

Die Entwicklung des Nervensystems

Die grundlegenden Funktionen des Nervensystems

Verschiedene Funktionsstörungen

Ein Blick in die Zukunft

Kapitel 1

Ein Kurztrip durch das Nervensystem

»Mein Gehirn ist mir mein zweitliebstes Organ.«

Woody Allen (*Der Schläfer*, 1973)

Das Gehirn, das Sie in Ihrem Kopf herumtragen, ist die mit Abstand komplizierteste Struktur in unserem Universum. Alles, was Sie sind, was Sie waren und was Sie sein werden, entspringt dieser etwa 1400 Gramm schweren Ansammlung von 100 Milliarden Nervenzellen.

Wenn Ihr Gehirn richtig funktioniert, können Sie ein langes, glückliches Leben führen. Ist die Gehirnfunktion gestört, fällt es Ihnen vielleicht schwer, Ihr Leben zu meistern. Ich möchte Ihnen das Nervensystem vorstellen, erklären, wie es funktioniert und was schief laufen kann.

Die Entwicklung des Nervensystems verstehen

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.

Aus unbekannten Gründen dauerte es dann eine weitere Milliarde Jahre, bis sich *Eukaryoten* (Zellen mit einem Zellkern) entwickelten. Noch eine Milliarde Jahre vergingen, bis es die

ersten Mehrzeller gab, und erst eine weitere Milliarde Jahre später bevölkerte der Mensch unsere Erde. Das liegt jetzt weniger als eine Million Jahre zurück. 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 wurden andere Gene aktiviert als bei den Zellen an der Oberfläche der Mehrzeller. Außerdem wirkten einige Stoffe, die von den Zellen ausgeschüttet wurden, als *Signalstoffe*, auf die andere Zellen reagierten. Die Zellen von Mehrzellern begannen, sich zu spezialisieren und miteinander zu kommunizieren.

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.

Einige mehrzellige Organismen hatten 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.

Vor etwa 500.000 Jahren eroberten die ersten Wirbellosen wie beispielsweise Insekten das Land, um sich an den Pflanzen, die dort seit Millionen von Jahren wuchsen, gütlich zu tun.

Später kamen auch Wirbeltiere, die im Wasser lebten, für kurze Zeit an Land. Um wieder ins Wasser zurückzukehren, waren sie häufig gezwungen, sich ein Stück über Land zu schlängeln. Manche mochten es an Land so sehr, dass sie die meiste Zeit dort lebten und sich zu Amphibien entwickelten. Einige entwickelten sich weiter zu Reptilien. Aus ihnen gingen später die ersten Säugetiere hervor, von denen letztlich auch wir abstammen.

Der Neokortex

Wenn Sie ein Gehirn von oben oder von der Seite betrachten, ist fast alles, was Sie sehen, Neokortex. Er wird »neo« genannt, weil er der stammesgeschichtlich jüngste Teil des Gehirns von Säugetieren ist. Reptilien und Vögel besitzen dagegen relativ kleine Gehirne mit hochspezialisierten Bereichen, um sensorische Reize zu verarbeiten und das Verhalten zu steuern.

Während der Entwicklung der Säugetiere vergrößerte sich ein spezieller Teil des Gehirns sehr stark und legte sich über alle älteren Hirnbereiche. Er wurde zu einer zusätzlichen Verarbeitungsebene für sensorische Reize und für die motorische Kontrolle.

Neurowissenschaftler sind sich nicht ganz sicher, wie und warum sich der Neokortex entwickelt hat. Vögel und Reptilien sind mit ihren kleinen, spezialisierten Gehirnen gut zurechtgekommen. Wie auch immer es passiert ist, irgendwann gab es bei den Säugetieren einen Neokortex, und dieser vergrößerte sich enorm. Der Neokortex ließ den Rest des Gehirns, der sich davor entwickelt hatte, vergleichsweise klein erscheinen. Diese Entwicklung fand statt, obwohl ein großes Gehirn für den Stoffwechsel eine Herausforderung darstellt. Das menschliche Gehirn, dessen Gewicht nur fünf Prozent des gesamten Körpergewichts ausmacht, benötigt etwa 20 Prozent des gesamten Energiebedarfs unseres Organismus.

Die Funktion des Nervensystems

Das Gehirn ist keine formlose Masse, die einfach nur den Schädel ausfüllt. Wenn Sie sich ein Bild des Gehirns anschauen, erkennen Sie sofort, dass es aus verschiedenen Bereichen besteht. Aus dem anatomischen Aufbau ergeben sich zwei wichtige Fragen:

- ✓ Besitzen die unterschiedlich aussehenden Bereiche des Gehirns auch unterschiedliche Aufgaben?
- ✓ Haben die Bereiche, die gleich aussehen, auch die gleiche Funktion?

In den folgenden Abschnitten werden Sie die Antwort auf beide 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*. Zum vegetativen

Nervensystem zählen das *autonome Nervensystem* (das Körperfunktionen wie Verdauung oder Herzfrequenz regelt) und das *enterische Nervensystem*, das das gastrointestinale System kontrolliert.



Frühe Theorien über die Hirnfunktion

In der kurzen Geschichte der Neurowissenschaften gab es schon viele Theorien dazu, wie das Gehirn arbeitet. Zwei der interessanteren Theorien sind die *Phrenologie* und die *Äquipotenzialtheorie*.

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 andere Extrem waren die Phrenologen. Sie waren der Ansicht, dass fast alle menschlichen Charakteristika einschließlich Vorsicht, Mut und Hoffnung 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. Mehr zur Phrenologie erfahren Sie in Kapitel 12.

Die Funktionsweise des Nervensystems basiert auf den besonderen Eigenschaften der Nervenzellen. Nervenzellen oder *Neuronen* sind Zellen, die sich darauf spezialisiert haben, Informationen zu verarbeiten. Alle Tiere besitzen vier Arten von Nervenzellen:

- ✓ **Sensorische Neuronen:** Diese Nervenzellen geben Informationen der Sinnesorgane oder der inneren Organe an das Gehirn weiter.
- ✓ **Motorische Neuronen:** Sie lösen Muskelkontraktionen aus oder stimulieren Drüsen und Organe.
- ✓ **Projektionsneuronen:** Die langen Axone dieser Neuronen übertragen Signale von einer Gehirnregion in eine andere.
- ✓ **Interneuronen:** Sie haben eine Vermittlerfunktion 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. Jedes einzelne Neuron ist

vernetzt und besitzt etwa 20.000 synaptische Kontaktstellen zu anderen Neuronen. Das ergibt etwa zwei Milliarden Synapsen! – eine wirklich unvorstellbar große Zahl. (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* den größten Teil des Gehirns aus. Diese ist fast ein Viertel Quadratmeter groß und liegt in vielen Falten, damit sie überhaupt in den Schädel passt. Die Nervenzellen der Großhirnrinde bilden einen komplexen neuronalen Schaltkreis.



Die verschiedenen Bereiche des Gehirns sind hochspezialisiert. Einige verarbeiten Reize, die von den Sinnesorganen aufgenommen werden (zum Beispiel akustische oder optische Reize), andere steuern durch motorische Impulse unsere Bewegung (zum Beispiel die Bewegung der Gliedmaßen oder der Zunge). 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 und Schaltkreise 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 und sie dafür nutzen, das Verhalten zu steuern.

Auch andere Teile des Nervensystems bestehen aus Schaltkreisen oder Leitungsbahnen:

- ✓ **Das Rückenmark** besteht aus einzelnen Segmenten (Hals, Brust, Lende und so weiter), deren Struktur sich fortlaufend wiederholt.
- ✓ **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.



Alle Module des zentralen Nervensystems sind miteinander vernetzt.

Im Querschnitt des Gehirns erkennen Sie, dass das Gehirn zu einem viel größeren Teil aus der *weißen* als aus der *grauen Substanz* besteht. Die weiße Substanz bilden die *Axone*. Das sind Nervenfasern, die die Nervenzellen miteinander verbinden. Die dunkler gefärbte graue Substanz besteht aus den Körpern der Nervenzellen und den Dendriten, die elektrische Reize aufnehmen und an den Zellkörper weiterleiten. Warum ist das so? Weil das Gehirn die Verbindungen zwischen den Nervenzellen benutzt, um in neuronalen Schaltkreisen Berechnungen durchzuführen. Jedes einzelne Neuron ist nur mit einem Bruchteil der

anderen Neuronen im Gehirn verbunden. Um die »Rechenergebnisse« an andere Hirnareale zu übertragen, müssen die Signale durch die Axone über größere Distanzen weitergeleitet werden.

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.

Dendriten sind nicht länger als einige Hundert Mikrometer, Axone können dagegen bis zu einem Meter lang werden (wie die Axone, die vom primär-motorischen Kortex bis zum unteren Ende des Rückenmarks reichen). Da die Verzweigungen der Nervenzellen mitunter sehr weit reichen, brauchen sie Mechanismen, mit denen sie Signale trotz größerer Distanzen schnell verarbeiten können. Die Weiterleitung von Signalen erfolgt über elektrische Ladungen und wird durch die Myelin-Umhüllung der Gliazellen gefördert, die so ähnlich wie die Isolierung bei Elektrokabeln eine schnelle Übertragung der Ladung ermöglicht. Neuronen benutzen elektrische Signale, um innerhalb der Zelle Informationen weiterzuleiten. 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.

Die Basis-Funktionen des Nervensystems

Tiere besitzen ein Nervensystem, Pflanzen nicht. Warum ist das so? Beide sind Vielzeller und viele Pflanzen wie etwa die Bäume sind viel größer als die größten Tiere.

Der Hauptunterschied liegt darin, dass sich Tiere aktiv bewegen können und Pflanzen nur begrenzt (wie beispielsweise einige einzellige Pflanzen oder die Fangblätter der Venusfliegenfalle, die sehr schnell zusammenklappen können, sobald sich ein Beutetier verfangen hat. Doch das lassen wir an dieser Stelle einmal außen vor!). Nervensysteme ermöglichen aktive Bewegung, und aktive Bewegung ist das, was uns von den meistens sessilen Pflanzen unterscheidet.

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.

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 5). Die Haarzellen in der Hörschnecke (Cochlea) nehmen akustische Reize auf (siehe Kapitel 6) und die Mechanorezeptoren in der Haut messen Druck und Vibration (siehe Kapitel 4). Außerdem gibt es noch Sinneszellen, die bestimmte Moleküle wahrnehmen können. So entsteht der Geruchs- und Geschmackssinn (siehe Kapitel 7).

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 11 noch genauer beschrieben) verwendet die Signale dieser inneren Sensoren, um unsere Körperfunktionen zu steuern und in einem Gleichgewicht (*Homöostase*) zu halten. Das alles geschieht normalerweise, 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, weil sie über

Zellen verfügen, die Magnetit-Kristalle enthalten. Diese Kristalle im Zellplasma reagieren auf das Erdmagnetfeld und lösen in der Zelle einen elektrischen Impuls aus. Der Impuls wird dann an andere Zellen des Nervensystems weitergegeben und ermöglicht es den Tieren, sich im Magnetfeld zu orientieren.

Immer in Bewegung – motorische Nervenzellen

Die meisten Neuronen sind Interneuronen, die Reize aufnehmen, miteinander verrechnen und diese Output-Signale an andere Neuronen weitergeben. Doch die Nervenzellen, um die es im folgenden Abschnitt geht, sind etwas anders:

- ✓ **Einige Nervenzellen sind auf Sinneswahrnehmungen spezialisiert.** Die Informationen für diese Zellen stammen direkt aus der Umwelt und kommen nicht von anderen Neuronen.
- ✓ **Einige Neuronen übermitteln Signale an Muskeln, Drüsen oder Organe anstatt an andere Nervenzellen.** In diesem Fall lösen sie eine Reaktion aus: ein Hormon kann ausgeschüttet oder eine Körperfunktion reguliert werden. Oder Sie stürmen zur Tür hinaus, weil Sie gehört haben, dass der Postbote klingelt.



Es gibt zwei verschiedene Arten von Bewegungen. Die *bewusste Bewegung* ist das, was die meisten Menschen unter Bewegung verstehen. Sie wird vom zentralen Nervensystem gesteuert, dessen motorische Nervenzellen die *quergestreifte Muskulatur* innervieren (die gleichen Muskeln und Neuronen sind an Reflexreaktionen 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 ihm den gesamten Teil III dieses Buches gewidmet habe.

Entschluss und Tat

Das Nervensystem von Säugetieren ist sehr komplex. Große Bereiche der Großhirnrinde steuern Bewegungen, verarbeiten Sinneseindrücke und sind miteinander verknüpft. Nur weil ein großer Teil des Gehirngewebes für die Bewegungskontrolle verantwortlich ist, sind komplizierte Bewegungsmuster möglich. Die großen Hirnareale, die sensorische Reize verarbeiten, ermöglichen es Ihnen, diese komplexen Abläufe zu erkennen.

Die großen Bereiche des Gehirns, die nicht direkt an der Bewegungskontrolle oder an der Verarbeitung sensorischer Reize beteiligt sind, werden *Assoziationskortex* genannt. Auch wenn es nicht ganz korrekt ist, alle nicht-motorischen und nicht-sensorischen Bereiche des Gehirns unter diesem Oberbegriff zusammenzufassen, besitzt der Assoziationskortex doch eine wichtige Funktion bei den Prozessen, die ablaufen, bis Informationen unserer Sinnesorgane ein bestimmtes Verhalten hervorrufen.

Die intelligentesten Säugetiere wie Menschenaffen, Wale oder Elefanten besitzen die größte Großhirnrinde. Aber natürlich entscheidet nicht allein die Größe des Neokortex über die

Intelligenz eines Lebewesens. Die Größe des *Frontallappens* spielt dabei ebenfalls eine wichtige Rolle. Die intelligentesten der Tiere, die ich gerade aufgezählt habe (die Menschenaffen), haben im Verhältnis zum restlichen Neokortex den größten Frontallappen.



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.

Wenn Sie keinen großen Frontallappen hätten, 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 ihr Frontalhirn die Möglichkeit, komplexe, mehrstufige Handlungsentscheidungen zu treffen. Sie können sich vor dem Greifvogel in Sicherheit bringen und sich trotzdem daran erinnern, wo der potenzielle Partner war. Wenn die Gefahr vorüber ist, können Sie Ihre Suche dort fortsetzen, wo sie unterbrochen wurde. Säugetiere können in großen sozialen Gruppen leben, in der sie individuelle Beziehungen zu den anderen Gruppenmitgliedern etablieren.

Intelligenz und Gedächtnis

Wenn wir an Intelligenz denken, denken wir normalerweise an die Unterschiede zwischen Mensch und Tier, auch wenn einige Verhaltensweisen von Tieren zugegebenermaßen als intelligent eingestuft werden können. Zwei Eigenschaften – die Fähigkeit zu sprechen und unser episodisches Gedächtnis – sind untrennbar mit der menschlichen Intelligenz verbunden. Die nächsten Abschnitte geben Ihnen einen kurzen Überblick über Gedächtnis, Sprache und Intelligenz. In den Kapiteln 14 und 15 beschäftige ich mich dann ausführlicher mit dem Thema Intelligenz.

Sprache

Ein Merkmal der menschlichen Intelligenz ist die Sprache. Das Interessante an der Sprache ist aus neurowissenschaftlicher Perspektive, dass sie vorwiegend in einer Hirnhälfte lokalisiert ist (bei den meisten Rechtshändern in der linken Hirnhälfte).

Das ist so verblüffend, weil beide Hirnhälften des Menschen äußerlich vollkommen gleich zu sein scheinen. Es sind keine Strukturen bekannt, die es nur in der linken Gehirnhälfte gibt und die erklären könnten, warum das Sprachzentrum primär in der linken Hirnhälfte zu finden ist.

Episodisches Gedächtnis

Ein anderer Unterschied von menschlicher und tierischer Intelligenz ist das episodische Gedächtnis des Menschen. 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).

Sogar Tiere besitzen ein Gedächtnis, das zeigen Beispiele aus der klassischen oder operanten Konditionierung. (Fällt Ihnen wieder etwas ein, wenn Sie den Namen Pavlov hören?) Bisher gibt es allerdings keinerlei Beweise dafür, dass Tiere auch ein episodisches Gedächtnis besitzen.

Beim Menschen ist der Präfrontalkortex größer als bei anderen Primaten. Und sogar Säugetiere, die keine Primaten sind, besitzen einen Präfrontalkortex. Daraus ergibt sich die Frage, ob die Sprache die Voraussetzung für das episodische Gedächtnis ist. Neurowissenschaftler wissen bisher lediglich, dass die komplexen Pläne, zu denen Menschen in der Lage sind, von den exekutiven Funktionen des Präfrontalkortex abhängen.

Wenn etwas schief läuft: Neurologische und psychische Erkrankungen

Wenn Sie bedenken, wie komplex das Gehirn aufgebaut ist, ist es nicht verwunderlich, dass manchmal auch Störungen auftreten können. Psychische Erkrankungen reichen von gänzlich erblich bedingten Erkrankungen wie dem Down- oder dem Fragilen-X-Syndrom über Krankheiten, die nur teilweise genetisch bedingt sind (Schizophrenie oder Autismus) bis hin zu Erkrankungen, die fast vollständig auf bestimmte Lebensumstände zurückzuführen sind – zum Beispiel manche Formen der Depression.

Einige psychische Erkrankungen wie Alzheimer oder Parkinson hängen mit dem Alter zusammen. Sie haben keine klaren genetischen Ursachen, obwohl es mittlerweile einige Hinweise darauf gibt, dass es eine genetische Veranlagung für diese Erkrankungen gibt. Die Huntington'sche Krankheit dagegen wird vererbt. Ihre Symptome treten allerdings meist nicht vor dem Erwachsenenalter auf.

Störungen der Gehirnfunktion können in verschiedenen Bereichen auftreten:

- ✓ **Entwicklungsstörungen der Gesamtstruktur des Gehirns:** Genetische Mutationen oder Umweltgifte können Schäden in der Gehirnstruktur verursachen. Kleine Hirnbereiche wie das Kleinhirn können fehlen oder verändert sein, oder es fehlen Nervenbahnen, die verschiedene Hirnbereiche miteinander verbinden.
- ✓ **Entwicklungsstörungen in speziellen Schaltkreisen:** Einige aktuelle Theorien gehen davon aus, dass bei Autisten das Gleichgewicht zwischen kurzen und langen

Nervenverbindungen gestört und in Richtung der kurzen Verbindungen verschoben ist. Man nimmt an, dass dies zu der gesteigerten Aufmerksamkeit für Details führt und die Fähigkeit, angemessen auf ein Gesamtbild zu reagieren, stört.

- ✓ **Störungen der Leitungsbahnen:** Mutationen von Genen, die festlegen, wie sich bestimmte Neurotransmitterrezeptoren ausprägen, können dazu führen, dass die Signalverarbeitung im gesamten Gehirn gestört ist. Einige Gehirnbereiche kompensieren diese Störungen, andere nicht. Als Folge davon können Epilepsie oder einige Formen der Depression auftreten.
- ✓ **Umweltbedingte organische Störungen:** Das Gehirn kann durch Verletzungen wie etwa einen Schlag auf den Kopf geschädigt werden. Aber auch Gifte wie Blei und Quecksilber können Entwicklungsstörungen oder geistige Behinderungen hervorrufen, ohne dass Schädigungen der Gehirnstruktur erkennbar sind.
- ✓ **Umweltbedingte psychische Störungen:** Manchmal treten nach einem Auslöser psychische Erkrankungen wie zum Beispiel bestimmte Arten von Depressionen auf, ohne dass es bei diesen Menschen zuvor irgendwelche Anzeichen für psychische Probleme gegeben hätte.

Mehr zu diesen Störungen erfahren Sie in Kapitel 17.

Ein Blick in die Zukunft

Revolutionäre Erkenntnisse der Neurowissenschaften können wir in den kommenden 20 Jahren in zwei Bereichen erwarten:

- ✓ Behandlung und Heilung von Erkrankungen
- ✓ Steigerung der Leistungsfähigkeit unseres Gehirns

Fehlfunktionen behandeln

Bis zum letzten Viertel des 20. Jahrhunderts schien es fast unmöglich, Störungen der Gehirnfunktion zu behandeln; es fehlten einfach die geeigneten Mittel und das Wissen, die damals vorhandenen Mittel richtig einzusetzen. Die Hirnforschung hat die Erkenntnisse in diesem Bereich extrem vorangebracht.

Medikamentöse Therapien

Psychische Erkrankungen wie Depressionen, Schizophrenie, Angst- und Zwangsstörungen werden heute vorwiegend medikamentös behandelt. Die meisten Medikamente wirken auf das Neurotransmittersystem, sind aber unterschiedlich effektiv und haben auch unterschiedliche (mitunter sogar schwere) Nebenwirkungen. Von den Medikamenten der ersten

und zweiten Generation haben Wissenschaftler viel gelernt, doch noch immer sind psychische Erkrankungen, Persönlichkeitsstörungen oder Drogenabhängigkeit zwar mehr oder weniger gut therapierbar, aber nicht heilbar.

Zelltransplantationen

Zelltransplantationen sind eine Möglichkeit der Therapie neurologischer Erkrankungen wie Morbus Parkinson, bei dem in speziellen Hirnarealen eine kleine Anzahl von Zellen abstirbt. Das transplantierte Gewebe kann von einem Spender stammen oder es werden Stammzellen verwendet, die in der betroffenen Hirnregion zu den benötigten Zellen ausreifen.

Elektrische Stimulation

Die *tiefe Hirnstimulation* (THS) ist eine Technik, bei der bestimmte Hirnbereiche durch elektrische Impulse stimuliert und so krankheitsbedingte Fehlleistungen korrigiert werden sollen. Diese Technik wird erfolgreich bei Morbus Parkinson und der Therapie verschiedener Arten des Muskelzitterns (Tremor) eingesetzt. Sie zeigt außerdem Erfolge bei der Behandlung einiger Arten von Depressionen.

Eine andere Art der elektrischen Stimulation ist die *transkranielle Magnetstimulation* (TMS). Die TMS nutzt ein starkes, gepulstes Magnetfeld, das gezielt außerhalb des Schädels erzeugt wird, um lokalisierte Ströme in den Gehirnbereichen unter der Spule zu erzeugen. Diese Ströme regen zunächst die Gehirnaktivität an und stellen sie dann für einige Zeit ein. Trotz der kurzen Dauer der direkten Auswirkungen wurden bei hartnäckigen Depressionen langfristige positive Effekte beobachtet. Dabei scheint TMS in gewisser Weise wie die alte "Schocktherapie" (*Elektrokonvulsions- oder Elektrokrampftherapie*, EKT) zu wirken, ohne jedoch Anfälle und andere Nebenwirkungen zu verursachen.

Eine weitere elektrische Stimulationstechnik, die *transkranielle Gleichstromstimulation* (englisch »transcranial direct current stimulation« oder tDCS), erwies sich als vielversprechend, um das Lernen zu verbessern, Depressionen zu reduzieren und möglicherweise die Selbstkontrolle zu erhöhen. Bei einer tDCS werden etwa 2 Milliampere Strom zwischen einer Anode (positiver Pol) und einer Kathode (negativer Pol) angelegt. Je nachdem, welche Hirnareale moduliert werden sollen, werden die beiden Elektroden an verschiedenen Hirnarealen platziert. Die meisten Studien deuten darauf hin, dass die Gehirnaktivität unter der Anode gesteigert wird, während die Gehirnaktivität unter der Kathode verringert wird. Wie bei TMS scheinen die Wirkungen viel länger als die Behandlungszeit anzuhalten, die für eine tDCS normalerweise etwa 20 Minuten beträgt.

Neuroprothesen

Bisher war es nahezu unmöglich, Lähmungen nach Gehirn- oder Rückenmarksverletzungen zu behandeln, denn die motorischen Nerven, die die Muskeln versorgten, wurden entweder bei der Verletzung zerstört oder bildeten sich zurück, weil sie nicht mehr benutzt wurden. Es ist ein lang gehegter Traum in der Rehabilitation von gelähmten Patienten, die motorischen Signale direkt im Gehirn abzufangen, die geschädigte Stelle in Nervensystem zu überbrücken und die Muskulatur direkt mit den elektrischen Impulsen zu versorgen.

Andere Nervenprothesen dienen dazu, sensorische Fähigkeiten zu ersetzen. Am erfolgreichsten ist hierbei das *Cochlea-Implantat* mit dem gehörlose Patienten wieder hören können. In den meisten Fällen können sich die Patienten nach der Operation wieder normal unterhalten, sogar am Telefon.

Implantate, die das Sehen wieder ermöglichen, sind jedoch schwieriger zu realisieren. Das liegt zum einen daran, dass beim Sehen der Informationskanal wesentlich größer ist (eine Million Axone von Netzhautganglienzellen im Vergleich zu 10.000 Nervenfasern der Hörnerven). Zum anderen ist die Hörschnecke (Cochlea) für Implantate anatomisch besser geeignet. Derzeit (Stand 2019) gibt es im Wesentlichen zwei Ansätze für *Netzhautimplantate*: Die Prothese sitzt entweder unter der Netzhaut (*subretinal*) oder auf der Netzhaut (*epiretinal*). Durch eine elektrische Reizung des noch funktionierenden Sehnervs (das ist allerdings die entscheidende Voraussetzung für eine mögliche Anwendung dieser Technologie!) wird dann ein Impuls an das Sehsystem gesendet.

Unsere Fähigkeiten optimieren: Verändern, wer wir sind

Wir Menschen beginnen damit, uns selbst zu verändern. Das geht weit über Impfstoffe, chirurgische Eingriffe oder Prothesen, die unseren Körper verändern, hinaus. Die heutigen Technologien entwickeln sich immer weiter; irgendwann wird es vielleicht Nervenimplantate geben, die uns direkt mit dem Internet verbinden. Ähnliche Implantate könnten direkt in unserem Kopf Sprachen übersetzen oder uns in die Lage versetzen, komplizierte mathematische Aufgaben zu lösen. Und wir könnten mit jedem Menschen auf der Welt kommunizieren, indem wir an ihn denken.

Klingt das für Sie zu weit hergeholt? Bedenken Sie, dass es bereits Neuroprothesen gibt und diese einigen blinden oder gelähmten Menschen zu Versuchszwecken implantiert wurden. Die technischen Voraussetzungen, die dafür notwendig sind, existieren bereits. Allerdings muss die Wissenschaft noch an einer besseren Signalverarbeitung und an länger haltbaren Implantaten arbeiten. Doch in den kommenden 20 Jahren wird es in diesem Bereich sicherlich erstaunliche Fortschritte geben.

