Dendriten nehmen elektrische Reize auf und leiten sie an den Zellkörper weiter. In Kapitel 2 können Sie sich den Aufbau der weißen und grauen Substanz des Neokortex noch genauer anschauen.

Was für eine Ladung: Elektrizität im Gehirn

Die meisten Nervenzellen sind darauf spezialisiert, Informationen zu verarbeiten oder weiterzuleiten. Sie besitzen zwei verschiedene Verzweigungen, die aus dem Zellkörper entspringen: die *Dendriten* und die *Axone*. Dendriten nehmen die elektrischen Impulse anderer Nervenzellen auf. Axone sind der Teil der Nervenzelle, der Reize weiterleitet und an andere Nervenzellen oder Organe abgibt.

Die Länge der Dendriten kann von Mikrometern (μm) bis zu einigen Millimetern reichen. Axone können dagegen bis zu einen Meter lang werden. Zum Beispiel kann das Axon einer motorischen Nervenzelle im Rückenmark bis zu einen Meter lang sein, um Befehle von der Wirbelsäule zu den Muskeln in den Extremitäten zu übertragen. Da die Verzweigungen der Nervenzellen mitunter sehr weit reichen, brauchen sie Mechanismen, mit denen sie Signale trotz größerer Distanzen schnell verarbeiten können.

Gliazellen, eine weitere wichtige Zellgruppe im Nervensystem, die neben den Neuronen existieren, nutzen für die Weiterleitung von Signalen über weite Distanzen einen Trick. Sie bilden eine Myelin-Umhüllung, das ist eine isolierende Schicht aus Fett, um die Axone. Die Funktion der Myelin-Umhüllung gleicht der Isolierung bei Elektrokabeln. Sie isoliert, schützt und ermöglicht eine schnelle Übertragung der Ladung. Gliazellen erfüllen verschiedene unterstützende und schützende Funktionen, die für die normale Funktion des Nervensystems unerlässlich sind, und arbeiten somit Hand in Hand mit den Neuronen.

Im Gegensatz zu den Gliazellen übertragen Neuronen Signale über elektrische Ladung entlang ihrer Axone. Einkommende Signale werden über die Dendriten in den Zellkörper geleitet. Der Zellkörper wandelt diese elektrische Energie in Impulse um, die entlang des Axons zu einem anderen Neuron gesendet werden. Wenn Sie mehr darüber wissen möchten, wie Neuronen generell miteinander kommunizieren, sollten Sie zu Kapitel 3 weiterblättern. In den Kapiteln in Teil II erfahren Sie, wie die Reizübertragung im sensorischen Nervensystem funktioniert.

Der modulare Aufbau des Nervensystems

Die Neuronen arbeiten in kleinen Einheiten neuronaler Schaltkreise, die aus mehreren Hundert Nervenzellen bestehen und sich aus unterschiedlichen Neuronenarten zusammensetzen.

Diese Schaltkreise verarbeiten eingehende Signale und senden die Ergebnisse über die Projektionsneuronen an andere Schaltkreise.

Mehrere neuronale Schaltkreise bilden einzelne *Module*, die verschiedene Funktionen besitzen, wie zum Beispiel senkrechte Linien zu erkennen, 10.000 Hertz-Töne wahrzunehmen, einen bestimmten Finger Muskel zu bewegen oder die Herzfrequenz zu erhöhen. Gruppen gleicher Module bilden große Hirnregionen. Alle Hirnmodule, das Rückenmark, peripheres und vegetatives Nervensystem arbeiten zusammen. Sie regulieren die Funktionen Ihres Organismus und sorgen dafür, dass Sie überleben. Doch das ist nicht alles: Wir haben Gefühle, Erinnerungen, Sehnsüchte und sind neugierig. Wir können sprechen, uns selbst reflektieren, beherrschen viele Techniken und machen uns Gedanken über unseren Platz im Universum.

Sensorik und Motorik

Tiere besitzen ein Nervensystem, Pflanzen nicht. Warum ist das so? Beide sind Vielzeller, und viele Pflanzen wie etwa Bäume sind viel größer als die größten Tiere. Der Hauptunterschied liegt darin, dass sich Tiere aktiv bewegen können und Pflanzen ortsgebunden – sessil – leben. Das Nervensystem ermöglicht diese aktive Bewegung.

Das verschwundene Gehirn

Seescheiden sind sessile Manteltiere, die auf dem Meeresgrund leben und ihre Nährstoffe aus dem Meerwasser filtern. Das Interessante an diesen Tieren ist, dass sie im Larvenstadium über eine Gehirnanlage (ein Zerebralganglion) verfügen, die es ihnen ermöglicht, zu schwimmen. Diese Anlage bildet sich jedoch wieder zurück. Als ausgewachsenes Tier lebt die Seescheide am Meeresboden und ist dort, wie eine Pflanze verankert. Ein Zentralganglion wird nun nicht mehr benötigt und bildet sich zurück.

Die Welt wahrnehmen

Sensorische Nervenzellen messen innerhalb und außerhalb unseres Körpers Energien oder Substanzen. Zu diesen Nervenzellen gehören die Fotorezeptoren im Auge, die Licht wahrnehmen (siehe Kapitel 8). Die Haarzellen in der Hörschnecke (Cochlea) nehmen akustische Reize auf (Kapitel 9). Es gibt Sinneszellen, die bestimmte Moleküle wahrnehmen können und uns erlauben, zu schmecken und zu riechen (Kapitel 10). Außerdem messen Mechanorezeptoren in der Haut Druck und Vibration und sind Teil unseres somatosensorischen Systems (Kapitel 11).

Unser Körper besitzt zudem Messfühler, die die Körpertemperatur, die CO_2 -Konzentration, den Blutdruck und andere Körperfunktionen überwachen. Das zentrale und das vegetative Nervensystem (beide werden in Kapitel 4 noch genauer beschrieben) verwenden die Signale dieser inneren Sensoren, um unsere Körperfunktionen zu steuern und in einem

Gleichgewicht (*Homöostase*) zu halten. Das alles geschieht meist, ohne dass wir etwas davon bemerken.



Die sensorischen Neuronen sind von allen Nervenzellen am höchsten spezialisiert und besitzen ausgeklügelte Mechanismen, um bestimmte Reize wahrzunehmen. So können manche Tiere das Magnetfeld der Erde spüren (insbesondere Vögel und Fische, aber auch manche Säugetiere wie Fledermäuse und Wale). Der genaue Mechanismus, wie diese Tiere das Magnetfeld der Erde spüren, ist noch nicht vollständig verstanden und wird weiterhin erforscht. Bei Fischen und Säugetieren nimmt man an, dass sie über Zellen verfügen, die Magnetit-Kristalle enthalten. Diese Kristalle befinden sich im Zellplasma (Säugetiere) oder in spezialisierten Sinnesorganen (Fische) und wirken wie winzige Kompassnadeln. Dies ermöglicht es den Tieren, sich im Magnetfeld zu orientieren.

Immer in Bewegung: Motorische Nervenzellen

Unsere Bewegungen werden durch die Koordination und Interaktion zwischen sensorischen, motorischen und interneuronalen Schaltkreisen ermöglicht. Wichtig dabei ist:

- ✓ **Sensorische Neuronen** empfangen Informationen direkt aus der Umwelt über die Sinnesorgane und nicht von anderen Neuronen.
- ✓ **Motorische Neuronen** übermitteln Signale an Muskeln, Drüsen oder Organe statt an andere Nervenzellen.



Es gibt verschiedene Arten von Bewegungen. Die *bewusste Bewegung* ist das, was die meisten Menschen unter Bewegung verstehen. Sie heben die Hand, gehen oder greifen nach Ihrer Kaffeetasse. Diese Bewegung wird vom zentralen Nervensystem gesteuert, dessen motorische Neuronen die *quergestreifte Muskulatur* innervieren (die gleichen Muskeln und Neuronen sind an automatischen *Reflexbewegungen* beteiligt). Wir besitzen jedoch auch *glatte Muskulatur*, die von Neuronen des vegetativen Nervensystems versorgt wird. Diese Muskeln finden Sie im Verdauungstrakt oder in den Pupillen.

Bewegung ist ein solch wichtiger Bereich der Neurowissenschaften, dass ich es hier nur kurz anschneide, ihm aber den gesamten Teil III dieses Buches gewidmet habe.

Höhere kognitive Prozesse

Die großen Bereiche des Gehirns, die nicht direkt an der Bewegungskontrolle oder an der Verarbeitung sensorischer Reize beteiligt sind, werden *Assoziationskortex* genannt. Der Assoziationskortex ist für *höhere kognitive Prozesse* wie beispielsweise unser Gedächtnis und die Aufmerksamkeit, aber auch für die Interpretation der Sinneseindrücke verantwortlich. Er ermöglicht es uns, Informationen aus der Umwelt zu verstehen, zu verarbeiten und darauf angemessen zu reagieren, und trägt so zu unserer Wahrnehmung, unserem Denken und unserem Verhalten bei.

Der Präfrontalkortex: Dreh- und Angelpunkt der Kognition

Die intelligentesten Säugetiere wie Menschenaffen, Wale oder Elefanten besitzen die größte Großhirnrinde. Sie haben bereits gelernt, dass die Größe des Neokortex nicht allein entscheidet über die Leistungsfähigkeit des Gehirns und die Intelligenz eines Lebewesens. Die Größe des *Frontallappens* und dessen Größe im Verhältnis zum restlichen Neokortex jedoch spielen eine wichtige Rolle.



Der vorderste Teil des Frontallappens wird *Präfrontalkortex* genannt. Dieser Bereich ist bei Primaten und besonders beim Menschen sehr ausgedehnt. Der Präfrontalkortex ermöglicht es uns, Handlungen zu planen, Entscheidungen zu treffen, Informationen im Kopf zu behalten, Emotionen und Impulse zu kontrollieren und flexibel zu agieren.

Ohne ausgeprägten Frontalkortex würde Ihr Verhalten von Ihren momentanen Bedürfnissen und den Ereignissen in Ihrer direkten Umwelt bestimmt werden. Wären Sie eine Eidechse, hätten Sie entweder Hunger, würden frieren, nach einem Partner suchen oder sich vor einem Räuber in Sicherheit bringen. Sie hätten eine Reihe Verhaltensmuster gespeichert, zwischen denen Ihr Gehirn wählen könnte. Wenn Sie beispielsweise einen Partner suchen, folgen Sie dem Suche-nach-Liebe-Programm. Wenn Sie über sich einen Greifvogel sehen, würden Sie allerdings sofort auf das Greifvogel-Vermeidungs-Programm umschwenken und einen Stein suchen, unter dem Sie verschwinden können.

Säugetiere haben durch ihren Präfrontalkortex die Möglichkeit, komplexe, mehrstufige Handlungsentscheidungen zu treffen. Dies ist besonders relevant in großen sozialen Gruppen, um individuelle Beziehungen zu den anderen Gruppenmitgliedern zu etablieren und miteinander in den »Überlebens-Programmen« zu kooperieren (beispielsweise bei geteilten Arbeitsschritten in der Nahrungsbeschaffung).

Intelligenz, Sprache und Gedächtnis

Intelligenz ist die Fähigkeit, abstrakte Informationen zu verstehen, zu lernen, Probleme zu lösen, Wissen anzuwenden, sich an Vergangenes zu erinnern und neue Situationen erfolgreich zu bewältigen. Dem Thema Intelligenz ist ein eigenes Kapitel gewidmet, und Sie können in Kapitel 15 mehr über das Thema erfahren.

Dabei war die Anpassungsfähigkeit an neue oder veränderte Umgebungen zentral in der Evolution des Menschen. Zwei Fähigkeiten waren Schlüsselkompetenzen der menschlichen Intelligenz: das Gedächtnis und die Sprache. Daher werden diese Konzepte in den nächsten Abschnitten erläutert.

Sprache

Die Entwicklung der Sprache war ein entscheidender Schritt in der Entwicklung der menschlichen Intelligenz. Sie ermöglicht es, Wissen zu kommunizieren, zu teilen und weiterzugeben.

Sprache ist somit ein entscheidendes Instrument für die Kommunikation und Kooperation in sozialen Gruppen: für die kurz- und langfristige Informationsübermittlung in Form von Lauten und Symbolen (über Nahrung, Gefahren, soziale Normen und kulturelles Wissen über Generationen hinweg), jedoch auch für die Pflege von sozialen Beziehungen und die Lösung sozialer Konflikte. Kapitel 17 widmet sich dem Sprachzentrum im Gehirn und untersucht dessen Bedeutung für die soziale Kognition.

Gedächtnis

Von der Definition von Intelligenz wissen Sie, dass Gedächtnis eng mit Intelligenz verknüpft ist. Um ein Problem lösen zu können, ist es relevant, dass Sie relevantes Vorwissen abrufen können und gerade gelernte Informationen im Kopf behalten können.

Das Gedächtnis beschreibt somit die Fähigkeit, Informationen zu speichern und abzurufen. Es kann in verschiedene Arten unterteilt werden:

- ✓ Das *Arbeitsgedächtnis*: Es ermöglicht uns, Informationen vorübergehend im Bewusstsein zu halten
- ✓ Das *Langzeitgedächtnis*: Dies ist der Speicher, in dem Informationen langfristig gespeichert werden. Es kann in zwei Hauptkategorien unterteilt werden:
 - Das **explizite (deklarative) Gedächtnis**: Hierbei handelt es sich um bewusste Erinnerungen an Fakten, Ereignisse und Erfahrungen.
 - Das **implizite (nicht deklarative) Gedächtnis**: Es speichert unbewusste Erinnerungen und Fähigkeiten, wie das Erlernen von motorischen Fertigkeiten oder das Ausbilden von Gewohnheiten. Konkrete erlernte motorische Fertigkeiten und Abläufe werden im *prozeduralen Gedächtnis* gespeichert, welches eine Unterform des impliziten Gedächtnisses ist. Beispiele hierfür sind das Fahrradfahren oder das Spielen eines Instruments.
- ✓ Das *prospektive Gedächtnis*: Dies bezieht sich auf die Fähigkeit, sich an zukünftige Ereignisse, Aufgaben oder Verpflichtungen zu erinnern und diese zu planen, zum Beispiel das Erinnern an einen Arzttermin oder das Einkaufen von Lebensmitteln.

Zwei Formen des expliziten Gedächtnisses

Das *explizite Gedächtnis* teilt sich in zwei Unterformen. Das *episodische Gedächtnis* ist die Erinnerung an Begebenheiten und Ereignisse aus dem eigenen Leben. Es steht dem *semantischen Gedächtnis* gegenüber, bei dem es sich um allgemeine Fakten handelt. Lassen Sie mich ein Beispiel nennen: Sie wissen vielleicht noch, *wann* Sie gelernt haben, dass die Hauptstadt von Deutschland Berlin ist (episodisch). Und Sie wissen, *dass* die Hauptstadt von Deutschland Berlin ist (semantisch).

Mehr Informationen zum Thema Lernen und Gedächtnis finden Sie in Kapitel 18.