



ps
psychologie

Richard J. Gerrig
Philip G. Zimbardo

Psychologie

18., aktualisierte Auflage

Die biologischen und evolutionären Grundlagen des Verhaltens

3

3.1 Vererbung und Verhalten	66
3.1.1 Evolution und natürliche Selektion	67
3.1.2 Variationen im Genotyp des Menschen	71
3.2 Das Nervensystem in Aktion	75
3.2.1 Das Neuron	75
3.2.2 Aktionspotenziale	77
3.2.3 Synaptische Übertragung	80
3.2.4 Neurotransmitter und ihre Funktionen	81
3.3 Biologie und Verhalten	83
3.3.1 Ein Blick ins Gehirn	84
Kritisches Denken im Alltag: Was bedeutet „Es liegt in den Genen“?	86
3.3.2 Das Nervensystem	88
3.3.3 Gehirnstrukturen und ihre Funktionen	90
3.3.4 Hemisphärenlateralisation	95
3.3.5 Das endokrine System	98
3.3.6 Plastizität und Neurogenese: Unser Gehirn verändert sich	99
Psychologie im Alltag: Warum beeinflusst Musik, wie man sich fühlt?	102
Zusammenfassung	103
Schlüsselbegriffe	104

Ü B E R B L I C K

Was macht uns zu einzigartigen Individuen? Dieses Lehrbuch gibt viele verschiedene Antworten auf diese Frage, doch im vorliegenden Kapitel konzentrieren wir uns auf die biologischen Aspekte unserer Individualität. Um besser verstehen zu können, was uns von anderen Menschen unterscheidet, gehen wir zuerst auf die Rolle ein, welche die Vererbung für unser Leben und die Ausformung unseres Gehirns spielt, das unsere Erfahrungen steuert. Natürlich können wir diese Unterschiede nur vor dem Hintergrund dessen richtig einschätzen, was wir mit allen anderen Menschen gemein haben. Betrachten wir dieses Kapitel deshalb als ein Kapitel über das biologische Potenzial: Welche Möglichkeiten des Verhaltens kennzeichnen die menschliche Spezies und wie treten diese Möglichkeiten bei bestimmten Mitgliedern dieser Spezies in Erscheinung?

In gewisser Weise stellt dieses Kapitel einen Beweis für einen bemerkenswerten Aspekt unseres biologischen Potenzials dar: Unser Gehirn ist hinreichend komplex, um eine systematische Erforschung seiner eigenen Funktionen zu unternehmen. Warum ist dies so bemerkenswert? Das menschliche Gehirn wird manchmal mit einem sensationellen Computer verglichen: Mit nur 1,5 Kilogramm enthält unser Gehirn mehr Zellen, als sich Sterne in unserer Galaxie befinden – über 100 Milliarden Zellen, die erstaunlich effizient miteinander kommunizieren und Informationen speichern. Doch selbst der beste Computer der Welt ist nicht fähig, über die Regeln nachzudenken, die seine eigenen Abläufe steuern. Wir sind also weit mehr als ein Computer; unser Bewusstsein erlaubt es uns, unsere gewaltige Rechenleistung bei dem Versuch einzusetzen, die Verhaltensregeln unserer eigenen Spezies zu erkunden. Die Forschung, die wir in diesem Kapitel beschreiben, erwuchs aus der dem Menschen eigenen Sehnsucht, sich selbst zu verstehen.

Für viele Studierende wird dieses Kapitel eine größere Herausforderung darstellen als der Rest dieses Buches. Es ist erforderlich, einiges über die Anatomie und viele neue Begriffe zu lernen. Dies scheint weit von dem entfernt zu sein, was man von einem Einführungswerk in die Psychologie erwartet. Das Verstehen unserer biologischen Natur wird uns jedoch befähigen, das komplexe Zusammenspiel von Gehirn, Geist, Verhalten und Umwelt besser zu erkennen, aus dem die einzigartige Erfahrung der menschlichen Existenz erwächst.

Unser Ziel für dieses Kapitel ist es, dem Leser den biologischen Anteil am Entstehen einzigartiger Individuen vor dem gemeinsamen Hintergrund an Möglichkeiten verständlich zu machen. Um dieses Ziel zu er-

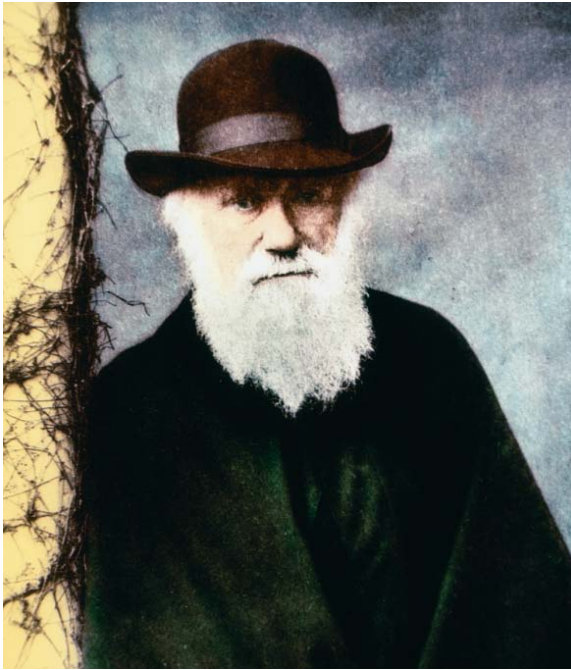
reichen, beschreiben wir zunächst, wie Evolution und Vererbung unseren Körper und unser Verhalten bestimmen. Dann werden wir sehen, wie Labor- und klinische Forschung einen Blick auf die Arbeitsweise des Gehirns, des Nervensystems und des endokrinen Systems ermöglichen. Im Anschluss betrachten wir einige interessante Beziehungen zwischen diesen biologischen Funktionen und einigen Aspekten unserer alltäglichen Erfahrungen. Schließlich behandeln wir Unterschiede zwischen Individuen hinsichtlich der Beziehung zwischen Gehirn und Verhalten.

Vererbung und Verhalten 3.1

In Kapitel 1 haben wir als eines der Hauptziele der Psychologie den Versuch definiert, die Ursachen für die Vielfalt menschlicher Verhaltensweisen aufzudecken. Eine wichtige Dimension kausaler Erklärungen in der Psychologie wird durch die Pole von *Anlage* (oder *Erbe*) und *Umwelt* aufgespannt. Betrachten wir wie in Kapitel 1 die Frage nach den Wurzeln aggressiven Verhaltens. Man könnte denken, dass Menschen aufgrund bestimmter Aspekte ihrer biologischen Ausstattung aggressiv sind: Ein Mensch hat seine Gewaltneigung vielleicht von einem Elternteil geerbt. Oder man ist der Meinung, dass alle Menschen eine etwa gleiche Veranlagung zur Aggression besitzen und dass der Grad der Aggression, den Menschen letztlich an



Psychologen versuchen oft, die verschiedenartigen Einflüsse von Anlage und Umwelt auf den Verlauf des Lebens festzustellen. Warum ist es möglicherweise einfacher, Umwelteinflüsse zu identifizieren als Erbeeinflüsse?



Welche Beobachtungen brachten Charles Darwin letztlich dazu, die Evolutionstheorie aufzustellen?

den Tag legen, als Reaktion auf die Bedingungen der Umwelt entsteht, in der sie aufgewachsen sind. Die richtige Antwort auf diese Frage wirkt sich grundlegend darauf aus, wie die Gesellschaft mit übermäßig aggressiven Menschen umgeht – ob man sich darauf konzentriert, bestimmte Umweltbedingungen oder aber bestimmte Aspekte der Person selbst zu verändern. Die Kräfte der Vererbung müssen von den Kräften der Umwelt unterschieden werden können.

Weil die Merkmale der Umwelt direkt beobachtbar sind, ist es oft leichter zu verstehen, wie sie das Verhalten von Menschen beeinflussen. Man kann zum Beispiel ein Elternteil, das sich gegenüber einem Kind aggressiv verhält, beobachten und sich fragen, welche Folgen eine solche Behandlung später auf die Aggressionsneigung des Kindes haben wird; man kann die beengten und ärmlichen Verhältnisse beobachten, in denen manche Kinder aufwachsen, und sich fragen, ob diese Umweltmerkmale zu aggressivem Verhalten führen. Im Gegensatz dazu sind die biologischen Kräfte, die das Verhalten formen, nie mit bloßem Auge zu erkennen. Um die Biologie des Verhaltens verständlicher zu machen, werden wir zunächst einige grundlegende Prinzipien beschreiben, die das mögliche Verhaltensrepertoire einer Spezies formen – das sind Bestandteile der Evolutionstheorie. Dann beschreiben wir, wie die Variation des Verhaltens von Generation zu Generation weitergegeben wird.

3.1.1 Evolution und natürliche Selektion

Frisch von der Universität mit einem Abschluss in Theologie setzte im Jahre 1831 **Charles Darwin** in England die Segel und war auf der *HMS Beagle*, einem Meeresforschungsschiff, fünf Jahre auf See, um die Küste Südamerikas zu erforschen. Während dieser Reise sammelte Darwin alles, was seinen Weg kreuzte: Meerestiere, Vögel, Insekten, Pflanzen, Fossilien, Muscheln und Steine. Seine ausführlichen Notizen legte er seinen Büchern zugrunde, die sich mit Themen von der Geologie über Emotion bis hin zur Zoologie befassen. Darwins bekanntestes Buch ist *The Origin of Species* (*Die Entstehung der Arten*), veröffentlicht 1859 (deutsch 1884). In diesem Werk legte Darwin die bedeutendste naturwissenschaftliche Theorie dar: die Evolution des Lebens auf dem Planeten Erde.

Natürliche Selektion

Darwin entwickelte seine Evolutionstheorie, indem er über die Arten von Tieren nachdachte, denen er während seiner Reise begegnet war. Einer der vielen Orte, die die *Beagle* besuchte, waren die Galapagosinseln, ein vulkanischer Archipel vor der Westküste Südamerikas. Diese Inseln sind Zufluchtsorte für diverse Tierarten, darunter 13 Arten von Finken, die heute Darwinfinken genannt werden. Darwin fragte sich, wie es dazu kam, dass so viele unterschiedliche Arten von Finken diese Inseln bevölkern. Er folgerte, dass sie nicht vom Festland gekommen sein konnten, weil solche Arten dort nicht existierten. Deshalb vermutete er, dass die Artenvielfalt einen Prozess widerspiegelt, den er später **natürliche Selektion** (natürliche Auslese) nannte.

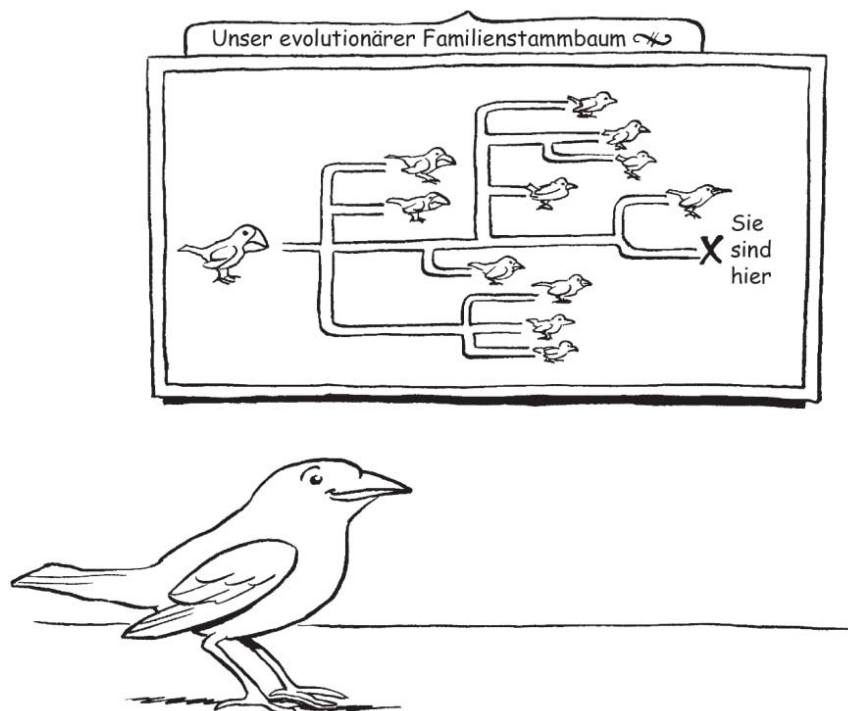
Nach Darwins Theorie entstammt jede Spezies der Finken einer gemeinsamen Gruppe von Vorfahren. Ursprünglich fand eine kleine Schar von Finken ihren Weg auf eine der Inseln: Sie paarten sich untereinander, und ihre Zahl vervielfachte sich schließlich. Mit der Zeit zogen einige Finken auf andere Inseln des Archipels. Was dann geschah, war der Prozess der natürlichen Selektion. Futterquellen und Lebensbedingungen – *ökologische Nischen* – variieren beträchtlich von Insel zu Insel. Auf einigen Inseln gedeihen Beeren und Körner, andere sind mit Kakteen bedeckt, und wieder andere weisen eine Menge Insekten auf. Zu Anfang waren die Populationen auf allen Inseln ähnlich – es gab *Variationen* zwischen den Gruppen von Finken auf jeder Insel. Weil jedoch die Futterressourcen auf den Inseln begrenzt waren, hatten diejenigen Vögel die besten Überlebens- und Fort-

pflanzungschancen, deren Schnabelform gut zu den Futterquellen passte, die es auf der Insel gab. Vögel, die zum Beispiel auf Inseln zogen, die reich an Beeren und Körnern waren, überlebten und reproduzierten sich mit größerer Wahrscheinlichkeit, wenn sie mit einem dicken Schnabel ausgestattet waren. Vögel mit dünnerem, spitzerem Schnabel, der für das Knacken und Aufbrechen von Körnern ungeeignet war, starben auf diesen Inseln. Die Umwelt jeder Insel legte fest, welche Individuen der ursprünglichen Population überleben und sich fortpflanzen würden und welche wahrscheinlich eingehen würden, ohne Nachkommen produziert zu haben. Im Laufe der Zeit führte dies zu sehr unterschiedlichen Populationen auf jeder Insel, und unterschiedliche Arten von Darwinfinken konnten sich aus der ursprünglichen Gruppe der Vorfahren entwickeln.

Generell postuliert die Theorie der natürlichen Selektion, dass Organismen, die gut an ihre jeweilige Umwelt – gleich, wie diese Umwelt beschaffen ist – angepasst sind, mehr Nachkommen produzieren als die schlechter angepassten. Nach einiger Zeit werden Organismen, die geeignetere Eigenschaften zum Überleben besitzen, zahlreicher sein als diejenigen, die diese Eigenschaften nicht aufweisen. Aus evolutionärer Sicht wird der Erfolg eines Individuums an der Anzahl seiner Nachkommen gemessen.

Neuere Forschungen haben gezeigt, dass die natürliche Selektion sogar nach kurzer Zeit drastische Aus-

wirkungen haben kann. In einer Reihe von Studien von **Peter und Rosemary Grant** (Grant & Grant, 1989; Grant, 1986; Weiner, 1994) an verschiedenen Arten von Darwinfinken wurden Niederschlagsmenge, Futterversorgung und Größe der Population dieser Finken auf einer der Galapagosinseln aufgezeichnet. Im Jahre 1976 umfasste die Population weit mehr als 1000 Vögel. Das folgende Jahr brachte eine mörderische Trockenheit mit sich, die den größten Teil des Futterangebots vernichtete. Die kleinsten Körner wurden zuerst gefressen, nur größere und härtere Körner blieben übrig. In diesem Jahr sank die Finkenpopulation um mehr als 80 Prozent. Jedoch starben mehr kleinere Vögel mit kleinerem Schnabel als größere Finken mit dickerem Schnabel. Folglich wurden, wie Darwin es vorhergesagt hätte, die größeren Vögel in den folgenden Jahren zahlreicher. Warum? Weil nur die mit größerem Körper und dickerem Schnabel fit genug waren, um sich auf die veränderte Umwelt auf Grund der Trockenheit einzustellen. Interessanterweise fiel 1983 reichlich Regen, und es gab Körner im Überfluss, insbesondere die kleineren. Daraus resultierte, dass die kleineren Vögel die größeren überlebten; wahrscheinlich war ihr Schnabel besser für das Picken kleinerer Körner geeignet. Die Untersuchung der Grants zeigt, dass natürliche Selektion sogar in kurzen Abschnitten bemerkenswerte Effekte nach sich ziehen kann. Forscher dokumentieren weiterhin den Einfluss der Umwelt auf die natürliche Selektion bei verschiedenen Spezies,



beispielsweise der Europäischen Fruchtfliege (Huey et al., 2000) und dem Stichling (Rundle et al., 2000).

Obwohl Darwin das Fundament für die Evolutionstheorie legte, werden von seinen Nachfolgern heute noch Mechanismen evolutionären Wandels erforscht, die jenseits seiner Vorstellungen lagen (Gould, 2002). So war zum Beispiel eine der Fragen, die Darwin nicht stichhaltig beantworten konnte, wie Populationen mit gemeinsamen Vorfahren sich so auseinander entwickeln, dass aus einer Spezies zwei werden. Wie an den Forschungen der Grants mit Darwinfinken bereits deutlich wurde, können sich Spezies als Reaktion auf örtliche Bedingungen rasch verändern. Eine Erklärung für das Auftreten neuer Spezies ist, dass sie entstehen, wenn zwei Populationen einer Ursprungsart geografisch getrennt werden – und sich daher als Reaktion auf unterschiedliche Umweltbedingungen weiterentwickeln. Allerdings hat die gegenwärtige Evolutionsforschung zahlreiche Beispiele neuer Spezies gefunden, die ohne diese Art geografischer Isolierung entstanden sind (Barton, 2000). Die Forschung geht mehreren Erklärungen dafür nach, wie sich Arten unter diesen Umständen entwickeln. Diese Erklärungen befassen sich zum Beispiel damit, wie Untergruppen innerhalb einer Art unterschiedliche Signale entwickeln – wie etwa die chemischen Signale bei Fruchtfliegen –, um geeignete Geschlechtspartner zu erkennen (Higgie et al., 2000). Wenn sich diese Signale im Laufe der Zeit auseinanderentwickeln, können unterschiedliche Arten entstehen.

Genotyp und Phänotyp

Kehren wir zu den Ursachen der Veränderung innerhalb existierender Arten zurück.

Das Beispiel der Abnahme und des Anstiegs von Finkenpopulationen zeigt, warum Darwin den Verlauf der Evolution als *survival of the fittest* (Überleben der Bestangepassten) charakterisierte. Man stelle sich vor, dass jede Umwelt eine Reihe von Schwierigkeiten für jede Lebensform mit sich bringt. Diejenigen Mitglieder einer Spezies, deren physische und psychische Eigenschaften in dem Bereich liegen, der am besten zur Umwelt passt, haben die besten Überlebenschancen. In dem Maße, in dem die Eigenschaften, die das Überleben fördern, von Generation zu Generation weitergegeben werden können – sofern die Belastungsfaktoren in der Umwelt im Laufe der Zeit konstant bleiben –, wächst die Wahrscheinlichkeit, dass sich diese Spezies entsprechend weiterentwickelt.

Um den Prozess der natürlichen Selektion detaillierter betrachten zu können, führen wir nun einige

Fachbegriffe der Evolutionstheorie ein. Betrachten wir einen einzelnen Finken. Bei der Zeugung erbt dieser Fink einen **Genotyp**, oder die genetische Struktur, von seinen Eltern. Im Kontext einer spezifischen Umwelt legte dieser Genotyp die Entwicklung und das Verhalten des Finken fest. Das äußere Erscheinungsbild und das Verhaltensrepertoire des Finken wird **Phänotyp** genannt. Im Falle unseres Finken habe sein Genotyp im Zusammenspiel mit der Umwelt einen Phänotyp mit *kleinem Schnabel* und der Fähigkeit, *kleinere Körner zu picken*, hervorgebracht.

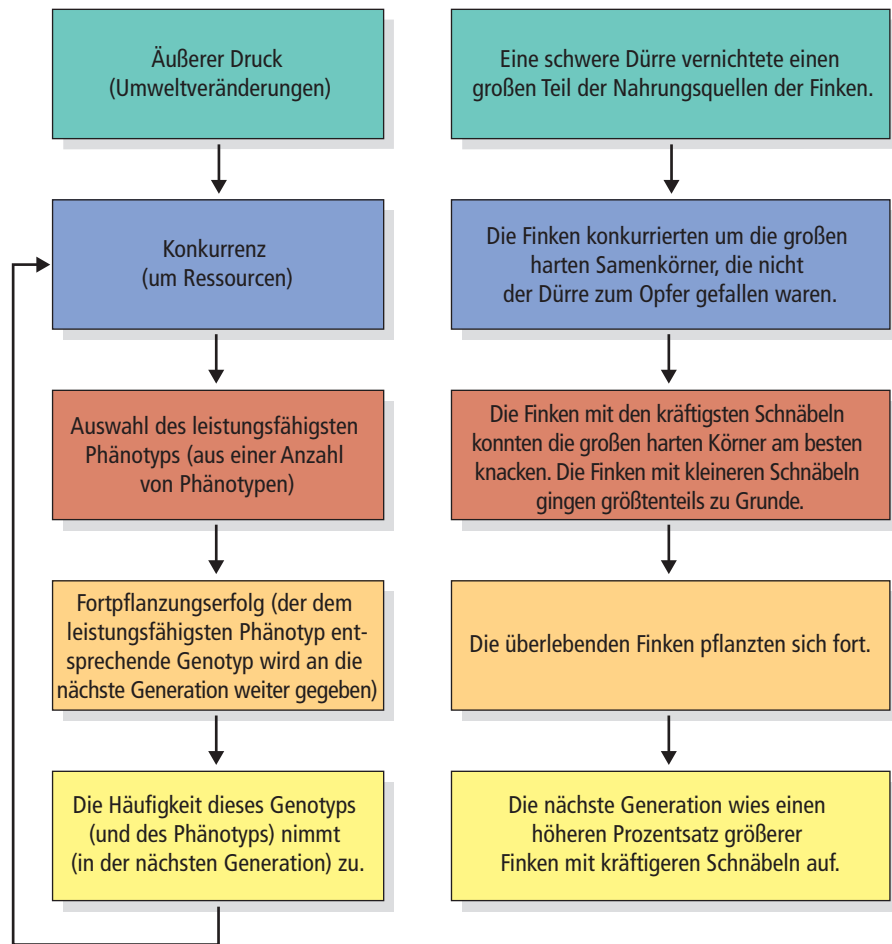
Wären alle Arten von Körnern ausreichend vorhanden, hätte dieser Phänotyp keine besondere Bedeutung für das Überleben des Finken. Was wäre aber, wenn in der Umgebung nicht ausreichend Samen zur Verfügung stünden, um die gesamte Population zu ernähren? In diesem Falle würden die einzelnen Finken in *Konkurrenz* um die Ressourcen treten. Bei einer Art, die unter den Bedingungen solcher Konkurrenz lebt, bestimmt der Phänotyp, welchen Individuen durch bessere Anpassung an die Gegebenheiten das Überleben ermöglicht wird. Werfen Sie noch einmal einen Blick auf unseren Finken mit dem kleinen Schnabel: Wenn nur kleine Körner verfügbar wären, hätte er einen *selektiven Vorteil* gegenüber Finken mit großem Schnabel. Gäbe es nur große Körner, wäre unser Fink im Nachteil.

Nur Finken, die überleben, können sich auch fortpflanzen. Nur jene Tiere, die sich fortpflanzen, können ihren Genotyp weitergeben. Stellte die Umwelt weiterhin nur kleine Körner bereit, hätten die Finken daher nach einigen Generationen wahrscheinlich fast ausschließlich einen schmalen Schnabel – mit der Konsequenz, dass sie fast nur noch fähig wären, kleine Körner zu fressen. Auf diesem Wege können Umweltbedingungen das Verhaltensrepertoire einer Spezies formen. ► Abbildung 3.1 stellt ein vereinfachtes Modell des Prozesses der natürlichen Selektion dar. Übertragen wir nun diese Gedanken auf die menschliche Evolution.

Die menschliche Evolution

Wenn wir auf die Umstände zurückblicken, unter denen sich die menschliche Spezies entwickelte, beginnt man zu verstehen, warum gewisse körperliche Merkmale und Verhaltensmerkmale Teil der biologischen Ausstattung der gesamten menschlichen Spezies geworden sind. Im Laufe der Evolution unserer Spezies begünstigte die natürliche Selektion hauptsächlich zwei Adaptionen – den Gang auf zwei Beinen und die Weiterentwicklung des Gehirns. Beide Aspekte zu-

Abbildung 3.1: Wienatürliche Selektion funktioniert. Veränderungen in der Umwelt führen unter den Angehörigen einer Spezies zum Kampf um Ressourcen. Nur diejenigen Individuen, die Merkmale besitzen, die im Zurechtkommen mit diesen Veränderungen nützlich sind, werden überleben und sich fortpflanzen. Die folgende Generation wird eine größere Anzahl von Individuen aufweisen, die diese genetisch begründeten Eigenschaften besitzen.



sammen ermöglichten das Entstehen der menschlichen Zivilisation. *Zweibeiner* sind fähig, aufrecht zu gehen, und die *Ausbildung des Großhirns* lässt die Größe des Gehirns anwachsen. Diese beiden Anpassungsleistungen sind für die meisten, wenn nicht gar für alle weiteren größeren Fortschritte der menschlichen Entwicklung, darunter auch die kulturelle Entwicklung, verantwortlich (► Abbildung 3.2). Mit der Entwicklung des aufrechten Ganges waren unsere Vorfahren in der Lage, neue Umwelten zu erkunden und neue Ressourcen zu nutzen. Mit wachsender Gehirngröße wurden unsere Vorfahren intelligenter und verfügten über Kapazitäten für komplexes Denken, Schlussfolgern, Gedächtnis und Planen. Die Entwicklung eines größeren Gehirns garantierte jedoch nicht, dass die Menschen intelligenter wurden – wichtig war die Art und Beschaffenheit der Zellen, die sich entwickelten und im Gehirn ausbreiteten (Gibbons, 2002). Der Genotyp, der die Informationen eines intelligenten und mobilen Phänotyps kodierte, verdrängte nach und nach andere, weniger gut angepasste Genotypen aus dem menschlichen Genpool, so dass sich nur in-

telligenten Zweibeinern die Gelegenheit bot, sich fortzupflanzen.

Nach dem Gang auf zwei Beinen und der Ausformung des Großhirns war der vielleicht bedeutendste Meilenstein der menschlichen Evolution die Entstehung der *Sprache* (Bickerton, 1990; Holden, 1998). Man stelle sich die ungeheuren Anpassungsvorteile vor, welche die Sprache dem frühen Menschen bot. Einfache Anweisungen, wie ein Werkzeug herzustellen ist, wo man gute Jagd- oder Fischgründe findet und wie man Gefahren vermeidet, würden Zeit, Mühen und Menschenleben sparen. Menschen konnten von den Erfahrungen anderer profitieren und mussten nicht durch Versuch und Irrtum alles, was man für das Leben brauchte, jedes Mal wieder neu erlernen. Konversation, auch Humor, würde die sozialen Bande unter Mitgliedern einer von Natur aus geselligen Spezies stärken. Doch am wichtigsten erscheint mit der Entstehung der Sprache die Möglichkeit, gesammeltes Wissen von einer Generation zur nächsten zu tradieren.

Sprache ist die Basis für *kulturelle Evolution*, die Tendenz von Kulturen, adaptiv durch Lernen auf Ver-

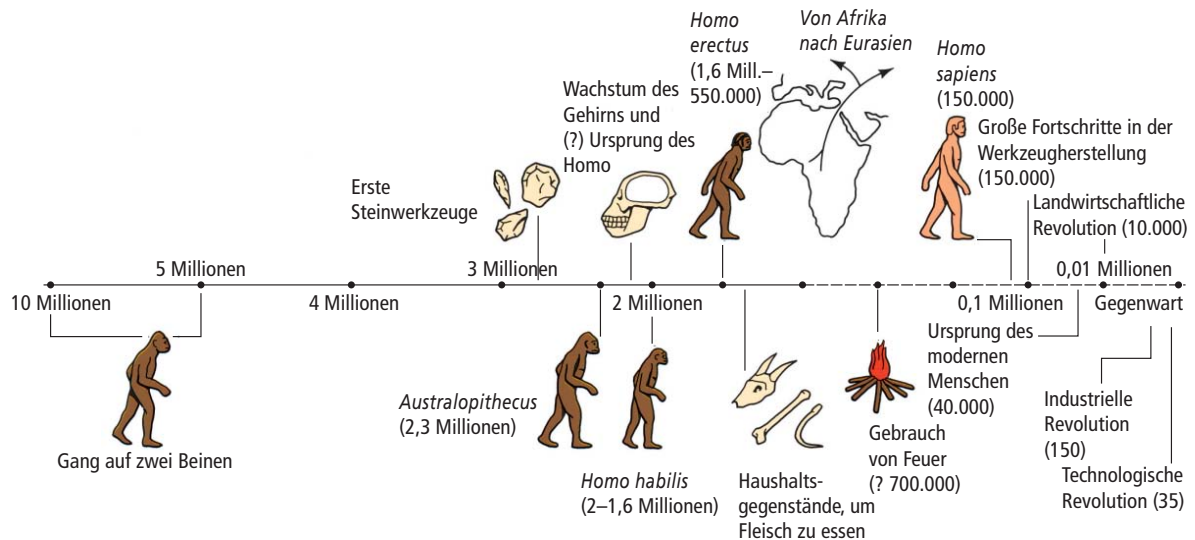


Abbildung 3.2: Zeitschiene für die wichtigsten Ereignisse der menschlichen Evolution. Der Gang auf zwei Beinen machte die Hände zum Greifen und zum Werkzeuggebrauch frei. Die Ausbildung des Großhirns stellte die Möglichkeit für höhere kognitive Prozesse wie das abstrakte Denken und Schlussfolgern bereit. Diese beiden Anpassungsleistungen führten wahrscheinlich zu den großen Fortschritten in der Entwicklung des Menschen.

änderungen in der Umwelt zu reagieren. Die kulturelle Evolution ließ größere Fortschritte im Werkzeugbau, verbesserte Landwirtschaft und die Entwicklung und ständige Verbesserung von Industrie und Technik entstehen. Unserer Spezies erlaubt die kulturelle Evolution eine sehr schnelle Anpassung an Veränderungen der Umweltbedingungen. Anpassungen an die Nutzung von Computern sind zum Beispiel erst in den letzten 20 Jahren entstanden. Die kulturelle Evolution kann sich aber nicht ohne einen Genotyp ereignen, der die Kapazitäten für Lernen und abstraktes Denken in sich trägt. Kultur – Kunst, Literatur, Musik, Wissenschaft und Liebhabereien usw. – ist erst aufgrund des Potenzials des menschlichen Genotyps möglich.

3.1.2 Variationen im Genotyp des Menschen

Wir haben gesehen, dass die Bedingungen, unter denen sich der Mensch entwickelte, die Entwicklung eines wichtigen gemeinsamen biologischen Potenzials begünstigten: beispielsweise der Gang auf zwei Beinen und die Fähigkeit zu denken und zu sprechen. Es bleiben jedoch beträchtliche Variationen innerhalb dieses gemeinsamen Potenzials. Unsere Eltern haben uns mit einem Teil von dem ausgestattet, was sie von ihren Eltern, Großeltern und all den zurückliegenden Generationen ihres Stammbaumes erhielten. Und es entstand ein einzigartiges biologisches Muster und ein einzigar-

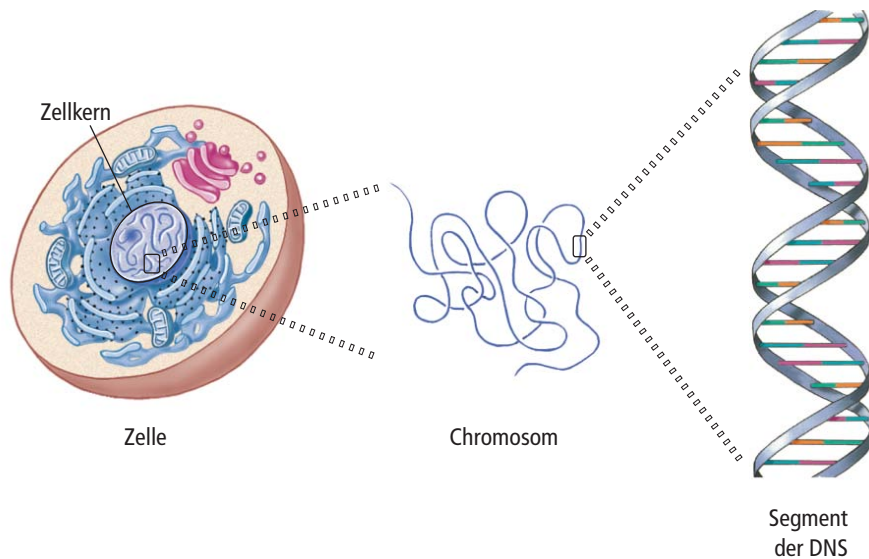
tiger Zeitplan für unsere Entwicklung. Die Wissenschaft von den Mechanismen der **Vererbung** – dem Übernehmen von körperlichen und psychischen Eigenschaften von unseren Vorfahren – ist die **Genetik**.

Die früheste systematische Forschung, die sich mit der Beziehung zwischen Eltern und ihren Nachkommen befasste, wurde 1866 von **Gregor Mendel** (1822 – 1884) veröffentlicht. Mendel führte seine Studien an der bescheidenen grünen Erbse durch. Er konnte zeigen, dass die äußeren Merkmale von Erbsen, die aus verschiedenen Samen keimten – zum Beispiel, ob die Erbsen *prall* oder *runzlig* aussahen –, aus den äußeren Merkmalen derjenigen Pflanzen vorhergesagt werden konnten, von denen die Samen stammten. Mendel postulierte, dass Paare von „Faktoren“ – jeweils einer



Menschliche Chromosomen – im Augenblick der Zeugung erben wir 23 von unserer Mutter und 23 vom Vater.

Abbildung 3.3: Genetisches Material. Der Zellkern einer jeden Zelle Ihres Körpers enthält eine Kopie der Chromosomen, die die genetische Vererbung steuern. Jedes Chromosom enthält einen langen DNS-Strang, der in einer Doppelhelix angeordnet ist. Ein Gen ist ein Segment der DNS, das Baupläne zur Bildung von Proteinen enthält, welche Ihre individuelle Entwicklung leiten (nach Lefton & Brennon, 2003).



von einem Elternteil vererbt –, die Eigenschaften der Nachkommen bestimmten (Lander & Weinberg, 2000). Mendels Arbeit wurde zwar ursprünglich von der Wissenschaft kaum zur Kenntnis genommen, aber moderne Verfahren haben die Forschung in den Stand gesetzt, Mendels „Faktoren“ zu bestimmen und zu erforschen – wir nennen sie heute *Gene*.

Genetische Grundlagen

Im Kern jeder unserer Zellen befindet sich genetisches Material, die **DNS** (Desoxyribonukleinsäure; auch DNA, vom Englischen *deoxyribonucleic acid*, ► Abbildung 3.3). Die DNS besteht aus kleinsten Einheiten, den **Genen**. Gene enthalten die Instruktionen zur Produktion von Proteinen. Diese Proteine regulieren die physiologischen Prozesse des Körpers und die Ausprägung der phänotypischen Eigenschaften: Körperbau, körperliche Stärke, Intelligenz und viele Verhaltensmuster.

Gene findet man auf stäbchenartigen Strukturen, den *Chromosomen*. Zum Zeitpunkt unserer Zeugung erben wir von unseren Eltern 46 Chromosomen – 23 von der Mutter und 23 vom Vater. Jedes dieser Chromosomen enthält Tausende von Genen – die Vereinigung eines Spermiums mit einer Eizelle stellt nur eine aus vielen Milliarden möglicher Genkombinationen dar. Die **Geschlechtschromosomen** enthalten Gene, die den Code für die Entwicklung männlicher oder weiblicher Körpermerkmale tragen. Wir erben ein X-Chromosom von der Mutter und entweder ein X- oder ein Y-Chromosom vom Vater. Eine XX-Kombination codiert die Entwicklung weiblicher, eine XY-Kombination die Entwicklung männlicher Merkmale.

Von 1990 an finanzierte die Regierung der Vereinigten Staaten ein internationales Forschungsvorhaben namens *Human Genome Project* (HGP). Das **Genom** eines Organismus ist die vollständige Gensequenz auf den Chromosomen mit der zugehörigen DNS. 2003 hatte das HGP sein Ziel erreicht, die komplette Sequenz des menschlichen Genoms zu erstellen. Auf der Grundlage dieser Daten hat die Forschung jetzt begonnen, alle 20.000 bis 25.000 Gene des Menschen zu identifizieren. Das Ziel hier ist eine vollständige Auflistung der Anordnung und Funktionen sämtlicher Gene.

Gene und Verhalten

Wir haben gesehen, dass evolutionäre Prozesse eine beträchtliche Menge an Variation des menschlichen Genotyps bestehen ließen; die Interaktionen dieser Genotypen mit speziellen Umweltgegebenheiten rufen eine Variation des menschlichen Phänotyps hervor. Forscher im Bereich der **Verhaltensgenetik** spannen einen Bogen zwischen Genetik und Psychologie, um kausale Beziehungen zwischen Vererbung und Verhalten zu ergründen (Plomin et al., 2003).

Die Erforschung menschlicher Verhaltensgenetik befasst sich oft mit der **Erblichkeit** bestimmter menschlicher Eigenschaften und Verhaltensweisen. Erblichkeit wird auf einer Skala von 0 bis 1 gemessen. Liegt ein Wert nahe 0, wird damit ausgesagt, dass er hauptsächlich das Resultat von Umwelteinflüssen ist; liegt er nahe 1, handelt es sich größtenteils um das Ergebnis genetischer Einflüsse. Um diese beiden Faktoren auseinander zu halten, greifen Wissenschaftler oft auf *Adoptionsstudien* oder *Zwillingsstudien* zurück. Für

Adoptionsstudien erheben die Forscher so viele Informationen wie möglich über die leiblichen Eltern von Kindern, die bei Pflegeeltern aufwachsen. Während die Kinder aufwachsen, werden ihre relativen Ähnlichkeiten mit den leiblichen Eltern – die genetischen Einflüsse – mit denen mit ihren Adoptiveltern – also den Umwelteinflüssen – verglichen.

In Zwillingsstudien wird untersucht, in welchem Ausmaß *monozygote* (MZ), das heißt eineiige, und *dizygote* (DZ), also zweieiige, Zwillingspaare einander in bestimmten Eigenschaften oder Verhaltensweisen ähneln. MZ-Zwillinge teilen 100 Prozent ihres Genmaterials, während es bei DZ-Zwillingen nur etwa 50 Prozent sind. (DZ-Zwillinge haben genetisch nicht mehr gemeinsam als andere Geschwisterpaare.) Indem man feststellt, wie viel ähnlicher MZ-Zwillinge einander, verglichen mit DZ-Zwillingen, hinsichtlich einer bestimmten Eigenschaft sind, kann man die Erblichkeit abschätzen. Betrachten wir eine Zwillingsstudie zur Bestimmung des Erblichkeitsanteils, Verzerrungen in einfachen Melodien zu erkennen:

AUS DER FORSCHUNG

Beschweren sich Ihre Nachbarn, wenn Sie unter der Dusche singen? Wie weit ist Ihr musikalisches Talent (oder dessen Fehlen) ein Ergebnis Ihres genetischen Erbes? Eine Studie sollte diese Frage für einen Aspekt der Musikalität beantworten – die Fähigkeit, falsche Tonfolgen in einfachen Melodien zu erkennen (Drayna et al., 2001). In ► Abbildung 3.4 finden Sie ein Beispiel. Selbst, wenn Sie keine Noten lesen können, sehen Sie doch, dass die Noten am Ende der Phrase verändert worden sind. Würden Sie die Veränderung aber auch hören?

In diesem Experiment bekamen 136 MZ-Zwillingspaare und 148 DZ-Zwillingspaare 26 kurze Melodien vorgespielt und gaben jeweils an, ob die Melodie korrekt oder verändert klang. Die Ergebnisse der MZ-Zwillinge – Anzahl der Treffer unter 26 möglichen – glichen einander mit einer Korrelation von 0,67 stärker als die der DZ-Zwillinge mit einer Korrelation von 0,44. Auf Grund dieser Daten ermittelten die Experimentatoren einen Erblichkeitswert von 0,71. Diese Schätzung legt einen großen genetischen Anteil bei der Tonhöhenwahrnehmung nahe.

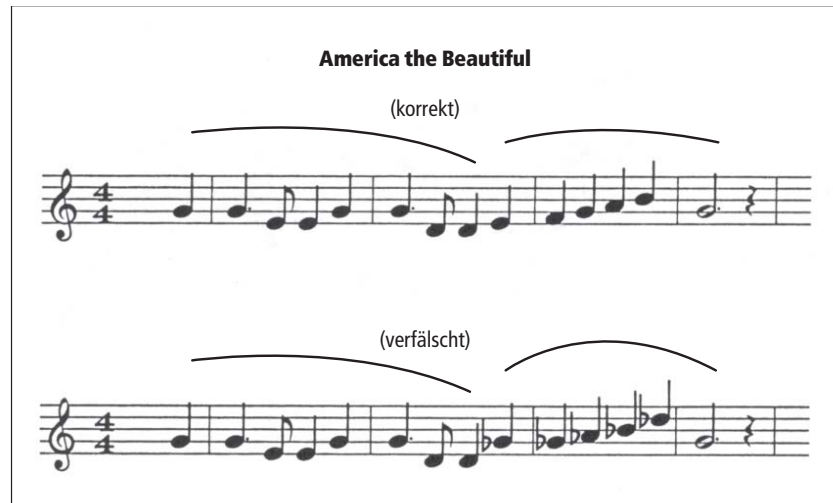
Vergegenwärtigen Sie sich aber, dass dieser hohe Erblichkeitsfaktor nicht bedeutet, dass jedes Mitglied einer Familie dieselbe Fähigkeit zur Tonhöhenwahrnehmung hätte. Genau wie ein einziges Elternpaar sowohl Kinder mit blauen als auch mit braunen Augen zeugen kann, kann es auch Kinder mit und ohne musikalische Begabung hervorbringen. Der hohe Erblichkeitsfaktor

bedeutet vielmehr, dass bei der Fähigkeit zur Tonhöhenwahrnehmung Umwelteinflüsse nur einen sehr geringen Einfluss darauf haben, wie talentiert Sie in dieser Hinsicht werden können.

Dieses Beispiel der Erblichkeit von Tonhöhenwahrnehmung lässt einige der ethischen Probleme erkennen, die sich im Gefolge des Erfolgs des HGP ergeben haben. Angenommen, das HGP könnte die Gene identifizieren, die für die unterschiedlichen Fähigkeiten in der Tonhöhenwahrnehmung verantwortlich sind – würden Sie dann als werdender Elternteil nur Kinder mit großen musikalischen Talenten haben wollen? Obwohl diese Frage vielleicht, weil es um musikalische Fähigkeiten geht, nicht so brisant erscheinen mag, hat sich die genetische Forschung doch bereits mit den Konsequenzen genetischen Vorwissens beschäftigt (Bostrom, 2005; Liao, 2005). So gibt es etwa schon mehrere Verfahren, die Eltern gestatten, das Geschlecht ihres Kindes zu wählen. Sollten sie eine solche Wahl treffen können? Wie steht es mit Auswahlmöglichkeiten hinsichtlich der Intelligenz, Sportlichkeit oder der kriminellen Neigungen eines Kindes? Weil das HGP und ähnliche Projekte hier laufend neue Erkenntnisse beisteuern, werden solche Fragen in der Debatte politischer Grundsätze immer wichtiger werden.

Trotzdem muss man sich vor Augen halten, dass – außer in Fällen wie dem Geschlecht eines Kindes – Gene kein Schicksal sind. Tatsächlich gibt es bereits Dokumentationen wichtiger Fälle, in denen sowohl Erblichkeit als auch Umwelteinflüsse eine entscheidende Rolle dabei spielen, das Verhalten eines Organismus zu bestimmen. Das zeigt etwa eine Studie der Erb- und Umwelteinflüsse auf aggressives Verhalten bei männlichen Rhesusaffen (Newman et al., 2005). Beginnen wir mit der Erblichkeit: Innerhalb der 45 Affen umfassenden Population variierte ein Gen, das den Pegel von Neurotransmittern (siehe Seite 80) im Gehirn steuerte – einige der Affen hatten die *aktive* Variante des Gens, andere dagegen die *träge* Variante. Was die Umwelteinflüsse angeht, so wurde ungefähr die Hälfte der Affen von ihrer eigenen oder einer Pflegemutter aufgezogen; die anderen wuchsen anfänglich ohne Mütter auf. Die Experimentatoren erhoben die Aggression der Affen, indem sie beispielsweise beobachteten, wie effektiv sie um ihr Futter kämpften. Diese Beobachtungen ergaben, dass die Aggressivität der Affen sowohl von ihrer genetischen Disposition wie auch von ihrer Umwelt abhing: Die Affen mit der trägen Genvariante, die außerdem von Müttern aufgezogen worden waren, verhielten sich am aggressivsten. Affen mit derselben Genvariante, die keinen Kontakt zu ihrer Mutter erfahren hatten, zeigten dagegen keine

Abbildung 3.4: Verfälschte Melodien als Beispiel, um die Erbllichkeit von Tonhöhenwahrnehmung zu untersuchen. Wenn Sie diese zwei Melodien vorgespielt bekommen, könnten Sie dann sagen, welche korrekt und welche verfälscht ist?



gesteigerte Aggressivität. Aus diesem Beispiel ersehen Sie, wieso die Forschung verstehen möchte, wie und warum bestimmte Umgebungen die Realisierung genetischer Dispositionen ermöglichen.

Die Forschung im Rahmen der menschlichen Verhaltensgenetik fokussiert meist den Ursprung der individuellen Unterschiede: Welche Faktoren unseres individuellen genetischen Erbgutes tragen zur Erklärung unseres Denkens und Handelns bei? In Ergänzung zur Verhaltensgenetik gibt es mittlerweile zwei Forschungsfelder, die auf breiterer Basis untersuchen, wie sich Selektionsprozesse auf das Verhaltensrepertoire von Menschen und anderen Arten ausgewirkt haben. Forscher aus dem Gebiet der **Soziobiologie** versuchen, diese Frage im Hinblick auf evolutionäre Erklärungen für soziales Verhalten und soziale Systeme von Menschen und anderen Spezies zu beantworten. Forscher aus dem Gebiet der **evolutionären Psychologie** weiten diese Erklärungen auf andere Aspekte der menschlichen Erfahrung aus, wie etwa die Frage nach den Funktionsweisen des Denkens.

Betrachten wir das Glückliche etwas genauer. Wie würde man aus evolutionärer Perspektive die generelle Fähigkeit der menschlichen Spezies erklären, Glück empfinden zu können? Buss (2000) ist der Ansicht, dass „Diskrepanzen zwischen der heutigen Umwelt und der unserer Vorfahren“ (S. 15) dem menschlichen Glückliche gewisse Grenzen auferlegen. Obwohl sich beispielsweise der Mensch in kleinen Gruppen entwickelte, leben heute viele Menschen in großen Städten, wo sie hauptsächlich von einer großen Zahl völlig Fremder umgeben sind. Wir unterhalten keine engen Beziehungen mehr zu der Gruppe von Individuen in unserer räumlichen Nähe – und das sind die Arten von Beziehungen, die uns helfen, Kri-

sen zu meistern, um ein glückliches Leben zu führen. Was kann man tun? Obwohl wir den Verlauf der kulturellen Evolution nicht umkehren können, der diese Veränderungen mit sich brachte, können wir doch versuchen, diese Veränderungen durch eine engere Bindung an unsere Familie und unseren Freundeskreis zu kompensieren (Buss, 2000). Dieses Beispiel verdeutlicht den Kontrast zwischen der soziobiologischen Betonung der Gemeinsamkeiten der menschlichen Spezies in einer bestimmten Umwelt und der verhaltensgenetischen Betonung der Variationen innerhalb eines solchen allgemeinen Verhaltensmusters. Im weiteren Verlauf von *Psychologie* werden wir mehrere weitere Fälle vorstellen, in denen die evolutionäre Perspektive die menschliche Alltagserfahrung beleuchtet. Diese Beispiele reichen von Partnerwahl in Beziehungen (Kapitel 11) über den Ausdruck von Emotionen (Kapitel 12) bis hin zu Mustern aggressiven Verhaltens (Kapitel 17).

ZWISCHENBILANZ

- 1 Auf welche Weise illustriert die Studie der Grants über Finken die Rolle der genetischen Variation im Evolutionsprozess?
- 2 Was ist der Unterschied zwischen Genotyp und Phänotyp?
- 3 Welche zwei evolutionären Fortschritte waren entscheidend in der Entwicklung des Menschen?
- 4 Was bedeutet Erbllichkeit?

KRITISCHES DENKEN: Warum benutzten die Experimentatoren in der US-amerikanischen Studie zur Tonhöhenwahrnehmung dort bekannte Melodien wie „America the Beautiful?“

Das Nervensystem in Aktion

3.2

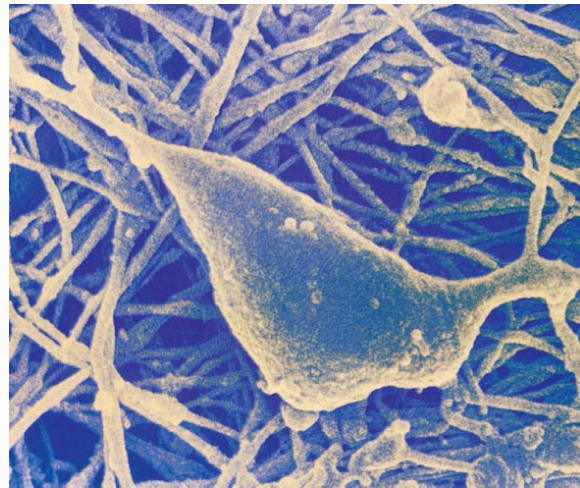
Wenden wir unsere Aufmerksamkeit nun den bemerkenswerten Produkten des menschlichen Genotyps zu: den biologischen Systemen, die das gesamte Spektrum des Denkens und Handelns erst möglich machen. Lange bevor sich Darwin auf seine Reise auf der *Beagle* vorbereitete, diskutierten Naturwissenschaftler, Philosophen und andere die Rolle, die biologische Prozesse im Alltag spielen. Eine der wichtigsten Persönlichkeiten in der Geschichte der Hirnforschung war der französische Philosoph **René Descartes** (1596–1650). Descartes vertrat eine zu seiner Zeit völlig neue und radikale Idee: Der menschliche Körper gleicht einer „lebendigen Maschine“, die wissenschaftlich verstanden werden kann – indem man Naturgesetze durch empirische Beobachtungen entdeckt.

Forscher aus der Tradition, die auf Descartes zurückgeht, nennen sich heute *Neurowissenschaftler*. In heutigen Tagen ist die **Neurowissenschaft** eines der am schnellsten wachsenden Forschungsgebiete. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels widmen wir uns der Analyse und dem Verstehen derjenigen Prozesse, durch die Informationen von unseren Sinnesorganen mithilfe von Nervenimpulsen letztlich durch Körper und Gehirn transportiert und kommuniziert werden. Wir behandeln in diesem Abschnitt zunächst die Eigenschaften des Neurons, der Basiseinheit des Nervensystems.

3.2.1 Das Neuron

Ein **Neuron** ist eine Zelle, die darauf spezialisiert ist, Informationen zu empfangen, zu verarbeiten und/oder an andere Zellen innerhalb des Körpers weiterzuleiten. Neurone besitzen unterschiedliche Formen, Größen, chemische Zusammensetzungen und Funktionen – über 200 verschiedene Arten wurden in Gehirnen von Säugetieren identifiziert –, aber alle Neurone besitzen dieselbe grundlegende Struktur (► Abbildung 3.5). Es gibt zwischen 100 Milliarden und einer Billion Neurone in unserem Gehirn.

Neurone erhalten typischerweise an einem Ende Informationen und senden am anderen Ende Botschaften aus. Der Teil der Zelle, der ankommende Signale erhält, ist eine Anzahl von verästelten Fasern außerhalb des Zellkörpers, die man **Dendriten** nennt. Die Hauptaufgabe der Dendriten besteht darin, Erregung von Sinnesrezeptoren oder anderen Zellen zu empfangen. Der Zellkörper, oder das **Soma**, enthält den Zellkern



Ein Neuron, das Kontraktionen im menschlichen Darm beeinflusst. Welche Rollen spielen Dendriten, Soma und Axone bei der Nervenübertragung?

(Nukleus) und das Zytoplasma, das die Zelle am Leben erhält. Das Soma integriert Informationen über die Stimulation, die von den Dendriten empfangen wird (oder in manchen Fällen direkt von einem anderen Neuron), und leitet sie über eine einzelne, ausgedehnte Faser, das **Axon**, weiter. Das Axon wiederum leitet diese Informationen seiner Länge nach weiter – die im Rückenmark über einen Meter und im Gehirn weniger als einen Millimeter betragen kann. Am anderen Ende des Axons befinden sich verdickte, knollenähn-

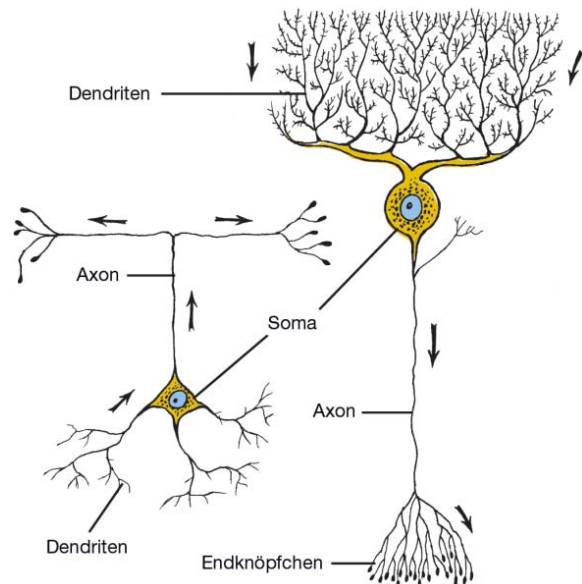


Abbildung 3.5: Zwei Arten von Neuronen. Man beachte die Unterschiede in Form und Dendritenverzweigungen. Die Pfeile zeigen die Richtung an, in die Informationen fließen. Beide Zellen sind Formen von Interneuronen.

liche Strukturen, die **Endknöpfchen**, über die das Neuron angrenzende Drüsen, Muskeln oder andere Neurone stimulieren kann. Neurone übertragen normalerweise Informationen nur in eine Richtung: von den Dendriten über das Soma zum Axon bis hin zu den Endknöpfchen (► Abbildung 3.6).

Es gibt drei Hauptarten von Neuronen. **Sensorische Neurone** übermitteln Botschaften von Sinnesrezeptorzellen *hin* zum Zentralnervensystem. Rezeptorzellen sind hoch spezialisierte Zellen, die beispielsweise auf Licht, Geräusche oder Körperpositionen reagieren. **Motorneurone** leiten Botschaften *weg* von Zentralnervensystem hin zu den Muskeln und Drüsen. Die Mehrzahl der Neurone im Gehirn sind **Interneurone**, die Botschaften von sensorischen Neuronen an andere Interneurone oder Motorneurone weiterleiten. Auf jedes Motorneuron im Körper kommen etwa 5.000 Interneurone im riesigen Schaltnetz, welches das Verarbeitungssystem des Gehirns bildet.

Wie diese drei Arten von Neuronen zusammenarbeiten, sieht man am Beispiel des Schmerzrückzugsreflexes (► Abbildung 3.7). Werden Schmerzrezeptoren nahe der Hautoberfläche mit einem scharfen Gegenstand stimuliert, senden sie Botschaften über die sensorischen Neurone zu einem Interneuron im Rückenmark. Das Interneuron reagiert, indem es Motorneurone stimuliert, die wiederum Muskeln im entsprechenden Körperteil aktivieren, sich von dem Schmerz erzeugenden Gegenstand zurückzuziehen. Erst *nach* dieser Abfolge von neuronalen Ereignissen und dem Rückzug des Körpers vom stimulierenden Objekt erhält das Gehirn Informationen über diese Si-

tuation. In Fällen, wo das Überleben von schnellem Handeln abhängt, nehmen wir den Schmerz erst wahr, wenn wir körperlich auf die Gefahr reagiert haben. Natürlich werden dann die Informationen über den Vorfall im Gedächtnissystem gespeichert, so dass wir beim nächsten Mal das potenziell gefährliche Objekt meiden, bevor es uns verletzen kann.

Das weite Netz von Neuronen im Gehirn ist von ungefähr der fünf- bis zehnfachen Anzahl von **Gliazellen** (Stützzellen) durchsetzt. Das Wort *Glia* kommt vom griechischen Wort für *Klebstoff*, was auf eine der Hauptaufgaben dieser Zellen hinweist: Sie halten Neurone an ihrem Platz. Bei Wirbeltieren haben Gliazellen einige weitere wichtige Funktionen. Eine erste Funktion erfüllen sie während der Entwicklung. Gliazellen helfen neu gebildeten Neuronen, den richtigen Ort im Gehirn zu finden. Eine zweite Funktion liegt im Bereich des Körperhaushalts. Wenn Neurone geschädigt sind und absterben, vermehren sich die Gliazellen in diesem Bereich und entsorgen das übrig gebliebene zelluläre Abfallmaterial; sie können zudem überschüssige Neurotransmitter und andere Substanzen aus dem synaptischen Spalt zwischen Neuronen aufnehmen. Eine dritte Funktion ist die der Isolierung. Gliazellen bilden eine Hülle, die **Myelinscheide**, um einige Arten von Axonen. Diese Isolierungen aus Fett erhöhen die Geschwindigkeit der Übertragung von Nervensignalen ganz enorm. Eine vierte Funktion der Gliazellen besteht darin zu verhindern, dass giftige Substanzen im Blut die empfindlichen Zellen im Gehirn erreichen. Spezialisierte Gliazellen, so genannte Astrozyten, bilden die **Blut-Hirn-Schranke**, indem sie die Blutgefäße

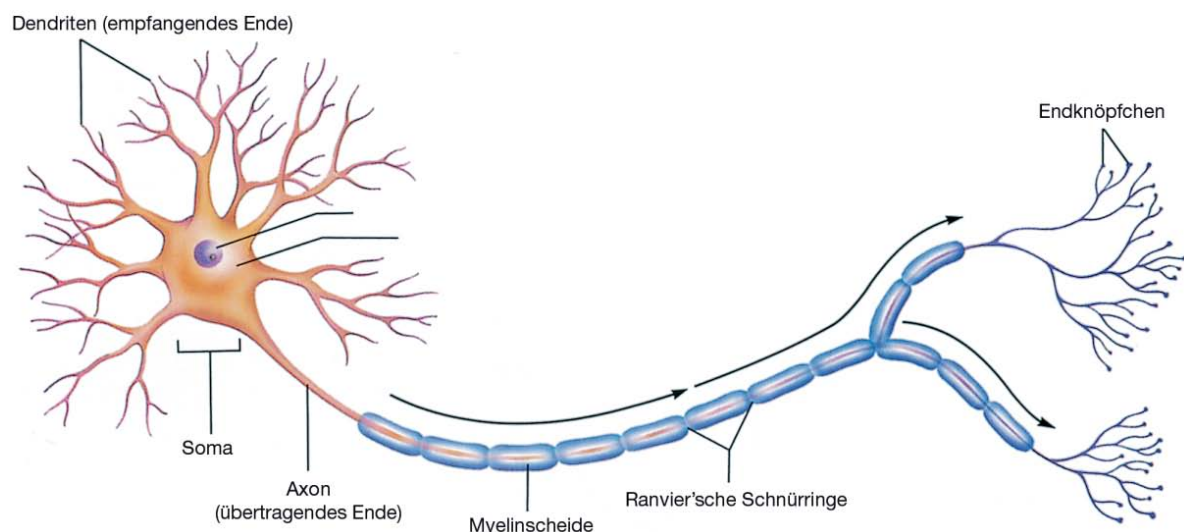


Abbildung 3.6: Die Hauptstrukturen des Neurons. Das Neuron erhält über seine Dendriten Nervenimpulse. Es sendet dann die Nervenimpulse durch sein Axon zu den Endknöpfchen, wo Neurotransmitter zur Stimulation anderer Neurone freigesetzt werden.

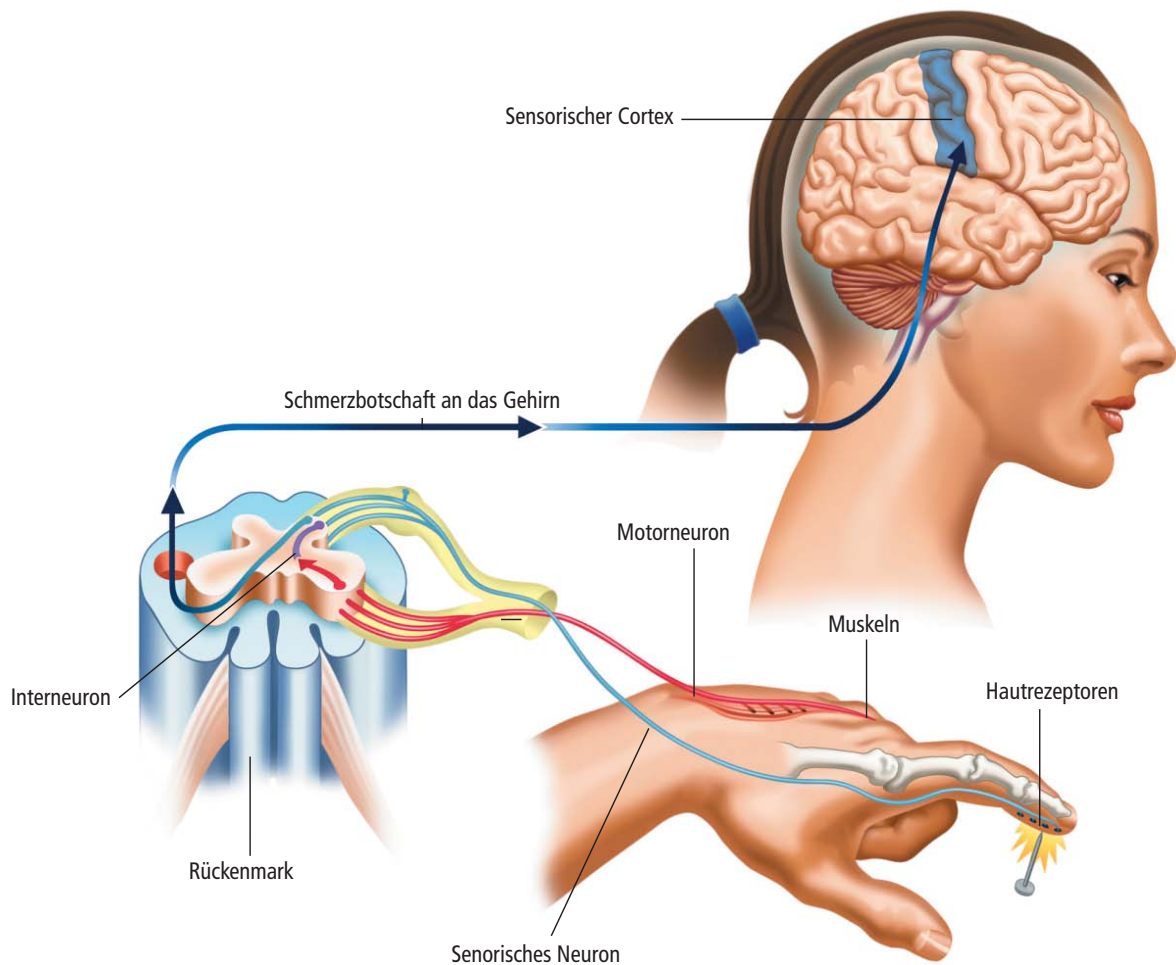


Abbildung 3.7: Der Schmerzrückzugsreflex. Der hier gezeigte Schmerzrückzugsreflex benötigt nur drei Neurone: ein sensorisches, ein motorisches und ein Interneuron.

im Gehirn mit einer beständigen Hülle aus Fett umgeben. Nicht fettlösliche Substanzen können diese Barriere nicht überwinden, und weil viele Gifte und andere gefährliche Substanzen nicht fettlöslich sind, können sie diese Barriere nicht durchdringen und ins Hirn gelangen. Schließlich gelangten Neurowissenschaftler zur Ansicht, dass Gliazellen wohl auch bei der neuronalen Kommunikation eine aktive Rolle spielen, indem sie die Konzentration von Ionen beeinflussen, welche die Übertragung von Nervenimpulsen ermöglicht (Fields & Stevens-Graham, 2002).

3.2.2 Aktionspotenziale

Bis jetzt haben wir eher unspezifisch davon gesprochen, dass Neurone „Botschaften aussenden“ oder sich gegenseitig „stimulieren“. Nun ist es Zeit, die Arten der elektro-chemischen Signale etwas formeller

zu beschreiben, die vom Nervensystem zur Verarbeitung und Übertragung von Informationen eingesetzt werden. Es sind diese Signale, welche die Basis all dessen darstellen, was wir wissen, fühlen, wünschen und schaffen.

Für jedes Neuron lautet die grundlegende Frage: Soll es zu einem bestimmten Zeitpunkt *feuern* – eine Reaktion erzeugen – oder nicht? Neurone treffen sozusagen diese Entscheidung, indem sie die Informationen zusammenfassen, die an ihren Dendriten oder am Soma (Zellkörper) ankommen, und bestimmen, ob dieser Input überwiegend „feuern“ oder „nicht feuern“ sagt. Formaler ausgedrückt, erhält jedes Neuron eine Bilanz aus **exzitatorischen** – Feuern! – und **inhibitorischen** – Nicht feuern! – **Inputs**. Das richtige Muster von exzitatorischen Inputs zur rechten Zeit oder am rechten Ort führt bei einem Neuron zur Erzeugung eines so genannten *Aktionspotenzials*: Das Neuron feuert.

Die biochemische Basis der Aktionspotenziale

Um zu erklären, wie ein **Aktionspotenzial** funktioniert, müssen wir die biochemische Umgebung beschreiben, in der Neurone die eintreffenden Informationen miteinander verknüpfen. Jegliche neuronale Kommunikation wird durch den Fluss elektrisch geladener Teilchen, der *Ionen*, durch die Membran des Neurons erzeugt eine dünne „Haut“, die das Zellinnere von der äußeren Umgebung trennt. Stellen wir uns eine Nervenfaser als Makkaroni vor, die mit Salzwasser gefüllt sind und in einem salzigen Sud schwimmen. Sowohl der Sud als auch das Wasser in den Makkaroni enthalten Ionen – Natrium- (Na^+), Chlor- (Cl^-), Kalzium- (Ca^{2+}) und Kalium- (K^+) Atome –, die entweder positiv (+) oder negativ (–) geladen sind (► Abbildung 3.8). Die Membran oder die Oberfläche der Makkaroni spielt eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, die Bestandteile der beiden Flüssigkeiten in einem geeigneten Gleichgewicht zu halten. Ist eine Zelle nicht aktiv oder in einem *Ruhezustand*, befinden sich etwa zehnmal mehr Kalium-Ionen innerhalb der Zelle als Natrium-Ionen außerhalb. Die Membran ist keine perfekte Barriere, sie „leckt“ ein bisschen. Einige Natrium-Ionen schlüpfen in die Zelle, während einige Kalium-Ionen hinausschlüpfen. Um dies zu korrigieren, stellt die Natur Transportmechanismen innerhalb der Membran bereit, die Natrium hinaus- und Kalium hineinpumpen. Bei erfolgreicher Funktion dieser Pumpen ist die Flüssigkeit innerhalb des Neurons im Vergleich zur Flüssigkeit außerhalb des Neurons leicht negativ geladen (70 mV). Dies bedeutet, dass die Flüssigkeit innerhalb der Zelle hinsichtlich der Flüssigkeit außerhalb der Zelle *polarisiert* ist. Diese leichte Polarisierung ist das **Ruhepotenzial**. Das Ruhepotenzial stellt den elektrochemischen Kontext bereit, in dem eine Nervenzelle ein Aktionspotenzial erzeugen kann.

Die Nervenzellen leiten den Übergang eines Ruhepotenzials in ein Aktionspotenzial als Reaktion auf das Muster inhibitorischer und exzitatorischer Inputs ein. Jede Art eines Inputs beeinflusst die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Bilanz der Ionen innerhalb und außerhalb der Zelle ändern wird. Sie verursachen Veränderungen in den Funktionen der **Ionenkanäle**, den erregbaren Teilen der Zellmembran, die bestimmte Ionen selektiv hinaus- und hineinströmen lassen. Inhibitorische Inputs lassen die Ionenkanäle härter arbeiten, um die negative Ladung im Zellinneren beizubehalten – dies hält die Zelle vom Feuern ab. Exzitatorische Inputs verursachen, dass die Ionenkanäle Natrium einströmen lassen – die Zelle kann feuern. Weil Natrium-Ionen positiv geladen sind, kann

ihr Einströmen die relative Bilanz positiver und negativer Ladungen über die Zellmembran hinweg verändern. Ein Aktionspotenzial beginnt, wenn die exzitatorischen Inputs im Vergleich zu den inhibitorischen genügend stark sind, um die Zelle zunächst von -70 mV auf -55 mV zu *depolarisieren*: Genügend Natrium ist in die Zelle eingedrungen, um diese Veränderung hervorzurufen.

Sobald das Aktionspotenzial beginnt, strömt Natrium ins Neuron. Infolgedessen wird das Innere des Neurons im Vergleich zur Umgebung positiv geladen; das bedeutet, das Neuron ist vollständig depolarisiert. Ein Dominoeffekt treibt nun das Aktionspotenzial das Axon entlang. Die Spitze der Depolarisation öffnet die Ionenkanäle in den angrenzenden Regionen des Axons und lässt Natrium einströmen. So wandert das Signal durch sukzessive Depolarisation das Axon entlang (Abbildung 3.8).

Wie kehrt das Neuron zu seinem ursprünglichen Ruhezustand der Polarisation zurück, nachdem es gefeuert hat? Wird das Innere des Neurons positiv, schließen sich die Kanäle, die Natrium einströmen ließen, und die Kanäle, die Kalium einströmen lassen, öffnen sich. Das Ausströmen von Kalium-Ionen stellt die negative Ladung des Neurons wieder her. Sogar noch während sich das Signal dem entfernten Ende des Axons nähert, können die Teile der Zelle, in denen das Aktionspotenzial seinen Anfang nahm, in ihren Ruhezustand zurückgekehrt sein, so dass sie zur nächsten Stimulation bereit sind.

Eigenschaften des Aktionspotenzials

Die biochemische Art und Weise, wie das Aktionspotenzial übertragen wird, führt zu diversen wichtigen Eigenschaften. Das Aktionspotenzial gehorcht dem **Alles-oder-nichts-Gesetz**: Das Ausmaß des Aktionspotenzials hängt nicht von der steigenden Intensität der Stimulationen über einen Schwellenwert hinaus ab. Erreicht die Summe der exzitatorischen Inputs einmal die Schwelle, wird ein gleichförmiges Aktionspotenzial generiert. Wird die Schwelle nicht erreicht, ereignet sich kein Aktionspotenzial. Eine weitere Folge dieser Alles-oder-nichts-Eigenschaft ist, dass sich die Größe des Aktionspotenzials über die Länge des Axons hinweg nicht verringert. In diesem Sinne bezeichnet man das Aktionspotenzial als *selbst-propagierend* (sich selbst fortpflanzend); einmal gestartet, bedarf es keiner Stimulation von außen, um sich in Bewegung zu halten. Es gleicht der brennenden Zündschnur eines Feuerwerkskörpers.

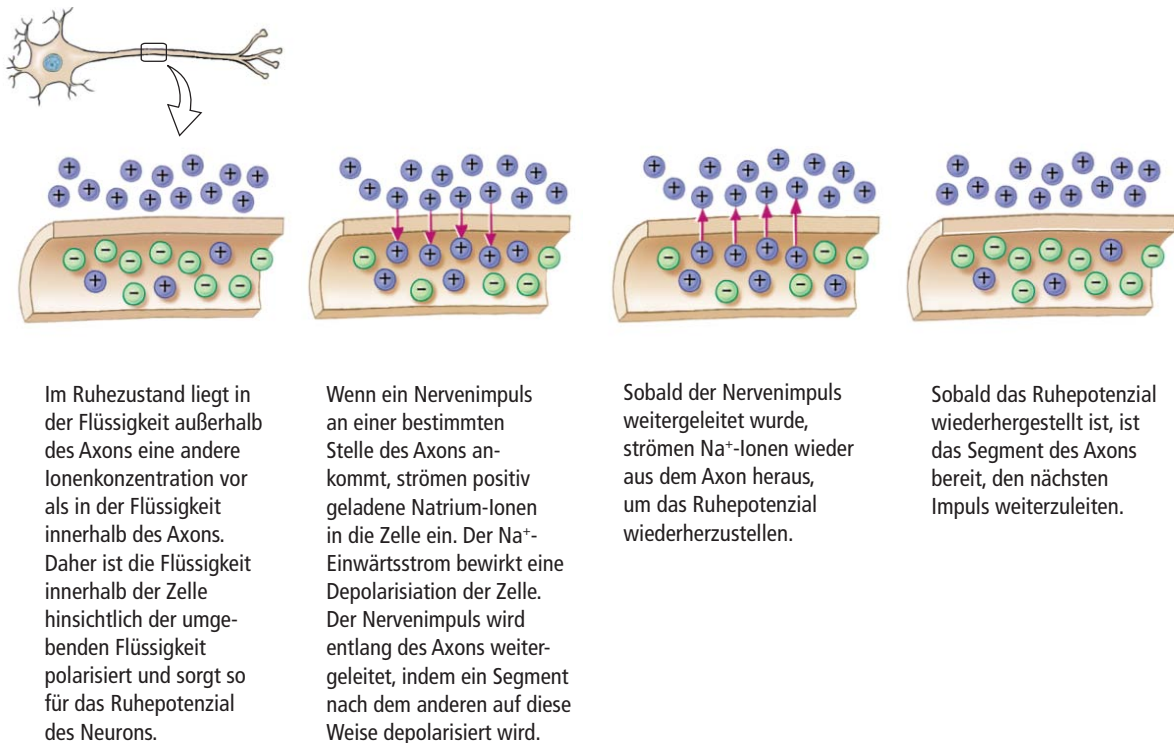


Abbildung 3.8: Die biochemische Basis des Aktionspotenzials. Aktionspotenziale funktionieren über die unterschiedliche elektrische Ladung von Ionen innerhalb und außerhalb von Axonen (nach Lefton & Brannon, 2003).

Unterschiedliche Neurone leiten Aktionspotenziale entlang ihrer Axone mit unterschiedlicher Geschwindigkeit; die schnellsten senden Signale, die sich mit 200 Metern pro Sekunde bewegen, die langsamsten schaffen nur 10 Zentimeter pro Sekunde. Die Axone der schnelleren Neurone sind mit einer eng umwickelten Myelinscheide umgeben – die, wie wir weiter oben schon erklärt haben, aus Gliazellen besteht. So ähnelt dieser Teil des Neurons kleinen Röhrrchen auf einer Schnur. Die schmalen Unterbrechungen zwischen den Röhrrchen werden *Ranvier'sche Schnürringe* genannt (siehe Abbildung 3.6). In Neuronen mit myelinisierten Axonen hüpfet das Aktionspotenzial buchstäblich von einem Schnürring zum anderen – das spart Zeit und Energie, die zum Öffnen und Schließen der Ionenkanäle an jeder Stelle des Axons gebraucht wird. Eine Schädigung der Myelinscheide wirft die genaue zeitliche Planung des Aktionspotenzials durcheinander und verursacht schwerwiegende Probleme. Multiple Sklerose (MS) ist eine verheerende Krankheit, verursacht durch die Degeneration der Myelinscheide. Sie ist durch Doppelsichtigkeit, Zittern und schließlich Lähmung gekennzeichnet. Bei MS greifen spezialisierte Zellen des Immunsystems des Körpers myelinisierte Neurone an, legen das Axon

frei und stören die normale synaptische Übertragung (Joyce, 1990).

Nachdem ein Aktionspotenzial ein Segment des Axons passiert hat, befindet sich diese Region des Neurons in der **Refraktärphase** (► Abbildung 3.9). Während der *absoluten Refraktärphase* kann eine neue Stimulation, gleich wie intensiv, kein weiteres Aktionspotenzial hervorrufen; während der *relativen Refraktärphase* wird das Neuron nur in Reaktion auf einen Stimulus feuern, der stärker ist als üblicherweise nötig. Haben Sie schon einmal versucht, die Toilettenspülung zu betätigen, während sich der Spülkasten wieder füllt? Eine gewisse Wassermenge muss vorhanden sein, um erneut zu spülen. Damit ein Neuron ein weiteres Aktionspotenzial generieren kann, muss es sich in ähnlicher Weise „zurückstellen“ und auf eine überschwellige Stimulation warten. Die Refraktärphase garantiert zum Teil, dass sich das Aktionspotenzial nur in eine Richtung entlang des Axons bewegt: Es kann sich nicht rückwärts ausbreiten, weil sich „frühere“ Teile des Axons in der Refraktärphase befinden.

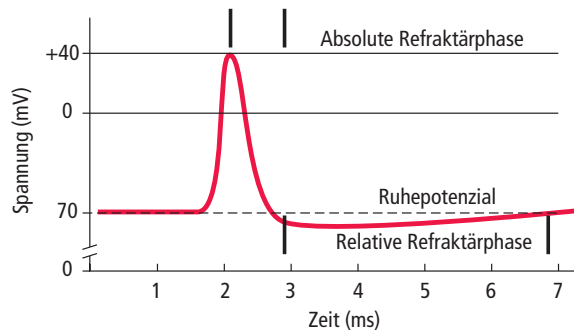


Abbildung 3.9: Zeitliche Darstellung der Veränderungen elektrischer Ladung im Neuron während eines Aktionspotenzials. Natrium-Ionen, die ins Neuron eindringen, verändern dessen elektrisches Potenzial von leicht negativ während des Ruhezustands zu leicht positiv während der Depolarisation. Ist das Neuron depolarisiert, folgt eine kurzzeitige Refraktärphase, während der eine weitere Stimulation kein weiteres Aktionspotenzial hervorruft. Das nächste Aktionspotenzial kann erst dann wieder ausgelöst werden, wenn das Gleichgewicht der Ionen zwischen dem Äußeren und Inneren der Zelle wiederhergestellt ist.

3.2.3 Synaptische Übertragung

Beendet das Aktionspotenzial seinen „sprunghaften Weg“ entlang des Axons am Endknöpfchen, so muss es seine Information dem nächsten Neuron übermitteln. Niemals jedoch berühren sich zwei Neurone: Sie treffen sich an einer **Synapse**, mit einem schmalen Spalt zwischen der *präsynaptischen Membran* (dem Endknöpfchen des sendenden Neurons) und der *postsynaptischen Membran* (der Oberfläche eines Dendriten oder Somas eines empfangenden Neurons). Wenn ein Aktionspotenzial das Endknöpfchen erreicht, setzt es eine Reihe von Ereignissen in Gang: die **synaptische Übertragung**, die Übermittlung von Informationen von einem Neuron zu einem anderen über den synaptischen Spalt hinweg (► Abbildung 3.10). Synaptische Übertragung beginnt, wenn das Eintreffen des Aktionspotenzials am Endknöpfchen kleine runde Pakete, so genannte *synaptische Vesikel*, dazu anregt, zur inneren Membran des Endknöpfchens zu wandern und sich daran anzuheften. In jedem Vesikel befinden sich **Neurotransmitter**, biochemische Substanzen, die andere Neurone stimulieren. Das Aktionspotenzial verursacht auch, dass sich die Ionenkanäle öffnen und Kalzium-Ionen in das Endknöpfchen einströmen. Das Einströmen der Kalzium-Ionen verursacht das Platzen der synaptischen Vesikel und die Freisetzung der darin enthaltenen Neurotransmitter. Ist das synaptische Vesikel geplatzt, werden die Neurotransmitter schnell über den *synaptischen Spalt* zur

postsynaptischen Membran gestreut. Um die synaptische Übertragung zu vervollständigen, binden sich die Neurotransmitter an *Rezeptormoleküle*, die in der postsynaptischen Membran eingebettet sind.

Die Neurotransmitter binden sich unter zwei Bedingungen an die Rezeptormoleküle. Zum einen können keine anderen Neurotransmitter oder andere chemische Substanzen an den Rezeptormolekülen festmachen. Zum anderen muss die Form der Neurotransmitter zur Form der Rezeptormoleküle passen – so genau, wie ein Schlüssel in ein Schlüsselloch passt. Trifft keine der beiden Bedingungen zu, kann sich der Neurotransmitter nicht an das Rezeptormolekül heften. Das bedeutet, dass er die postsynaptische Membran nicht stimulieren kann. Bindet der Neurotransmitter an das Rezeptormolekül an, kann es diesem nächsten Neuron Informationen zum „feuern“ oder „nicht feuern“ liefern. Hat der Neurotransmitter seine Aufgabe erfüllt, löst er sich wieder vom Rezeptormolekül und geht in den synaptischen Spalt zurück. Hier wird er entweder durch Enzyme aufgespaltet oder vom präsynaptischen Endknöpfchen wieder aufgenommen, um schnell wieder eingesetzt zu werden.

In Abhängigkeit vom Rezeptormolekül hat ein Neurotransmitter einen exzitatorischen oder inhibitorischen Effekt. So kann derselbe Neurotransmitter an einer Synapse exzitatorisch, an einer anderen jedoch inhibitorisch wirken. Jedes Neuron integriert die Informationen, die es an den Synapsen mit 1.000 bis 10.000 anderen Neuronen erhält, um zu entscheiden, ob es ein weiteres Aktionspotenzial initiieren soll. Es ist die Integration dieser Tausenden von inhibitorischen und exzitatorischen Inputs, die es den Alles-oder-Nichts-Aktionspotenzialen erlaubt, die Grundlage allen menschlichen Erlebens bereitzustellen.

Vielleicht wundern Sie sich, warum wir so tief in die Materie des Nervensystems eingedrungen sind. Schließlich ist das ein Psychologiebuch, und Psychologie befasst sich mit Verhalten, Denken und Emotion. Tatsächlich sind die Synapsen das biologische Medium, in dem sich all diese Aktivitäten ereignen. Eine Veränderung der normalen Aktivität der Synapse würde eine Veränderung im Verhalten, Denken und Fühlen der Menschen nach sich ziehen. Das Verstehen der Funktionsweise der Synapse führte zu gewaltigen Fortschritten im Verstehen von Lernen, Gedächtnis, Emotion, psychischen Störungen, Drogenabhängigkeit und ganz allgemein von der chemischen Formel für geistige Gesundheit. Sie werden das Wissen, das Sie sich in diesem Kapitel angeeignet haben, das gesamte Buch hindurch benötigen.

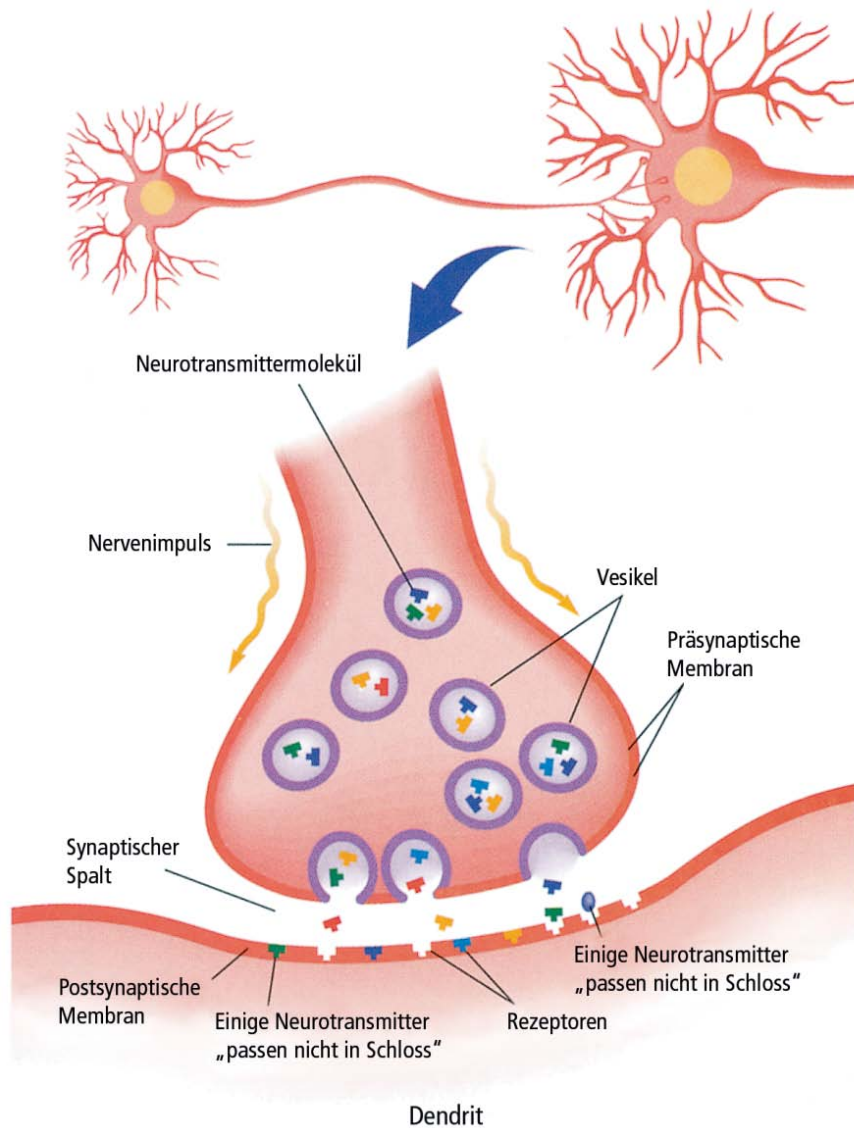


Abbildung 3.10: Synaptische Übertragung. Das Aktionspotenzial im präsynaptischen Neuron verursacht, dass Neurotransmitter in den synaptischen Spalt entlassen werden. Ist der Spalt überwunden, stimulieren sie Rezeptormoleküle, die in der Membran des postsynaptischen Neurons eingebettet sind. Innerhalb einer Zelle kann es mehrere Neurotransmitter geben.

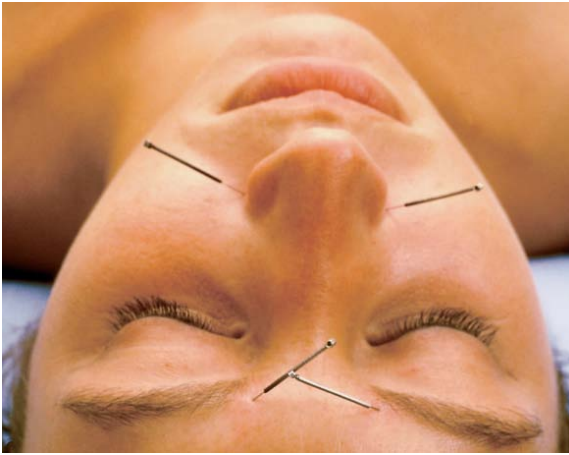
3.2.4 Neurotransmitter und ihre Funktionen

Wir kennen oder vermuten mehr als 60 unterschiedliche chemische Substanzen, die als Neurotransmitter im Gehirn fungieren. Die Neurotransmitter, die am intensivsten erforscht werden, weisen einige technische Kriterien auf. Jeder wird im präsynaptischen Endknöpfchen erzeugt und freigesetzt, wenn ein Aktionspotenzial das Ende des Axons erreicht. Das Vorhandensein des Neurotransmitters im synaptischen Spalt erzeugt eine biologische Reaktion in der postsynaptischen Membran, und wenn seine Ausschüttung verhindert wird, kann keine nachfolgende Reaktion eintreten. Um die Effekte unterschiedlicher

Neurotransmitter auf die Steuerung des Verhaltens aufzuzeigen, werden wir einige Neurotransmitter diskutieren, die sich für das alltägliche Funktionieren des Gehirns als wichtig herausgestellt haben. Diese kurze Diskussion wird auch dazu beitragen zu verstehen, wie viel dabei schief gehen kann.

Azetylcholin

Azetylcholin findet man im zentralen und peripheren Nervensystem. Der Gedächtnisverlust bei Alzheimer-Patienten, einer degenerativen Erkrankung, die bei älteren Menschen zunehmend häufiger auftritt, wird vermutlich durch den Abbau von Neuronen verursacht, die Azetylcholin absondern. Azetylcholin wirkt



Warum erfahren Patienten Schmerzlinderung durch Akupunktur?

auch an Verbindungen zwischen Nerven und Muskeln exzitatorisch, wo es Muskelkontraktionen verursacht. Eine Reihe von Giften beeinflusst die synaptische Tätigkeit des Acetylcholins. Botulinumtoxin zum Beispiel, das oft in Lebensmitteln vorkommt, die falsch aufbewahrt wurden, vergiftet einen Menschen, indem es die Freisetzung von Acetylcholin im Atmungssystem verhindert. Diese Vergiftungserscheinung, der *Botulismus*, kann zum Tode durch Erstickten führen. Curare, ein Gift, das Amazonasindianer auf der Spitze der Pfeile ihrer Blasrohre anbringen, lähmt die Atemmuskeln, weil es wichtige Acetylcholinrezeptoren besetzt und die normale Aktivität des Transmitters unmöglich macht.

GABA

GABA (Gammaaminobuttersäure) ist der bekannteste inhibitorische Neurotransmitter im Gehirn. *GABA* kann als Botenstoff in etwa einem Drittel aller Synapsen des Gehirns eingesetzt werden. Neurone, die auf *GABA* ansprechen, finden sich in besonders hoher Konzentration in Hirnregionen wie dem Thalamus, dem Hypothalamus und im Okzipitallappen (siehe Seite 93–94). *GABA* hat sich bei einigen Formen der Psychopathologie als wichtig herausgestellt, da es neuronale Aktivität hemmt; sinkt die Konzentration dieses Neurotransmitters im Hirn, empfindet man diese gesteigerte neuronale Aktivität als ein Gefühl der Angst. Angststörungen werden oft mit *Benzodiazepinen* wie *Valium* oder *Xanax* behandelt, welche die *GABA*-Aktivität steigern (Ballenger, 1999). Benzodiazepine binden nicht direkt an *GABA*-Rezeptoren. Vielmehr bewirken sie, dass sich *GABA* selbst auf effektivere Weise an die postsynaptischen Rezeptormoleküle binden kann.

Dopamin, Norepinephrin und Serotonin

Katecholamine sind eine Klasse von chemischen Substanzen, zu der zwei wichtige Neurotransmitter gehören: *Dopamin* und *Norepinephrin*. Beiden kommt bei psychischen Störungen wie affektiven Störungen und Schizophrenie eine entscheidende Rolle zu. *Norepinephrin* scheint an einigen Formen von Depression beteiligt zu sein: Substanzen, welche die Konzentration dieses Neurotransmitters im Gehirn erhöhen, heben die Stimmung und lindern die Depression. Umgekehrt fand man bei Schizophrenen einen erhöhten Dopaminspiegel. Man kann Menschen mit dieser Störung durch Medikamente behandeln, die den Dopaminspiegel im Gehirn senken. Als die medikamentöse Therapie entstand, tauchte ein interessantes Problem auf. Hohe Dosen der Substanz zur Schizophreniebehandlung riefen Symptome des Parkinson-Syndroms hervor, einer fortschreitenden und schließlich tödlichen Krankheit, die eine Störung der motorischen Funktionen mit sich bringt. (Das Parkinson-Syndrom wird durch die Degeneration von Neuronen verursacht, die den größten Anteil des Dopamins im Gehirn erzeugen.) Dieser Befund führte zu Untersuchungen, welche die medikamentöse Behandlung von Schizophrenie verbesserten, und zur Erforschung von Substanzen, die zur Behandlung des Parkinson-Syndroms eingesetzt werden können.



Ungefähr 1,5 Millionen Menschen in den Vereinigten Staaten, darunter auch der Schauspieler Michael J. Fox, leiden an der Parkinson'schen Krankheit. Die Erforschung des Neurotransmitters Dopamin hat zu Fortschritten im Verständnis dieser Krankheit geführt. Wie kann neurologische Grundlagenforschung zu verbesserten Behandlungsmöglichkeiten führen?

Alle Neurone, die *Serotonin* produzieren, befinden sich im Hirnstamm (siehe Seite 92), der für das Erregungsniveau und viele autonome Prozesse wichtig ist. Die halluzinogene Droge LSD (Lysergsäure-Diäthylamid) erreicht ihre Wirkung, indem sie die Wirkweise der Serotonin-Neurone unterdrückt. Diese Serotonin-Neurone hemmen normalerweise andere Neurone. Der Mangel an Hemmung aufgrund von LSD erzeugt jedoch lebhaft und bizarre Sinneseindrücke, die zum Teil einige Stunden andauern können. Viele Antidepressiva (zum Beispiel Fluctin oder Zoloft) erhöhen die Wirkung von Serotonin, indem sie die Wiederaufnahme aus dem synaptischen Spalt verhindern (Barondes, 1994).

Endorphine

Endorphine sind eine Gruppe von Stoffen, die gewöhnlich als Neuromodulatoren klassifiziert werden. Ein **Neuromodulator** ist jedwede Substanz, welche die Aktivität des postsynaptischen Neurons modifiziert oder moduliert. Endorphine (kurz für *endogene Morphine*) sind wichtig bei der Kontrolle emotionalen Verhaltens (Angst, Furcht, Anspannung, Freude) und beim Schmerzempfinden – Stoffe wie Opium und Morphine binden an denselben Rezeptoren im Hirn. Endorphine werden aufgrund ihrer Eigenschaften, Freude und Schmerz zu kontrollieren, als „Schlüssel zum Paradies“ bezeichnet. Forscher haben die Möglichkeit untersucht, dass Endorphine zumindest teilweise für die Schmerz reduzierenden Effekte der Akupunktur und von Placebos verantwortlich sind (Benedetti et al., 2005; Han, 2004). Solche Tests beziehen sich auf die Substanz *Naloxon*, deren einziger bekannter Effekt darin liegt, Morphine und Endorphine an der Bindung an Rezeptoren zu hindern. Jegliche Behandlung, die Schmerzen durch die Stimulation der Endorphinausschüttung lindert, wird wirkungslos, wenn Naloxon verabreicht wird. Mit der Injektion von Naloxon verlieren Akupunktur und Placebos tatsächlich ihre Wirkung – was den Schluss zulässt, dass hier normalerweise Endorphine am Werke sind.

Forscher dokumentierten zudem, dass Gase wie *Kohlenmonoxid* und *Stickstoff* als Neurotransmitter fungieren können (Barinaga, 1993). Am erstaunlichsten an dieser neuen Klasse von Neurotransmittern ist, dass sie vielen der normalen Erwartungen bezüglich der synaptischen Übertragung widersprechen. Statt sich zum Beispiel an Rezeptormoleküle zu binden, wie das andere Neurotransmitter tun, scheinen diese gasförmigen Neurotransmitter die äußere Membran



Wie kann das Studium des Gehirns beim Verständnis der menschlichen Psyche helfen?

der Rezeptorzelle direkt zu passieren. Diese überraschende Entdeckung sollte Ihren Eindruck verstärken, dass das Hirn noch viele Geheimnisse in sich birgt, die es zu enthüllen gilt.

ZWISCHENBILANZ

- 1 Welchem Muster folgt der Informationsfluss durch die wichtigsten Teile jedes Neurons?
- 2 Was ist das „Alles-oder-nichts“-Gesetz?
- 3 Wie werden Neurotransmitter von einem Neuron in das nächste übertragen?
- 4 Welche chemische Substanz ist der häufigste inhibitorische Neurotransmitter im Gehirn?

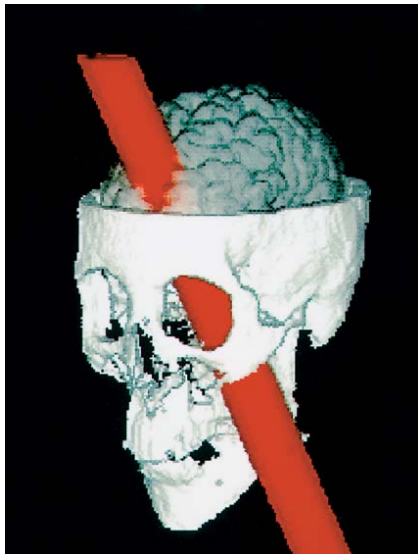
Biologie und Verhalten

3.3

Wir wissen jetzt, mit welchen grundlegenden Mechanismen Nervenzellen mit einander kommunizieren. Es ist an der Zeit, diese Neuronen zu größeren Systemen zu kombinieren, die unseren Körper und unseren Geist steuern. Wir beginnen diese Darstellung mit einem Überblick über die Verfahren, mit welchen die Forschung neue Entdeckungen beschleunigen kann. Danach wird das Nervensystem im Überblick beschrieben, gefolgt von einem detaillierteren Blick auf das Gehirn selbst. Weiterhin betrachten wir die Tätigkeit des endokrinen Systems, eines zweiten biologischen Kontrollsystems, das mit dem Nervensystem und dem Gehirn zusammenarbeitet. Zum Schluss beschreiben wir, wie Lebenserfahrungen unser Gehirn ständig verändern.

3.3.1 Ein Blick ins Gehirn

Neurowissenschaftler versuchen, die Arbeitsweise des Gehirns auf unterschiedlichen Ebenen zu verstehen – angefangen bei der Arbeitsweise von großen Strukturen, die mit bloßem Auge erkennbar sind, bis hin zu Eigenschaften von einzelnen Nervenzellen, die nur mithilfe starker Mikroskope sichtbar sind. Die Untersuchungsebene bestimmt die Methoden, die Wissenschaftler nutzen. An dieser Stelle behandeln wir die gebräuchlichsten Verfahren, mit denen Funktionen und Verhaltensweisen mit bestimmten Gehirnregionen in Verbindung gebracht werden.



Der Schädel von Phineas Gage wird in der Sammlung des *Warren Anatomical Museum* der *Harvard University Medical School* aufbewahrt. Warum waren die Ärzte von Gages Persönlichkeitsveränderungen so fasziniert?

Eingriffe in das Gehirn

Verschiedene Forschungsmethoden in der Neurowissenschaft bringen einen direkten Eingriff in Hirnstrukturen mit sich. Diese Methoden wurzeln historisch in Fällen wie jenem von Phineas Gage. Am 13. September des Jahres 1848 erlitt Phineas P. Gage, ein Vorarbeiter beim Bau einer Eisenbahnstrecke, einen Unfall: Eine ca. 1,10 Meter lange Eisenstange durchstieß aufgrund einer unerwarteten Explosion seinen Schädel. Gages körperliche Beeinträchtigung war erstaunlich gering: Er büßte die Sehfähigkeit auf dem linken Auge ein, und seine linke Gesichtshälfte war teilweise gelähmt, aber Haltung, Bewegung und Sprache waren intakt. Doch psychisch war er ein anderer Mensch, wie aus dem Bericht seines Arztes hervorging:

Das Äquilibrium oder Gleichgewicht zwischen seinen intellektuellen Fähigkeiten und seinen animalischen Trieben scheint zerstört zu sein. Er ist bisweilen launisch, respektlos und gibt sich manchmal hemmungslos seinen niederen Trieben hin (was früher nicht zu seinen Eigenschaften zählte) und zeigt wenig Respekt vor seinen Mitmenschen, er reagiert ungehalten auf Einschränkungen oder Ratschläge, wenn sie seinen Wünschen entgegenstehen, ist manchmal hartnäckig und halsstarrig, er ist launisch und wankelmütig, er denkt sich Pläne für die Zukunft aus, die ebenso schnell entworfen werden, wie sie wieder verworfen werden, zugunsten anderer, scheinbar durchführbarer Pläne. In seiner intellektuellen Fähigkeit und seinen Äußerungen ein Kind, besitzt er die animalischen Leidenschaften eines kräftigen Mannes. Vor seinem Unfall besaß er trotz fehlender Schulbildung ein ausgeglichenes Gemüt, er war von denen, die ihn kannten, als scharfsinniger, kluger Geschäftsmann angesehen, der mit sehr viel Energie und Ausdauer seine Vorhaben ausführte. In dieser Hinsicht hatte sich sein Verstand grundlegend und dermaßen verändert, dass seine Freunde und Verwandten sagten, er sei „nicht mehr Gage“. (Harlow, 1868, S. 339–340)

Gages Unfall ereignete sich zu einer Zeit, als Wissenschaftler gerade erst begannen, Hypothesen über die Beziehung zwischen Hirnfunktionen und komplexem Verhalten zu bilden. Gages Verhaltensänderungen nach seinem Unfall veranlassten seinen Arzt dazu, Gehirnbereiche als Grundlage für die Aspekte der Persönlichkeit und des rationalen Verhaltens anzunehmen.

Etwa zu der Zeit, als sich Gage von seiner Verletzung erholte, untersuchte **Paul Broca** die Rolle des Gehirns bei der Sprache. Seine Forschung auf diesem Gebiet begann mit der Autopsie eines Mannes, der nach dem einzigen Wort benannt wurde, das er noch aussprechen konnte, „Tan“. Broca fand heraus, dass der linke vordere Bereich von Tans Gehirn schwer geschädigt war. Diese Entdeckung veranlasste Broca, auch andere Personen mit sprachlichen Beeinträchtigungen zu untersuchen. In allen Fällen entdeckte er eine ähnliche Schädigung derselben Gehirnregion, die heute als **Broca-Areal** bekannt ist. Wie Sie im Laufe der Lektüre dieses Buches sehen werden, versuchen Forscher auch heute noch, Muster von Verhaltensänderungen und Beeinträchtigungen mit Orten und Regionen von Hirnschädigungen in Zusammenhang zu bringen.

Das Problem bei der Untersuchung unfallgeschädigter Gehirne besteht natürlich darin, dass die Forscher den Ort und das Ausmaß der Schädigung nicht kontrollieren können. Um ein gut fundiertes Wissen über das Gehirn und dessen Beziehung zu verhaltensbezogenen und kognitiven Funktionen zu erlangen, sind Wissenschaftler auf Methoden angewiesen, die ihnen erlauben, die beeinträchtigte Region des Gehirns genau zu spezifizieren. Forscher haben eine Reihe von Techniken entwickelt, um **Läsionen**, eng umgrenzte Schädigungen des Gehirns, hervorzurufen. Sie entfernen beispielsweise spezifische Hirnareale auf chirurgischem Weg, durchtrennen die neuronale Verbindungen zu diesen Arealen oder zerstören die Arealen durch starke Hitze, Kälte oder Elektrizität. Wie man sich denken kann, werden Läsionsexperimente nur an Tieren durchgeführt. (Erinnern wir uns an die Diskussion in Kapitel 2; die ethische Rechtfertigung dieser Art von Tierforschung wird mittlerweile intensiv geprüft.) Unser Wissen über das Gehirn hat sich radikal gewandelt, seit die Forscher immer wieder die Ergebnisse von Läsionsstudien an Tieren mit der wachsenden Anzahl klinischer Befunde über die Auswirkungen von Hirnschädigungen auf menschliches Verhalten abgleichen.

In den letzten Jahren hat die Forschung ein als **repetitive transkraniale Magnetstimulation (rTMS)** bezeichnetes Verfahren entwickelt, das mit magnetischen Stimulationspulsen temporäre, vorübergehende „Läsionen“ bei menschlichen Versuchspersonen hervorruft – einzelne Hirnregionen können ohne Gewebe-

schädigung kurzzeitig abgeschaltet werden. Diese neue Technik ermöglicht den Forschern die Beantwortung von Fragen, die man in Tierversuchen nicht hätte beantworten können. Nehmen wir als Beispiel eine Anwendung von rTMS, um die Grundlagen visuellen Vorstellens im Gehirn zu erforschen.

AUS DER FORSCHUNG

Fixieren Sie Ihre Augen auf ein Objekt in der Umgebung, vielleicht einen Baum draußen vor dem Fenster. Schließen Sie jetzt die Augen und erzeugen ein geistiges Bild desselben Gegenstandes. Was ist in Ihrem Gehirn während dieser beiden Aktivitäten geschehen? Für wie wahrscheinlich halten Sie es, dass einige derselben Hirnareale sowohl am Perzeptions- als auch am visuellen Imaginationsakt beteiligt sind? Um diese Frage zu beantworten, baten die Experimentatoren ihre Probanden, sich Darstellungen mit vier Quadranten einzuprägen (► Abbildung 3.11) und sich diese Darstellungen dann mit geschlossenen Augen vorzustellen (Kosslyn et al., 1999). Die Versuchspersonen sollten dann etwa Fragen über die relative Länge oder Breite der Streifen in den einzelnen Quadranten beantworten. Anschließend erzeugten die Forscher mit rTMS temporäre „Läsionen“ in den Hirnarealen, die für normales Sehen benutzt werden (das in Kapitel 4 beschrieben wird). Genau wie bei Vergleichen mit offenen Augen wurde die Leistung beim visuellen Vorstellen durchgängig gemindert. Dieses Ergebnis legt nahe, dass dieselben Hirnareale benutzt werden, wenn man einen Baum sieht und wenn man sich einen Baum vorstellt.

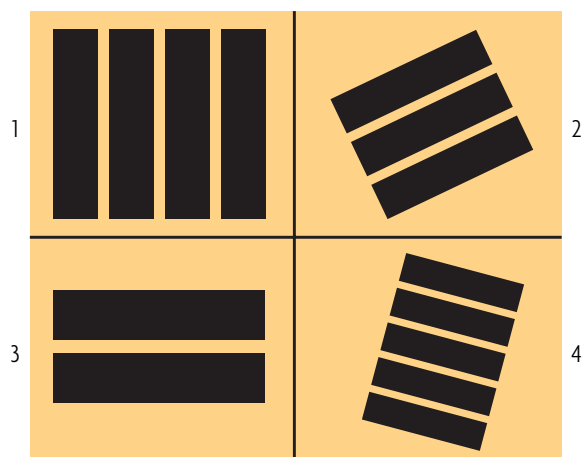


Abbildung 3.11: Test des visuellen Vorstellungsvermögens. Versuchen Sie, sich diese Abbildung Quadrant für Quadrant einzuprägen, bis Sie ein geistiges Abbild aller vier Quadranten erzeugen können. Jetzt decken Sie die Abbildung mit der Hand ab. Beantworten Sie dann mithilfe Ihres visuellen Vorstellungsvermögens folgende Frage: Sind die Linien in Quadrant 1 oder 2 länger? Überprüfen Sie die Antwort anschließend an Hand der Abbildung.

Man sieht, warum dieses Experiment mit Versuchstieren nicht möglich gewesen wäre: Wie könnten wir sicher sein, dass eine Ratte sich etwas bildlich vorstellt? Diese Studie zeigt, welch großes Potenzial die Möglichkeit, temporäre „Läsionen“ im Hirn zu erzeugen, für die Erforschung der Hirnfunktionen hat.

Unter gewissen Bedingungen können Neurowissenschaftler etwas über die Funktion von Gehirnregionen erfahren, indem sie diese direkt *stimulieren*. Ein Pionier im Einsatz elektrischer Stimulation, um tief liegende Hirnstrukturen zu erforschen, war **Walter Hess** Mitte der 50er Jahre des vergangenen Jahrhunderts. Hess implantierte zum Beispiel Elektroden ins Gehirn sich frei bewegender Katzen. Mit einem Knopfdruck konnte er einen kleinen elektrischen Impuls an der Spitze der Elektrode auslösen. Hess stimulierte 4.500 Gehirnregionen von annähernd 500 Katzen und hielt die Konsequenzen im Verhalten genau fest. Er entdeckte, dass in Abhängigkeit von der Platzierung der Elektroden Schlaf, Sexualtrieb, Angst oder Furcht auf Knopfdruck erzeugt und genauso schnell wieder abge-



KRITISCHES DENKEN IM ALLTAG

Was bedeutet „Es liegt in den Genen“?

Das *Human Genome Project* hat die Genetik stark ins öffentliche Bewusstsein gerückt. In den Medien wird regelmäßig über die Fortschritte der Wissenschaft im Verständnis genetischer Beiträge zu solch wichtigen menschlichen Erfahrungen wie Fettleibigkeit, Sexualität und psychischer Erkrankung berichtet. Wir möchten Ihnen einen Bezugsrahmen zur Bewertung solcher Medienberichte geben. Wir werden uns dabei auf die Charaktereigenschaft der *Impulsivität* konzentrieren. Die Forschung interessiert sich für diese Verhaltensdimension, weil hohe Impulsivität Menschen anfällig für Probleme wie Alkohol- und Drogensucht macht (Sher et al., 2000).

Angenommen, Sie stoßen auf einen Zeitungsartikel mit der Überschrift „Wissenschaftler finden Impulsivitäts-Gen“. Welche Informationen sollte dieser Artikel enthalten? Erstens ist es wichtig, genau zu verstehen, was „Impulsivität“ im Zusammenhang des betreffenden Artikels bedeutet. Überlegen Sie einen Moment, wie Sie selbst diesen Begriff definieren oder anwenden würden: Sie kennen wahrscheinlich einige Menschen, die Sie als impulsiv bezeichnen würden, und andere, die Sie nicht so nennen würden. Aber was bedeutet das genau? Sind Ihre Bekannten impulsiv, weil sie nie voraus planen? Weil sie sich nicht beherrschen können? Weil sie zu viele Risiken eingehen? Wenn Sie auf die Behauptung „Wissenschaftler finden Impulsivitäts-Gen“ stoßen, müssen Sie genau feststellen, wie die Forscher den Begriff benutzen. Diese hohe Spezifizierung ist wichtig, weil es gut möglich ist, dass verschiedene Verhaltensmuster, die unter „Impulsivität“ zusammengefasst werden, verschiedene genetische Ursachen haben (Congdon & Canli, 2006). Wenn der Artikel keine genaue Definition von „Impulsivität“ bietet, sollten Sie seine Schlussfolgerungen nur mit Vorbehalt akzeptieren.

Als Nächstes suchen Sie nach einer Erklärung, warum die beteiligten Forscher glauben, dass das identifizierte Gen, eine ursächliche Rolle für impulsives Verhalten spielt. Manchmal wird diese Information als Tatsachenbehauptung gegeben: „Menschen mit der Variante A dieses Gens sind impulsiv; Menschen mit der Variante B sind es nicht.“ In der gegenwärtigen Forschung wollen die Forscher allerdings meistens eine Vorstellung des Mechanismus geben, mit dem das Gen das Verhalten steuert. Aus diesen Berichten erfahren Sie häufig lediglich, dass das angesprochene Gen die Charaktereigenschaft nur indirekt beeinflusst.

So haben sich beispielsweise Analysen impulsiven Verhaltens in letzter Zeit auf den Neurotransmitter Dopamin konzentriert. Dopamin wirkt in Hirnarealen, die wesentlich für Aufgaben wie etwa Vorausplanung sind – es ist dieser Neurotransmitter, der für kognitive Stabilität und Flexibilität sorgt (Bilder et al., 2004). Aus dieser Beschreibung können Sie ersehen, warum Störungen der Dopaminfunktion Menschen zu impulsiven oder instabilen Verhaltensweisen veranlassen könnten. Wenn Sie also eine genetische Grundlage der Impulsivität finden möchten, so impliziert das allerdings, dass Sie in Wirklichkeit eine genetische Grundlage für den individuell unterschiedlichen Gebrauch von Dopamin suchen. Forscher haben tatsächlich begonnen, Variationen in mehreren Genen – mit Bezeichnungen wie *DRD4* und *COMT* – zu dokumentieren, die den Dopaminhaushalt verändern (Congdon & Canli, 2006).

Sie sehen jetzt allmählich, wie alle diese Dinge zusammenpassen. Die Forscher setzen bei einer Charaktereigenschaft oder Verhalten wie Impulsivität an, die bei einzelnen Menschen unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Mit der Zeit verstehen sie, welche Vorgänge im Gehirn diese Unterschiede hervorrufen könnten. Dann können sie nach genetischen Variationen suchen, die diese unterschiedliche Gehirnaktivität erklären. Obwohl also die Überschrift „Wissenschaftler finden Impulsivitäts-Gen“ lautet, ist die wirkliche Nachricht eher, dass Wissenschaftler entdeckt haben, wie ein bestimmtes Gen – vielleicht eines von vielen – den Dopaminhaushalt des Gehirns beeinflusst. Das ist keine so prägnante Schlagzeile, käme aber der wirklichen Entdeckung näher.

- Warum ist es in der genetischen Forschung wichtig, Charaktereigenschaften oder Verhaltensweisen genau zu definieren?
- Warum könnten die Gene, die Impulsivität beeinflussen, auch auf andere Verhaltensweisen wirken?

schaltet werden konnten. Die elektrische Stimulation bestimmter Gehirnregionen konnte beispielsweise normalerweise zahme Katzen dazu bringen, vor Erregung die Haare aufzustellen und sich auf das nächstbeste Objekt zu stürzen.

Aufzeichnung und Bildgebung der Gehirnaktivität

Andere Neurowissenschaftler lokalisieren Gehirnfunktionen, indem sie mit Elektroden die elektrische Aktivität des Gehirns in Reaktion auf einen äußeren Reiz aufzeichnen. Die vom Gehirn produzierte elektrische Energie kann mit unterschiedlicher Genauigkeit betrachtet werden. Auf der Ebene höchster Genauigkeit führen Forscher höchst empfindliche Mikroelektroden ins Gehirn ein, um die elektrische Aktivität eines einzelnen Neurons aufzuzeichnen. Derartige Aufzeichnungen können Veränderungen der Aktivität einzelner Zellen in Reaktion auf Umweltreize aufzeigen.

Bei menschlichen Versuchspersonen platzieren Forscher oft eine Anzahl von Elektroden außen auf dem Schädel, um größere, zusammenhängende Muster elektrischer Aktivität aufzuzeichnen. Diese Elektroden liefern die Daten für ein **Elektroenzephalogramm (EEG)**, eine verstärkte Darstellung der Gehirnaktivität. Mit dem EEG kann die Beziehung zwischen psychischer Aktivität und der Reaktion des Gehirns untersucht werden. In einem Experiment sollten die Probanden eine Reihe von Gesichtern betrachten und bei jedem Gesicht angeben, ob sie es wohl in einem späteren Gedächtnistest wiedererkennen würden. Zu dem Zeitpunkt, an dem die Probanden ihre Entscheidungen fällten, ließen sich über das EEG unterscheidbare Muster von Gehirnaktivität ermitteln, und diese Muster waren ein guter Prädiktor für diejenigen Gesichter, die anschließend tatsächlich wiedererkannt wurden (Sommer et al., 1995).

Zu den spannendsten technologischen Neuerungen bei der Erforschung des Gehirns gehören Geräte, die eigentlich entwickelt wurden, damit Neurochirurgen Abnormalitäten des Gehirns, wie Schädigungen nach Schlaganfall oder Krankheit, entdecken können. Diese Geräte liefern Bilder des lebenden Gehirns ohne invasive Verfahren, die das Risiko einer Gewebeschädigung mit sich bringen.

Bei der Forschung unter Einsatz der **Positronen-Emissions-Tomographie (PET)** werden den Probanden unterschiedliche Arten radioaktiver (aber ungefährlicher) Substanzen injiziert, die über das Blut schließlich ins Gehirn wandern, wo sie dann von aktiven Gehirnzellen aufgenommen werden. Aufzeichnungsgeräte außerhalb des Schädels können die Radioaktivität er-



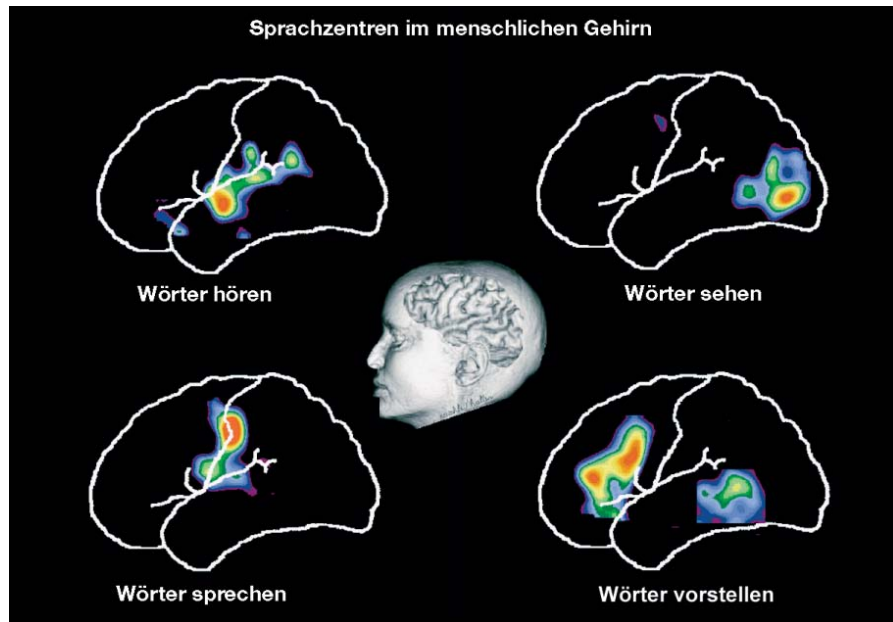
Wie haben neue bildgebende Verfahren die Fragen aufgefächert, die sich Forscher stellen können?

fassen, die diejenigen Zellen abgeben, die während unterschiedlicher geistiger oder verhaltensbezogener Aufgaben aktiv sind. Diese Informationen werden dann in einen Computer eingegeben, der ein dynamisches Bild (einen so genannten PET-Scan) des Gehirns erstellt, das zeigt, wo die verschiedenen Arten psychischer Aktivitäten tatsächlich stattfinden (► Abbildung 3.12).

Die **Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT)**, auch MRI von *magnetic resonance imaging*) nutzt Magnetfelder und Radiowellen, um Energieimpulse im Gehirn zu erzeugen. Wird der Magnetimpuls auf verschiedene Frequenzen eingestellt, richten sich einige Atome im Magnetfeld aus. Wird der Magnetimpuls wieder abgeschaltet, vibrieren die Atome (sie erzeugen eine Resonanz), wenn sie sich in ihre Ursprungslage zurück orientieren. Spezielle Wellenempfänger orten diese Resonanz und leiten diese Information an einen Computer weiter, der wiederum Bilder der Positionen unterschiedlicher Atome in den Hirnarealen generiert. Mithilfe dieser Bilder können Forscher Hirnstrukturen mit psychischen Prozessen in Verbindung bringen.

Die deutlichsten Bilder anatomischer Details liefert das MRT, während PET-Scans genauere Informationen über Funktionen bereitstellen. In einem neuen Verfahren, der **funktionalen Magnet-Resonanz-Tomographie (fMRT)**; englisch fMRI), spielen einige Vorteile beider Techniken zusammen, indem magnetische Veränderungen im Blutfluss zu den Zellen im Gehirn gemessen werden können; die fMRT erlaubt präzisere Aussagen über Struktur und Funktion des Gehirns. Forscher nutzen die fMRT, um die Hirnregionen zu entdecken, die für viele der wichtigsten kognitiven Fähigkeiten wie Aufmerksamkeit, Wahrnehmung, Sprachverarbeitung und Gedächtnis verantwortlich sind (Cabeza & Nyberg, 2000).

Abbildung 3.12: PET-Scans des tätigen Gehirns. Diese PET-Aufnahmen zeigen, dass unterschiedliche Aufgaben neuronale Aktivität in unterschiedlichen Hirnregionen hervorrufen. (Höchste Nervenzellaktivität ist rot dargestellt, jeweils niedrigere Aktivität orange, gelb, grün und schließlich blau für geringe Aktivität.)



Mehr als 300 Jahre ist es her, dass Descartes bei Kerzenlicht in seinem Arbeitszimmer saß und über das Gehirn sinnierte; mehr als 100 Jahre sind vergangen, seit Broca entdeckte, dass Hirnregionen offenbar mit spezifischen Funktionen in Verbindung stehen. Seit diesen Entwicklungen hat die kulturelle Evolution die Neurowissenschaftler mit den benötigten Technologien ausgerüstet, um dem Gehirn einige seiner größten Geheimnisse zu entlocken. Der Rest dieses Kapitels beschreibt einige dieser Geheimnisse.



Die Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) liefert dieses farbige Profil eines normalen Gehirns. (Hier stehen die verschiedenen Farben für unterschiedliche Gewebestrukturen.) Warum versucht man, Gehirnregionen zu identifizieren, die bestimmten Funktionen zugrunde liegen?

3.3.2 Das Nervensystem

Das Nervensystem besteht aus Milliarden von hoch spezialisierten Nervenzellen, oder *Neuronen*, die das Gehirn und die Nervenfasern bilden, die man überall im Körper findet. Das Nervensystem ist in zwei Hauptbereiche unterteilt: das **zentrale Nervensystem (ZNS)** und das **periphere Nervensystem (PNS)**. Das ZNS umfasst alle Neurone des Gehirns und des Rückenmarks; zum PNS gehören alle Neurone, welche die Nervenfasern bilden, die das ZNS mit dem Körper verbinden. Die ► Abbildungen 3.13 und ► 3.14 zeigen die Beziehung vom ZNS zum PNS.

Die Aufgabe des ZNS ist die Integration und Koordination aller körperlichen Funktionen, die Verarbeitung aller eintreffenden neuronalen Informationen und die Entsendung von Befehlen an unterschiedliche Bereiche des Körpers. Das ZNS sendet und erhält neuronale Information über das *Rückenmark*, einen Strang von Neuronen, der das Gehirn mit dem PNS verbindet. Dieser Strang befindet sich in einem Hohlraum der Wirbelsäule. Die Spinalnerven des Rückenmarks treten zwischen jedem Wirbelpaar der Wirbelsäule aus, verzweigen sich und stehen mit Sinnesrezeptoren, Muskeln und Drüsen in Verbindung. Das Rückenmark koordiniert die Aktivität der linken und rechten Körperseite und ist für einfache, schnelle reflektorische Aktionen ohne Beteiligung des Gehirns verantwortlich. Ein Organismus, dessen Rückenmark vom Gehirn abgetrennt wurde, kann immer noch seine Körperteile von einem Schmerz auslösenden Reiz zurückziehen.

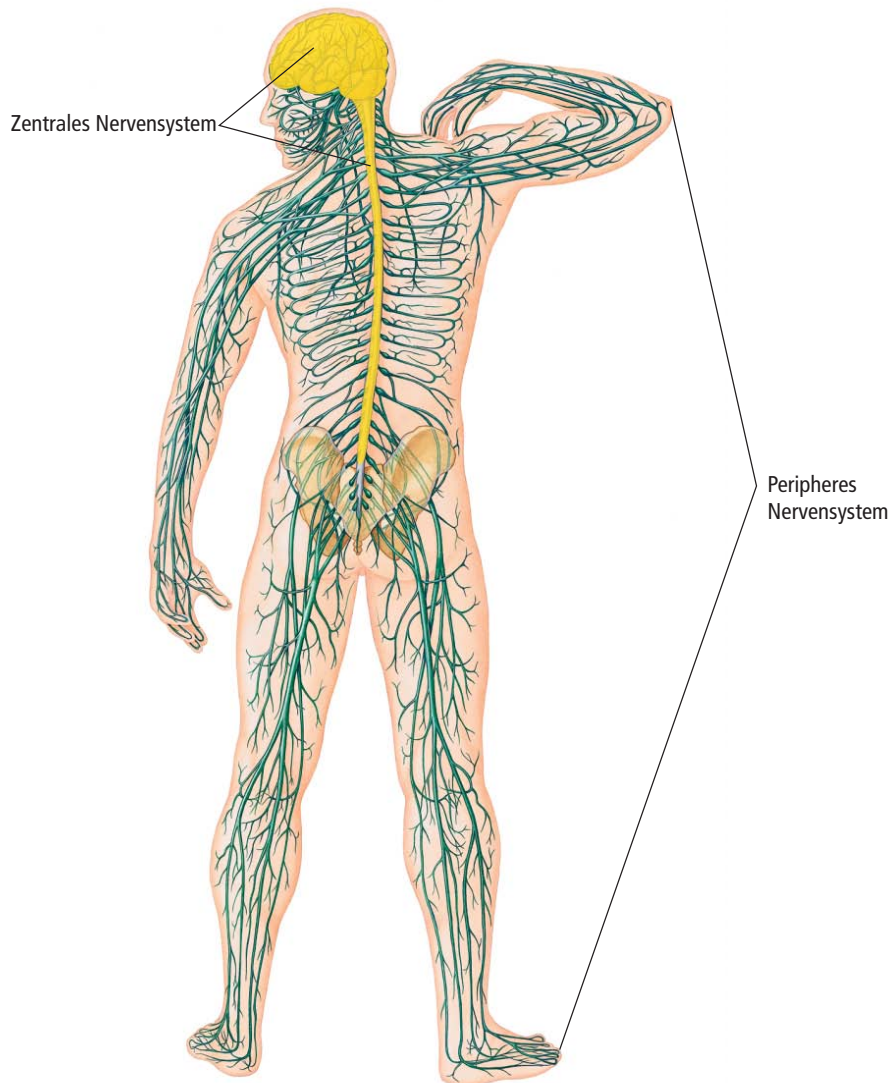


Abbildung 3.13: Die Struktur des menschlichen zentralen und peripheren Nervensystems. Diesensorischen und motorischen Nervenfasern, die das periphere Nervensystem bilden, sind über das Rückenmark mit dem Gehirn verbunden (nach McAnulty & Burnette, 2003).

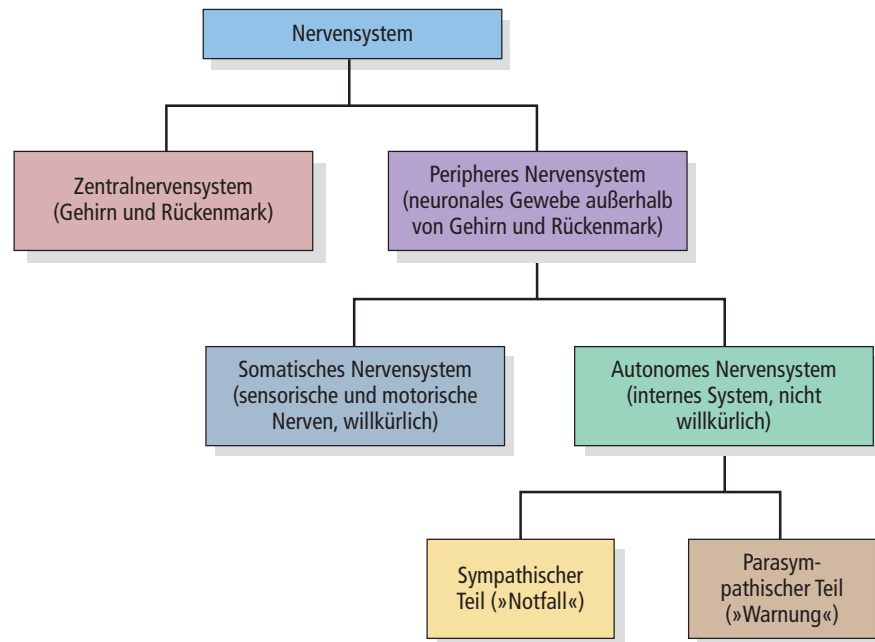
Obgleich ein intaktes Gehirn normalerweise von einer derartigen Handlung Notiz nehmen würde, kann der Organismus die Handlung ohne Anweisungen von oben zu Ende führen. Schädigungen der Nerven des Rückenmarks können zu Lähmungen der Beine oder des Rumpfes führen, wie beispielsweise bei Querschnittsgelähmten. Das Ausmaß der Lähmung hängt davon ab, wie weit oben das Rückenmark geschädigt ist; höher angesiedelte Schädigung führt zu ausgehnter Lähmung.

Trotz seiner Funktion als Kommandozentrale ist das ZNS von jeglichem direktem Kontakt mit der Außenwelt isoliert. Es ist die Rolle des PNS, das ZNS mit Informationen aus den Sinnesrezeptoren zu versorgen, wie man sie in den Augen und Ohren findet, und Anweisungen vom Gehirn zu den Organen und Muskeln weiterzuleiten. Das PNS umfasst wiederum zwei

Arten von Nervenfasern (siehe Abbildung 3.14). Das **somatische Nervensystem** reguliert die Aktivität der Skelettmuskulatur. Man stelle sich vor, man tippt einen Brief. Die Bewegung der Finger auf der Tastatur wird vom somatischen Nervensystem gesteuert. Sobald man weiß, was man schreiben will, sendet das Gehirn Anweisungen an die Finger, bestimmte Tasten zu drücken. Gleichzeitig senden die Finger eine Rückmeldung über ihre Position und ihre Bewegung an das Gehirn. Drückt man die falsche Taste, informiert das somatische Nervensystem das Gehirn, das dann die nötige Korrektur vornimmt, und in Sekundenbruchteilen löscht man den Fehler und drückt die richtige Taste.

Der andere Teil des PNS ist das **autonome Nervensystem**, das grundlegende Lebensfunktionen überwacht. Dieses System arbeitet rund um die Uhr und

Abbildung 3.14: Die hierarchische Struktur des menschlichen Nervensystems. Das zentrale Nervensystem besteht aus dem Gehirn und dem Rückenmark. Das periphere Nervensystem teilt sich gemäß seiner Funktionen auf: Das somatische Nervensystem kontrolliert die Willkürbewegungen und das autonome Nervensystem reguliert die inneren Prozesse. Das autonome Nervensystem teilt sich weiter in zwei Subsysteme auf: Das sympathische Nervensystem steuert das Verhalten in Notfallsituationen, und das parasympathische Nervensystem regelt Verhalten und interne Prozesse unter normalen Umständen.



reguliert die Körperfunktionen, die wir gewöhnlich nicht bewusst kontrollieren, wie Atmung, Verdauung und Erregungsniveau. Das autonome Nervensystem muss auch während des Schlafes arbeiten, und es hält während einer Narkose oder eines längeren Komas die Lebensfunktionen aufrecht.

Das autonome Nervensystem ist für zwei Arten von überlebensrelevanten Situationen zuständig: solche, die den Organismus bedrohen, und solche, die zur Erhaltung des Organismus beitragen. Um diese Funktionen zu erfüllen, ist das autonome Nervensystem wiederum in ein sympathisches und ein parasympathisches Nervensystem unterteilt (siehe Abbildung 3.14). Diese Teile arbeiten gegensätzlich (antagonistisch), um ihre Aufgaben zu erfüllen. Das **sympathische Nervensystem** dirigiert Reaktionen auf Notfallsituationen; das **parasympathische Nervensystem** überwacht die Routinefunktionen des Körpers. Der sympathische Teil kann als der „Krisenbeauftragte“ des Körpers angesehen werden – in einer Notfall- oder Stresssituation regt er die Hirnstrukturen für „Kampf oder Flucht“ an. Die Verdauung hält inne, das Blut fließt von den inneren Organen zu den Muskeln, der Sauerstoffverbrauch und der Puls steigen. Wenn die Gefahr vorüber ist, ist es die Aufgabe des parasympathischen Teils, diese Prozesse zu verlangsamen, und die Person beruhigt sich langsam wieder. Die Verdauung stellt sich wieder ein, das Herz schlägt langsamer, und die Atmung wird ruhiger. Der parasympathische Teil ist für die „häuslichen Pflichten“ des Körpers im Normalbetrieb zu-

ständig, wie die Beseitigung von Abfallstoffen, den Schutz des visuellen Systems (durch das Erzeugen von Tränenflüssigkeit und die Pupillenreaktion) und die Langzeitversorgung des Körpers mit Energie. Die unterschiedlichen Aufgaben des sympathischen und parasympathischen Nervensystems sind in ► Abbildung 3.15 dargestellt.

3.3.3 Gehirnstrukturen und ihre Funktionen

Das Gehirn ist die wichtigste Komponente unseres zentralen Nervensystems. Das menschliche Gehirn besteht aus drei miteinander verbundenen Schichten. Im tiefsten Bereich des Gehirns, dem *Hirnstamm*, befinden sich Strukturen, die hauptsächlich an autonomen Prozessen wie Pulsfrequenz, Atmung, Schlucken und Verdauung beteiligt sind. Dieser zentrale Kern ist umgeben vom *limbischen System*, das an Prozessen von Motivation, Emotion und Gedächtnis beteiligt ist. Das *Großhirn (Cerebrum)* umschließt diese beiden Strukturebenen. Im Großhirn befindet sich die Gesamtheit des menschlichen Geistes. Das Cerebrum und dessen Oberfläche, der *cerebrale Cortex*, integriert sensorische Informationen, koordiniert die Bewegungen und ermöglicht abstraktes Denken und Schlussfolgern (► Abbildung 3.16). Betrachten wir nun die Funktionen dieser drei wichtigen Hirnregionen etwas genauer, beginnend mit dem Hirnstamm, dem Thalamus und dem Kleinhirn (Cerebellum).

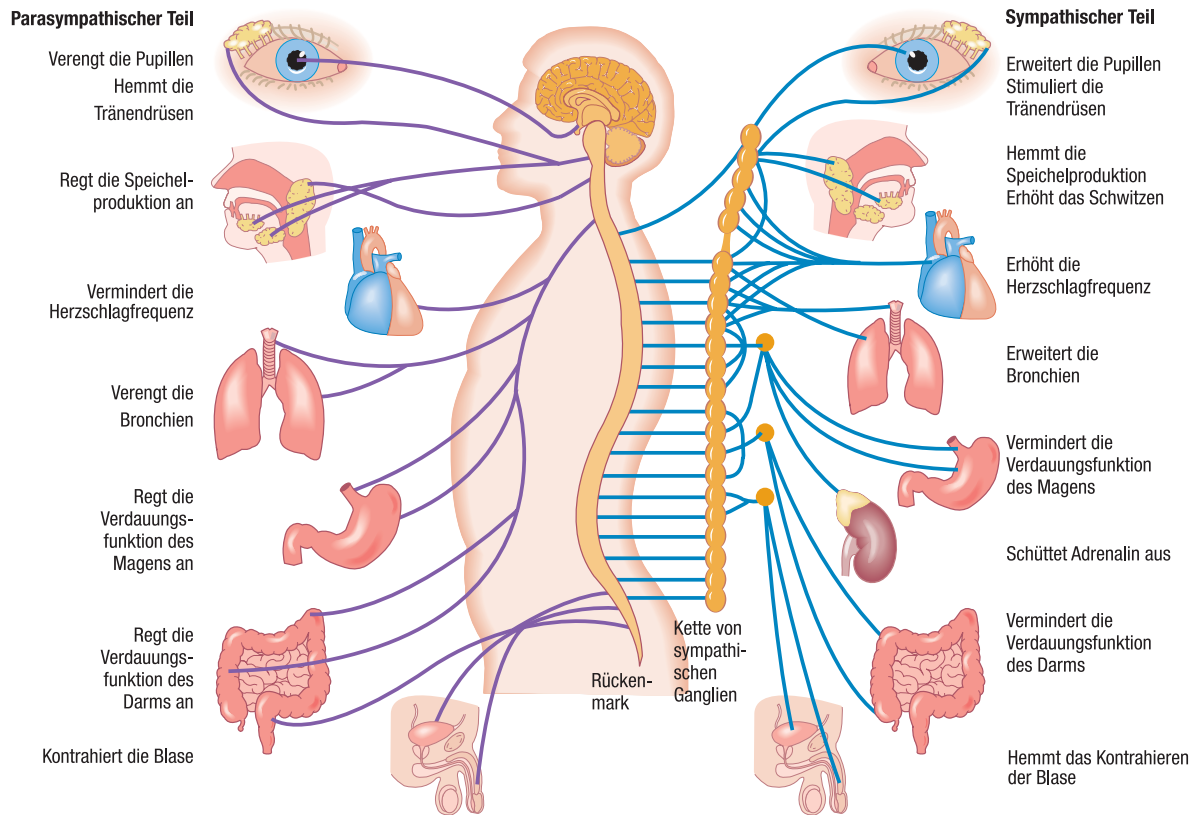


Abbildung 3.15: Das autonome Nervensystem. Das parasympathische Nervensystem, das die internen Prozesse und das Verhalten im Alltag regelt, ist links, das sympathische Nervensystem, das interne Prozesse und das Verhalten in Stresssituationen regelt, rechts dargestellt. Man beachte, dass die Nervenfasern des sympathischen Nervensystems auf ihrem Weg zum und vom Rückenmark Ganglien innervieren, also Verbindungen zu ihnen herstellen; Ganglien sind spezialisierte Cluster von Neuronenketten.

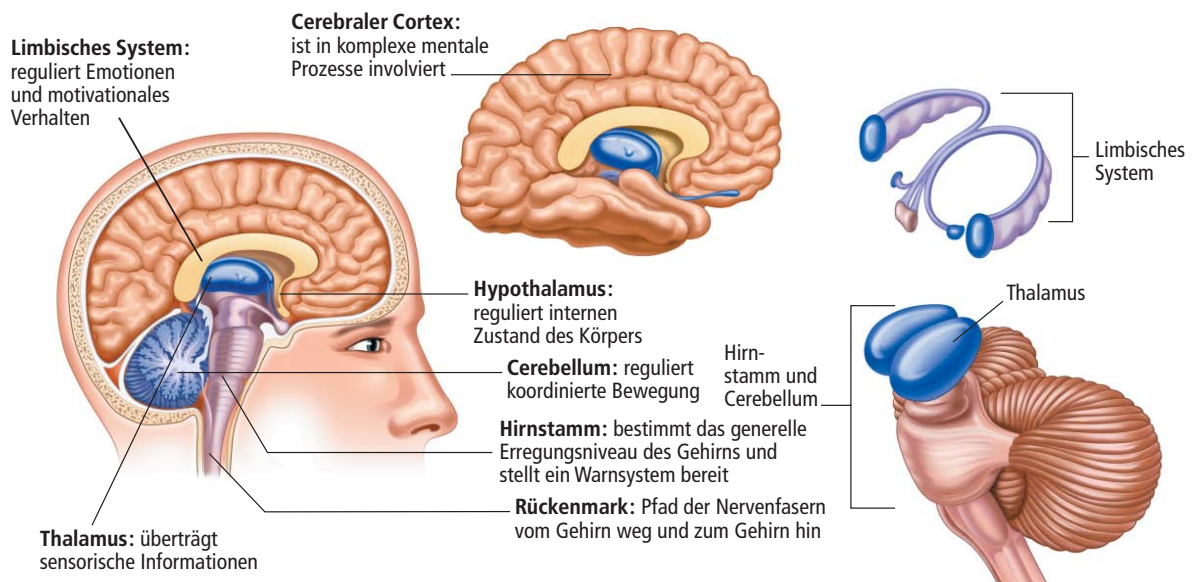


Abbildung 3.16: Gehirnstrukturen. Das Gehirn besteht aus verschiedenen Hauptkomponenten, unter anderem dem Hirnstamm, dem Kleinhirn, dem limbischen System und der Großhirnrinde. All diese Bestandteile bilden zusammen ein komplexes Ganzes.

Hirnstamm, Thalamus und Kleinhirn

Den **Hirnstamm** findet man bei allen Wirbeltieren. Er enthält Strukturen, die die internen Prozesse des Körpers regeln (► Abbildung 3.17). Die **Medulla oblongata** (verlängertes Rückenmark), am oberen Ende des Rückenmarks angesiedelt, stellt das Zentrum für Atmung, Blutdruck und Herzschlag dar. Weil diese Prozesse lebenswichtig sind, kann eine Schädigung der Medulla fatale Folgen haben. Nervenfasern, die vom Körper aufsteigen und vom Gehirn hinabführen, kreuzen in der Medulla. Das bedeutet, dass die linke Körperseite mit der rechten, die rechte Körperseite mit der linken Hirnhälfte verbunden ist.

Genau über der Medulla liegt die **Brücke (Pons)**, die ankommende Informationen in andere Strukturen des Hirnstamms und in das Kleinhirn leitet (*Pons* ist das lateinische Wort für Brücke). Die **Formatio reticularis** ist ein dichtes Netzwerk von Nervenzellen, das als Wächter des Gehirns dient. Sie regt den cerebralen Cortex an, die Aufmerksamkeit auf eine neue Stimulation zu richten, und hält das Gehirn sogar während des Schlafes aufmerksam (Kinomura et al., 1996). Eine massive Schädigung in diesem Bereich führt oft zum Koma.

Die Formatio reticularis besitzt lange Nervenfasern, die zum **Thalamus** führen, der die eintreffende sensorische Information kanalisiert und zu den entsprechenden Arealen des Cortex zur Verarbeitung weiterleitet. Der Thalamus leitet zum Beispiel Informationen

von den Augen in cortikale Areale der visuellen Verarbeitung.

Neurowissenschaftler wissen seit langem, dass das **Cerebellum** (Kleinhirn), beim Hirnstamm an der Schädelbasis liegend, Körperbewegungen koordiniert, die Haltung kontrolliert und das Gleichgewicht aufrecht erhält. Eine Schädigung des Cerebellums unterbricht den Fluss ansonsten weicher Bewegungen; sie erscheinen unkoordiniert und ruckartig. Neuere Forschungen lassen vermuten, dass das Kleinhirn auch eine wichtige Rolle spielt, wenn es um die Fähigkeit geht, beispielsweise die Kontrolle von Körperbewegungen zu erlernen (Hazeltine & Ivry, 2002; Seidler et al., 2002).

Das limbische System

Das **limbische System** vermittelt zwischen motiviertem Verhalten, emotionalen Zuständen und Gedächtnisprozessen. Des Weiteren regelt es Körpertemperatur, Blutdruck, Blutzuckerspiegel und andere Aspekte des Körperhaushalts. Das limbische System besteht aus drei Strukturen: Hippocampus, Amygdala und Hypothalamus (► Abbildung 3.18).

Der **Hippocampus**, die größte Struktur des limbischen Systems, spielt beim Erwerb *expliziter Gedächtnisinhalte* eine wichtige Rolle. Es gibt beträchtliche klinische Belege für diese Ansicht, insbesondere aus Studien mit dem Patienten H. M., einem der bekanntesten Probanden der Psychologie.

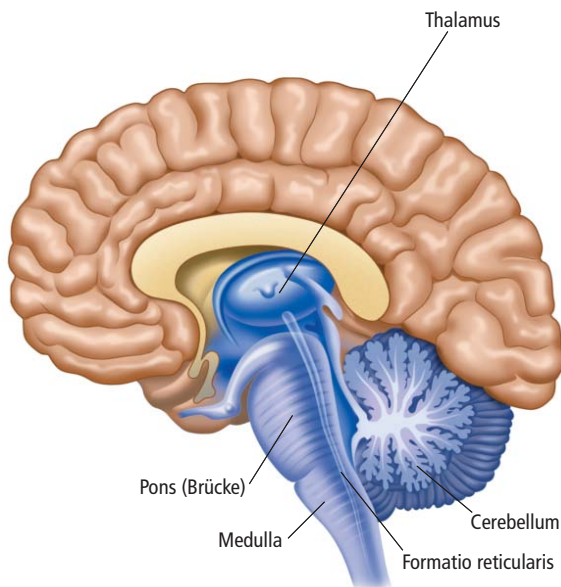


Abbildung 3.17: Hirnstamm, Thalamus und Kleinhirn. Diese Strukturen sind primär an grundlegenden Lebensprozessen beteiligt: Atmung, Puls, Erregungsniveau, Bewegung, Gleichgewicht und einfache Verarbeitung sensorischer Informationen.

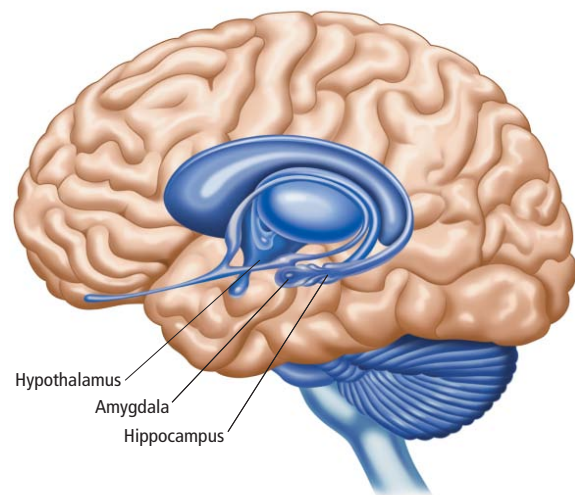


Abbildung 3.18: Das limbische System. Die Strukturen des limbischen Systems, die man nur bei Säugetieren findet, sind an motiviertem Verhalten, emotionalen Zuständen und Gedächtnisprozessen beteiligt.

AUS DER FORSCHUNG

Als er 27 Jahre alt war, unterzog sich H. M. einer Operation, um zu versuchen, dadurch die Häufigkeit und Schwere seiner epileptischen Anfälle zu reduzieren. Während dieser Operation wurden Teile seines Hippocampus entfernt. Infolgedessen konnte sich H. M. nur noch an Dinge erinnern, die sehr lange zurücklagen; er verlor seine Fähigkeiten, neue Informationen im Langzeitgedächtnis zu speichern. Noch lange nach jener Operation glaubte er, im Jahre 1953 zu leben – das war das Jahr seiner Operation.

Bestimmte Arten von Erinnerungen können allerdings auch nach einer Schädigung des Hippocampus noch gespeichert werden – zum Beispiel konnte sich H. M. noch neue Fähigkeiten aneignen. Sollten Sie also in einen Unfall verwickelt worden sein und eine Verletzung des Hippocampus erlitten haben, dann könnten Sie immer noch neue Aufgaben lernen, Sie würden sich aber nicht mehr daran erinnern können! Nach weiterer Beschäftigung mit dem Hippocampus ist die Forschung zu noch detaillierteren Erkenntnissen darüber gelangt, wie sogar verschiedene Bereiche dieser Struktur an der Aneignung verschiedener Arten von Gedächtnisinhalten beteiligt sind (Zeineh et al., 2003). In Kapitel 7 werden wir auf die Funktion des Hippocampus bei der Einspeicherung von Gedächtnisinhalten zurückkommen.

Die **Amygdala** (der Mandelkern) ist maßgeblich an der emotionalen Kontrolle und der Formung emotionaler Gedächtnisinhalte beteiligt. Aufgrund ihrer Kontrollfunktion wirken sich Schädigungen der Amygdala beruhigend auf sonst ungehaltene Menschen aus. (In Kapitel 15 diskutieren wir die *Psychochirurgie*.) Die Schädigung einiger Areale der Amygdala beeinträchtigt jedoch auch die Fähigkeit, den emotionalen Gehalt von Gesichtsausdrücken zu erinnern (Adolphs et al., 1994). Das gilt im Besonderen für negative emotionale Ausdrücke wie beispielsweise Angst. Forscher vermuten, dass die Amygdala bei der Aneignung und dem Einsatz von Wissen über Bedrohung und Gefahr eine spezielle Rolle spielt (Adolphs et al., 1999).

Der **Hypothalamus** ist eine der kleinsten Strukturen des Gehirns und spielt doch bei vielen unserer wichtigsten alltäglichen Handlungen eine entscheidende Rolle. Er ist aus verschiedenen Kernen (*Nuclei*), kleinen Neuronenbündeln, zusammengesetzt, die physiologische Prozesse des motivationalen Verhaltens regulieren (darunter Essen, Trinken, Regelung der Temperatur und sexuelle Erregung). Der Hypothalamus erhält das innere Gleichgewicht des Körpers, die **Homöostase**. Hat der Körper wenige Energiereserven zur Verfü-

gung, ist der Hypothalamus an der Stimulation des Organismus zur Nahrungsbeschaffung und Nahrungsaufnahme beteiligt. Sinkt die Körpertemperatur, verursacht der Hypothalamus eine Kontraktion der Blutgefäße oder kleine unwillkürliche Bewegungen, das Frösteln oder Zittern vor Kälte. Der Hypothalamus reguliert auch die Aktivitäten des endokrinen Systems.

Das Großhirn

Beim Menschen überragt das **Großhirn** den Rest des Gehirns; es beansprucht zwei Drittel der Gehirnmasse für sich. Seine Aufgabe ist die Regulierung höherer kognitiver und emotionaler Funktionen. Die äußere Oberfläche des Großhirns, bestehend aus Milliarden von Zellen in einer Schicht von etwa drei Millimetern, wird **cerebraler Cortex** genannt. Das Großhirn ist in zwei fast symmetrische Hälften, die **cerebralen Hemisphären**, unterteilt (wir werden diese beiden Hemisphären weiter unten in diesem Kapitel noch ausführlich behandeln). Die beiden Hemisphären sind über einen gewaltigen Strang aus Nervenfasern, das **Corpus callosum** (auch Balken genannt), verbunden. Über diesen Pfad vollzieht sich der Informationsaustausch zwischen den Hemisphären.

Neurowissenschaftler kartografierten jede Hemisphäre mithilfe zweier wichtiger Landmarken. Eine Furche, der *Sulcus centralis* (Zentralfurche), teilt jede Hemisphäre vertikal, und eine zweite ähnliche Furche, die *Fissura lateralis* (auch Sylvische Furche genannt), teilt jede Hemisphäre horizontal (► Abbildung 3.19). Durch diese vertikalen und horizontalen Unterteilungen lassen sich vier Areale oder Hirnlappen in jeder Hemisphäre definieren. Der **Frontallappen**, beteiligt an der motorischen Kontrolle und kognitiven Aktivitäten wie Planen, Entscheiden und dem Setzen von Zielen, befindet sich oberhalb der Fissura lateralis und vor dem Sulcus centralis. Schädigungen der Frontallappen können verheerende Auswirkungen auf das Handeln und die Persönlichkeit eines Menschen haben. Genau dort lag die Verletzung, die bei Phineas Gage solch dramatische Veränderungen hervorrief (Damasio et al., 1994). Der Frontallappen enthält auch das Broca-Areal, jene Region des Gehirns, die Paul Broca im Laufe seiner Arbeiten mit Patienten mit Sprachstörungen identifizierte.

Der **Parietallappen** ist für Empfindungen wie Berührung, Schmerz und Temperatur verantwortlich und befindet sich direkt hinter der Zentralfurche. Der **Okzipitallappen**, die Endstation für visuelle Informationen, liegt am Hinterkopf. Der **Temporallappen**, verantwortlich für das Hören, befindet sich unter der La-

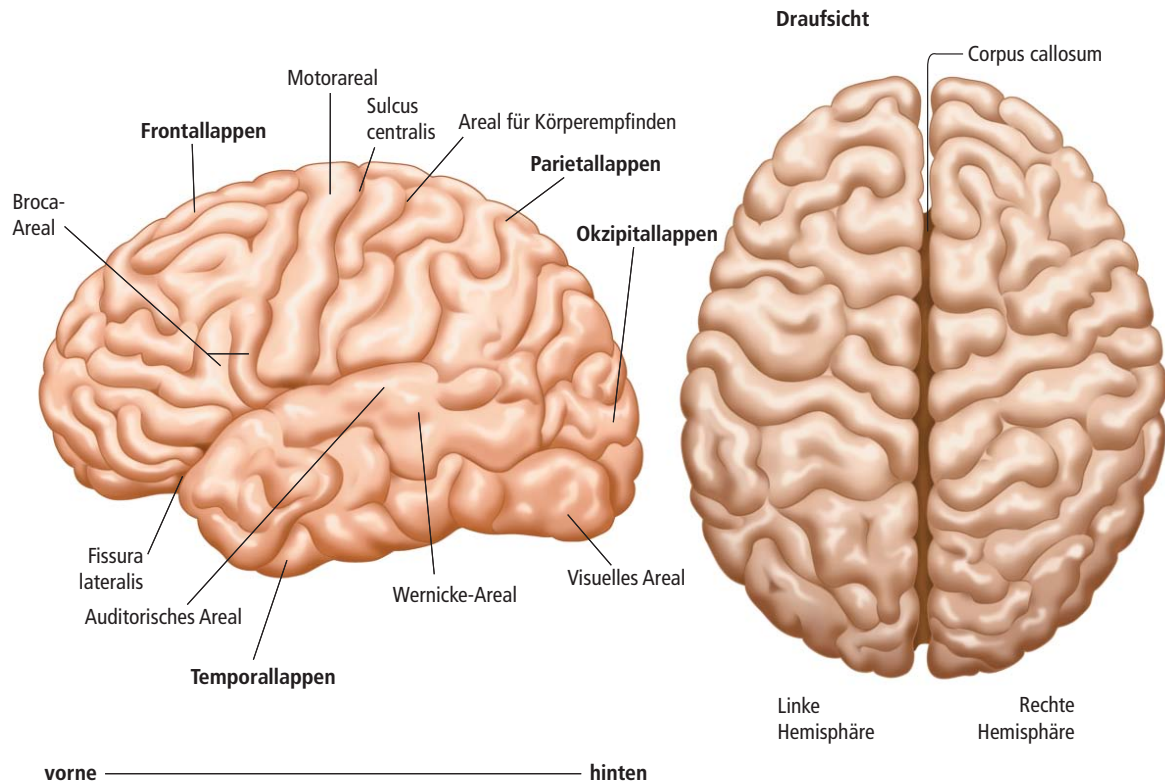


Abbildung 3.19: Die Großhirnrinde. Jede der beiden Hemisphären des Cortex besteht aus vier Lappen. Unterschiedliche sensorische und motorische Funktionen konnten mit speziellen Teilen jedes Hirnlappens in Verbindung gebracht werden.

teralfurche auf jeder Hemisphäre. Im Temporallappen befindet sich ein als *Wernicke-Areal* bezeichnetes Gebiet. 1874 entdeckte Carl Wernicke, dass Patienten mit einer Schädigung dieses Areals ihr Sprachverständnis verloren.

Es wäre irreführend zu sagen, dass irgendein Hirnlappen irgendeine spezifische Funktion allein kontrolliert. Die Hirnstrukturen vollziehen ihre Aufgaben gemeinsam, sie arbeiten reibungslos als eine integrale Einheit zusammen, gleich einem Symphonieorchester. Ob wir den Abwasch machen, eine Rechenaufgabe lösen oder mit unseren Freunden reden, unser Gehirn arbeitet als ein einheitliches Ganzes. Jeder Hirnlappen interagiert und kooperiert mit den anderen. Dennoch können Neurowissenschaftler Areale der vier Hirnlappen ausmachen, die für spezielle Funktionen wie das Sehen, das Hören, die Sprache und das Gedächtnis notwendig sind. Sind sie geschädigt, sind ihre Funktionen gestört oder gänzlich verloren.

Die Aktionen der mehr als 600 Muskeln unseres Körpers, die wir willentlich einsetzen, werden vom **motorischen Cortex** kontrolliert, der sich genau vor dem Sulcus centralis im Frontallappen befindet. Erinnern wir uns, dass Befehle von einer Seite des Gehirns zu Muskeln auf der gegenüberliegenden Körperseite

geleitet werden. Außerdem werden Muskeln der unteren Körperhälfte – zum Beispiel die, mit denen wir unsere Zehen bewegen – von Neuronen im oberen Bereich des motorischen Cortex gesteuert. Muskeln der oberen Körperhälfte, beispielsweise die Muskeln des Vokaltrakts, werden von Neuronen im unteren Bereich des motorischen Cortex gesteuert. Wie aus ► Abbildung 3.20 zu entnehmen ist, erhalten die oberen Bereiche des Körpers sehr viel detailliertere motorische Instruktionen als die unteren. In der Tat sind die zwei größten Areale des motorischen Cortex für die Finger – speziell für den Daumen – und für die Muskeln, die an der Sprache beteiligt sind, zuständig. Diese vergleichsweise großen Bereiche des motorischen Cortex reflektieren die für das menschliche Verhalten besondere Wichtigkeit des Umgangs mit Gegenständen, des Werkzeuggebrauchs, des Essens und des Sprechens.

Der **somatosensorische Cortex** befindet sich genau hinter der Zentralfurche im linken und rechten Parietallappen. Dieser Bereich des Cortex verarbeitet Informationen über Temperatur, Berührung, Position im Raum und Schmerz. Vergleichbar mit dem motorischen Cortex ist der obere Teil des sensorischen Cortex mit den unteren Körperbereichen verbunden und der untere

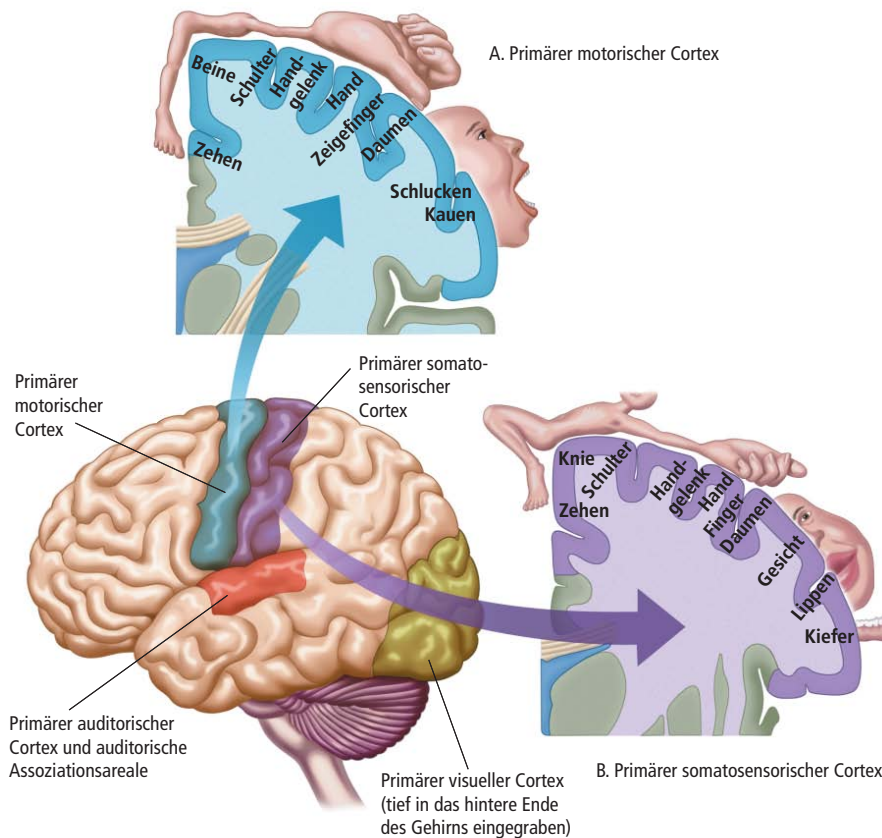


Abbildung 3.20: Motorischer und somatosensorischer Cortex. Die verschiedenen Körperteile reagieren mehr oder weniger empfindlich auf Stimulationen aus der Umwelt und auf Kontrollprozesse vom Gehirn. Die Reizempfindlichkeit einer bestimmten Körperregion steht mit der Menge an Volumen im Cortex in Verbindung, die dieser Region zugeschrieben ist. In dieser Abbildung ist der Körper so gezeichnet, dass die Größe der Körperteile dem ihnen zugeordneten kortikalen Volumen entspricht. Je größer der Körperteil in der Zeichnung, desto größer ist dessen Reizempfindlichkeit gegenüber Stimulationen aus der Umwelt und desto stärker kann das Gehirn seine Bewegungen kontrollieren.

re Teil des sensorischen Cortex mit den höher liegenden Körperbereichen. Der größte Teil dieses Areals repräsentiert Lippen, Zunge, Daumen und Zeigefinger – die Körperteile, welche die wichtigsten sensorischen Informationen liefern (siehe Abbildung 3.20). Und wie der motorische Cortex kommuniziert die rechte Hälfte des somatosensorischen Cortex mit der linken und die linke Hälfte mit der rechten Körperseite.

Auditive Information wird im **auditorischen Cortex** verarbeitet, der in den beiden Temporallappen angesiedelt ist. Der auditorische Cortex in jeder Hemisphäre erhält Informationen von *beiden* Ohren. Ein Areal des auditorischen Cortex ist an der Sprachproduktion beteiligt und ein anderes am Sprachverstehen. Visueller Input wird im hinteren Hirnbereich, im **visuellen Cortex**, verarbeitet. Hier ist der größte Bereich für den Input vom zentralen Bereich der Retina, der Fovea centralis, am Augenhintergrund zuständig. Die Fovea centralis überträgt die detailliertesten visuellen Informationen.

Nicht der gesamte Cortex ist für die Verarbeitung sensorischer Information und für die Steuerung der Muskeln zuständig. Tatsächlich ist der größte Teil mit der *Interpretation* und *Integration* von Informationen befasst. Prozesse wie Planen und Entscheiden ereig-

nen sich vermutlich im **Assoziationscortex**. Assoziationsareale sind über unterschiedliche Areale des Cortex verteilt – eine Region ist in Abbildung 3.20 bezeichnet. Der Assoziationscortex ermöglicht uns, Informationen aus verschiedenen sensorischen Modalitäten zu kombinieren, um geeignete Reaktionen auf Reize aus der Umwelt zu planen.

Wir haben uns nun einen Überblick über viele wichtige Strukturen unseres Nervensystems verschafft. Als wir begannen, über das Großhirn zu sprechen, bemerkten wir, dass jede cerebrale Struktur in beiden Hemisphären unseres Gehirns repräsentiert ist. Die Strukturen in diesen beiden Hemisphären besitzen jedoch etwas unterschiedliche Funktionen bezüglich vieler Arten des Verhaltens. Wir befassen uns nun mit diesen Unterschieden zwischen den beiden Hemisphären unseres Gehirns.

3.3.4 Hemisphärenlateralisation

Welche Arten von Informationen ließen Forscher ursprünglich vermuten, dass es Unterschiede in den Funktionen beider Hemisphären gibt? Erinnern wir uns, dass Paul Broca bei der Autopsie von Tan eine

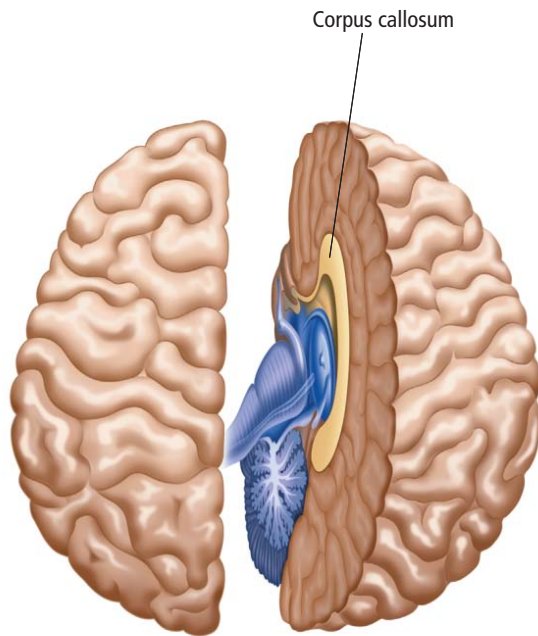


Abbildung 3.21: Das Corpus callosum. Das Corpus callosum ist ein massives Netzwerk an Nervenfasern, das Informationen zwischen den beiden Hemisphären übermittelt. Eine Durchtrennung des Corpus callosum beeinträchtigt diesen Kommunikationsprozess.

Schädigung in der linken Hemisphäre entdeckte. Broca ging dieser ersten Entdeckung nach und fand, dass weitere Patienten, die eine ähnliche Störung ihrer sprachlichen Fähigkeiten aufwiesen – ein Muster, das heute als *Broca-Aphasie* bekannt ist – ebenfalls eine Schädigung der *linken* Hirnhälfte aufwiesen. Eine Schädigung des entsprechenden Areals auf der *rechten* Seite des Gehirns hatte nicht denselben Effekt. Was bedeutet dies?

Die Möglichkeit, Hemisphärenunterschiede zu erforschen, entstand erstmals im Kontext einer Behandlung schwerer Epilepsie, bei der das Corpus callosum durchtrennt wird – ein Strang von etwa 200 Millionen Nervenfasern, die Informationen zwischen den zwei Hemisphären hin und her übertragen (► Abbildung 3.21). Durch diese Operation soll verhindert werden, dass die heftige elektrische Aktivität, die epileptische Anfälle begleitet, von der einen auf die andere Hemisphäre übergreift. Die Operation verläuft für gewöhnlich erfolgreich, und der Patient erscheint darauf in seinem Verhalten in den meisten Fällen normal. Patienten, die sich dieser Operation unterziehen, werden oft als *Split-brain*-Patienten bezeichnet.

Um die Fähigkeiten der voneinander getrennten Hemisphären der epileptischen Patienten zu testen, kreierte **Roger Sperry** (1968) und **Michael Gazzaniga** (1970) Situationen, in denen visuelle Informationen

jeder Hemisphäre separat präsentiert werden konnten. Sperrys und Gazzanigas Methode beruht auf der Anatomie des visuellen Systems (► Abbildung 3.22). Für jedes Auge verlaufen Informationen vom *rechten visuellen Feld* in die linke Hemisphäre und Informationen vom *linken* in die rechte Hemisphäre. Normalerweise wird die Information beider Hemisphären sehr schnell über das Corpus callosum ausgetauscht. Weil jedoch dieser Weg bei Split-brain-Patienten unterbrochen ist, bleibt die Information, die im rechten oder linken visuellen Feld präsentiert wurde, nur in der linken bzw. rechten Hemisphäre (► Abbildung 3.23).

Da bei den meisten Menschen die Sprache von der linken Hemisphäre gesteuert wird, konnte die linke Hemisphäre mit den Forschern kommunizieren, die rechte hingegen nicht. Kommunikation mit der rechten Hemisphäre war möglich, wenn man sie mit manuellen Aufgaben konfrontierte, die eine Identifikation, einen Vergleich oder eine Anordnung von Objekten beinhalteten – Aufgaben, die nicht den Einsatz von

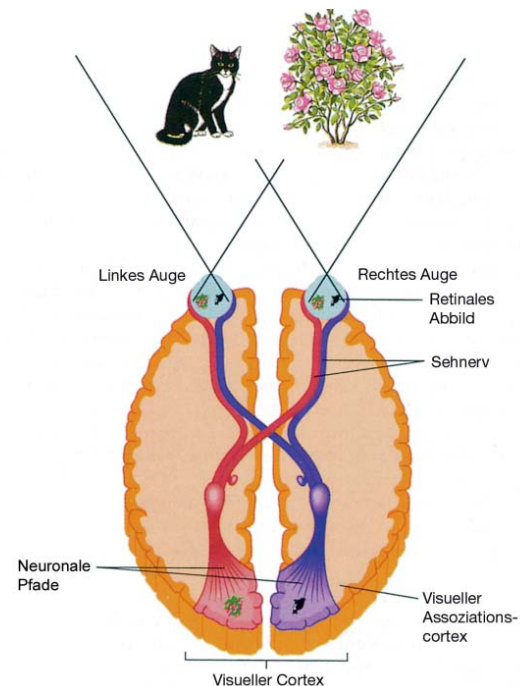


Abbildung 3.22: Die neuronalen Pfade der visuellen Informationen. Die neuronalen Pfade der visuellen Informationen, von der Innenseite (der Nase zugewandten Seite) jedes Auges kommend, kreuzen am Corpus callosum von einer Hirnseite auf die andere. Die Pfade, die Informationen von der Außenseite (der Nase abgewandten Seite) jedes Auges transportieren, kreuzen sich nicht. Eine Durchtrennung des Corpus callosum verhindert, dass Informationen, die nur im rechten Sehfeld präsentiert wurden, die rechte Hemisphäre erreichen, und die Information aus dem linken Sehfeld kann nicht in die linke Hemisphäre gelangen.

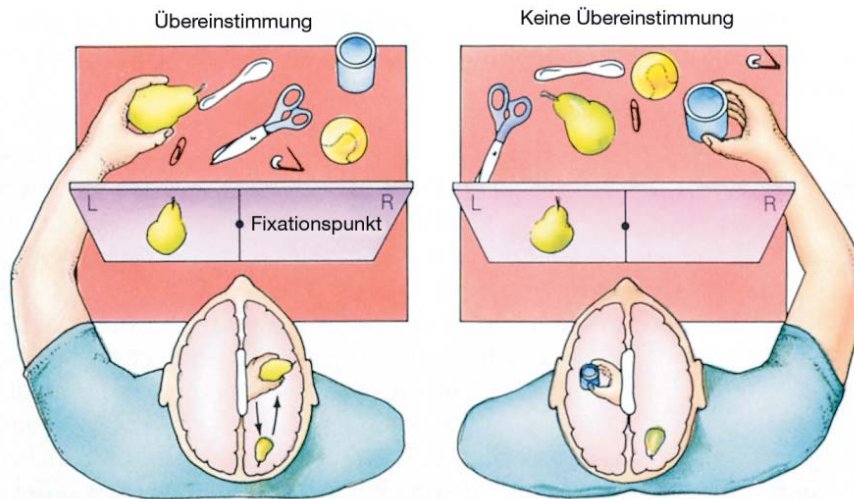


Abbildung 3.23: Koordination zwischen Auge und Hand. Die Koordination zwischen Auge und Hand ist normal, wenn ein Split-brain-Patient die linke Hand einsetzt, um ein Objekt zu finden und zu vergleichen, das im linken Sehfeld erscheint, weil beides in der rechten Hemisphäre registriert wird. Wird er jedoch aufgefordert, die rechte Hand zu benutzen, um ein im linken Sehfeld gesehenes Objekt zu vergleichen, kann er diese Aufgabe nicht lösen, weil sensorische Informationen der rechten Hand in die linke Hemisphäre projiziert werden und es keine Verbindung mehr zwischen den Hemisphären gibt. Hier wird die Tasse fälschlicherweise der Birne zugeordnet.

Sprache erforderten. Betrachten wird die folgende Demonstration eines Split-brain-Patienten, der seine linke Hirnhälfte benutzt, um die Aktivitäten seiner linken Hand zu erklären, die von seiner rechten Hirnhälfte gesteuert wird.

AUS DER FORSCHUNG

Der rechten Hemisphäre wurde eine verschneite Szene gezeigt und gleichzeitig der linken ein Bild einer Hühnerkralle. Die Person wählte aus einer Reihe von Objekten jene aus, die zu jeder dieser Szenen passten. Mit seiner rechten Hand zeigte der Patient auf einen Hühnerkopf, mit der linken auf eine Schaufel. Der Patient berichtete, dass man die Schaufel braucht, um den Hühnerstall zu reinigen (und nicht, um Schnee zu schippen). Weil die linke Hirnhälfte aufgrund der Durchtrennung des Corpus callosum nicht in das eingeweiht war, was die rechte „sah“, musste sie erklären, warum die linke Hand auf eine Schaufel zeigte, wenn das einzige Bild, das die linke Hemisphäre wahrnahm, eine Hühnerkralle war. Das kognitive System der linken Hirnhälfte lieferte eine Theorie, dem Verhalten der verschiedenen Körperteile einen Sinn zu geben (Gazzaniga, 1985).

Aus einer Vielzahl von anderen Forschungsmethoden als nur den Split-brain-Studien wissen wir, dass bei den meisten Menschen viele Sprachfunktionen in der linken Hemisphäre *lateralisiert* sind. Eine Funktion wird

als lateralisiert angesehen, wenn eine Hirnhälfte die übergeordnete Rolle bei der Ausübung dieser Funktion spielt. Der Umgang mit Sprache – die Fähigkeit, zusammenhängend zu sprechen – ist vielleicht die am stärksten lateralisierte Funktion. Neurowissenschaftler fanden heraus, dass bei nur etwa 5 Prozent der Rechtshänder und 15 Prozent der Linkshänder Sprache von der rechten Hemisphäre gesteuert wird, während bei weiteren 15 Prozent der Linkshänder Sprachprozesse in beiden Hemisphären ablaufen (Rasmussen & Milner, 1977). Daher ist Sprache bei den meisten Menschen eine linkshemisphärische Funktion. Daraus folgt, dass eine Schädigung der linken Hemisphäre bei den meisten Menschen Sprachstörungen verursacht. Interessant ist, dass bei Menschen, die sich mithilfe einer Gebärdensprache – einem syntaktisch geregelten System komplizierter Handpositionen und Handbewegungen zur Vermittlung von Bedeutungen – verständigen, eine linksseitige Hirnschädigung eine ähnlich stark beeinträchtigende Wirkung hat (Corina & McBurney, 2001; Hickok et al., 2002). Was lateralisiert ist, ist folglich nicht Sprache als solche, sondern die Fähigkeit, eine Folge von – verbalen oder manuellen – Gesten zu produzieren, die kommunikative Bedeutung tragen.

Man darf nicht den Schluss ziehen, dass die linke Hemisphäre irgendwie „besser“ sei als die rechte. Forscher haben die Annahme vertreten, dass die beiden Hemisphären dieselbe Information auf verschiedene Weise – sozusagen stilistisch unterschiedlich – verar-



Wie haben Untersuchungen über Menschen, die sich einer Gebärdensprache bedienen, die Auffassungen der Forscher über die Lateralisation von Hirnfunktionen beeinflusst?

beiten. Die linke Hemisphäre scheint *analytischer* zu sein: Sie verarbeitet Informationen Stück für Stück. Die rechte Hemisphäre scheint *holistischer* zu arbeiten: Sie verarbeitet Informationen unter Berücksichtigung globaler Muster. Es ist das gemeinsame Agieren beider Hemisphären – jede mit ihrem besonderen Bearbeitungsstil –, das unser Erleben reich werden lässt. Nicht überraschend ist beispielsweise, dass die linke Hemisphäre mit ihrem „Augenmerk“ auf kleine Details eine

Schlüsselrolle bei den meisten Formen der Problemlösung spielt. Die Funktion der rechten Hemisphäre jedoch tritt mehr in Erscheinung, wenn Probleme kreative Lösungen oder plötzliche Geistesblitze erfordern – die rechte Hemisphäre hilft, ausgedehnter im Gedächtnis zu suchen, was bei diesen Arten von Problemen nötig ist (Bowden & Beeman, 1998). (Wenn Sie Ihre rechte Hemisphäre zum Einsatz bringen wollen, versuchen Sie doch, einige der Aufgaben in Kapitel 8 zu lösen).

Wir haben uns jetzt einen Überblick über die vielen wichtigen Strukturen unseres Nervensystems verschafft. Betrachten wir nun das endokrine System, ein System unseres Körpers, das bei der Regulation der Körperfunktionen eng mit dem Nervensystem zusammenarbeitet.

3.3.5 Das endokrine System

Der menschliche Genotyp spezifiziert ein zweites, hoch komplexes Regulationssystem, das **endokrine System**, um die Arbeit des Nervensystems zu unterstützen. Das endokrine System ist ein Netzwerk von Drüsen, das chemische Botenstoffe, die **Hormone**, synthetisiert und in die Blutbahn entlässt (► Abbildung 3.24). Hormone sind für das tägliche Funktio-

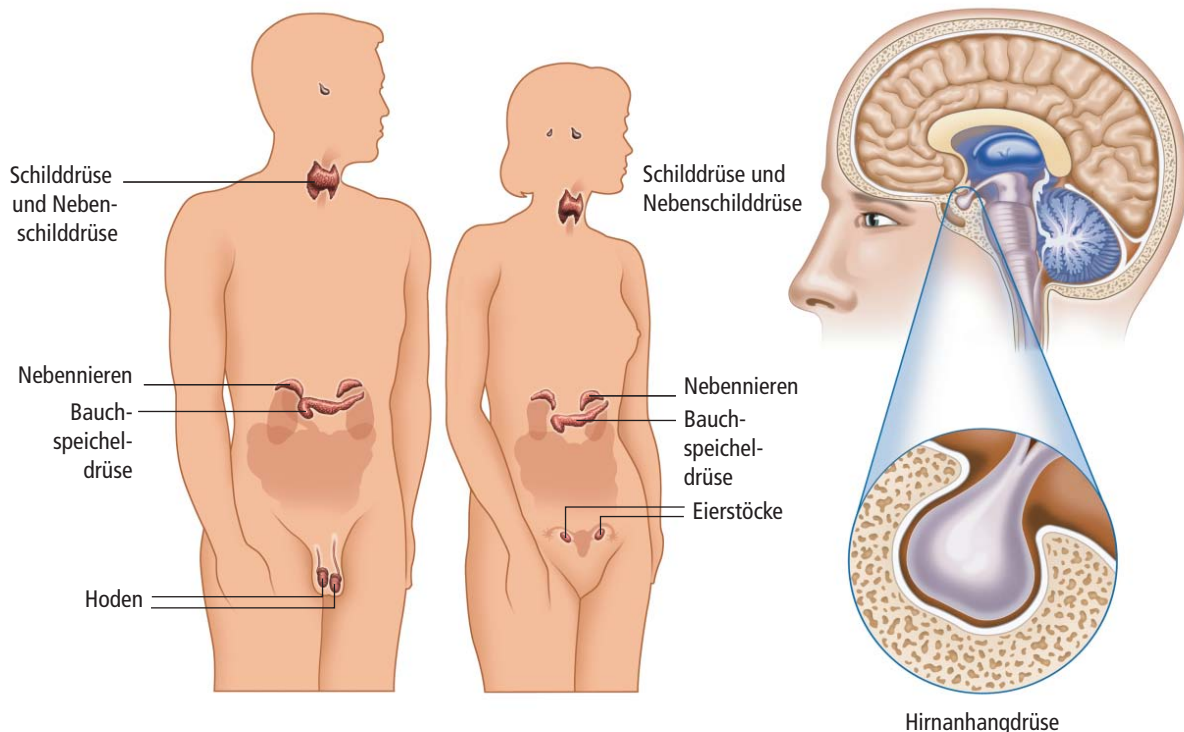


Abbildung 3.24: Die endokrinen Drüsen von Frauen und Männern. Die Hirnanhangdrüse ist ganz rechts abgebildet; sie ist die Steuerzentrale, welche die Drüsen auf der linken Seite der Abbildung reguliert. Die Hirnanhangdrüse wird vom Hypothalamus kontrolliert, einer wichtigen Struktur des limbischen Systems.

nieren wichtig, wobei sie in einigen Lebensphasen und in einigen Situationen wichtiger sind als in anderen. Hormone beeinflussen unser Körperwachstum. Sie initiieren, erhalten und beenden die Entwicklung von primären und sekundären Geschlechtsmerkmalen; sie beeinflussen Erregungsniveau und Bewusstsein; sie dienen als Basis für Stimmungsschwankungen und sie regulieren den Stoffwechsel, das Ausmaß, in dem der Körper seine Energiereserven einsetzt. Das endokrine System fördert das Überleben des *Organismus*, indem es beim Kampf gegen Infektionen und Krankheiten hilft. Es begünstigt über die Regulation des Sexualtriebs, die Produktion von Fortpflanzungszellen und die Produktion von Milch bei stillenden Müttern das Überleben der *Spezies*. Wir können also nicht ohne ein effektives endokrines System überleben.

Endokrine Drüsen reagieren auf die Konzentration von chemischen Stoffen im Blut oder werden von anderen Hormonen oder von Nervenimpulsen aus dem Gehirn angeregt. Dann werden Hormone in das Blut abgesondert und wandern zu mitunter weit entfernten Zielzellen, die mit spezifischen Rezeptoren ausgestattet sind; Hormone üben ihren Einfluss auf die chemische Regulation des Körpers nur an den Stellen aus, die genetisch dazu bestimmt sind, auf sie anzusprechen. Durch das Beeinflussen unterschiedlicher, aber spezifischer Zielorgane oder Gewebestrukturen können Hormone eine enorme Bandbreite an biologischen Prozessen steuern. Dieses vielfältig agierende Kommunikationssystem ermöglicht die Kontrolle langsamer, kontinuierlicher Prozesse wie der Aufrechterhaltung des Blutzuckerspiegels und des Kalziumspiegels, des Kohlenhydratstoffwechsels und des allgemeinen Körperwachstums. Doch was passiert in Krisenzeiten? Das endokrine System entlässt auch das Hormon Adrenalin in die Blutbahn; Adrenalin mobilisiert unseren Körper, so dass wir schnell auf Herausforderungen reagieren können.

Wie wir schon erwähnten, dient die Hirnstruktur des *Hypothalamus* als Schaltstelle zwischen dem endokrinen System und dem zentralen Nervensystem. Spezialisierte Zellen im Hypothalamus erhalten Botschaften von anderen Zellen mit dem Befehl, eine Reihe verschiedener Hormone an die Hirnanhangdrüse zu senden, wo sie die Freisetzung von anderen Hormonen stimulieren oder hemmen. Hormone werden in unterschiedlichen Körperregionen gebildet. Diese „Produktionsstätten“ erzeugen eine Vielzahl von Hormonen, und jedes von ihnen reguliert unterschiedliche Prozesse des Körpers, wie ► Tabelle 3.1 zeigt. Betrachten wir den bedeutendsten dieser Prozesse.

Die **Hirnanhangdrüse** wird oft als „wichtigste aller Drüsen“ bezeichnet, weil sie etwa zehn verschiedene Arten von Hormonen produziert, welche die Sekrete aller anderen endokrinen Drüsen beeinflussen. Darüber hinaus erzeugt die Hirnanhangdrüse ein Hormon, welches das Wachstum beeinflusst. Das Fehlen dieses Wachstumshormons hat Kleinwüchsigkeit zur Folge; ein Überschuss führt zu Riesenwuchs. Beim Mann aktivieren die Sekrete der Hirnanhangdrüse die Testikel zur Absonderung von **Testosteron**, das die Produktion von Spermien stimuliert. Die Hirnanhangdrüse ist des Weiteren an der Entwicklung von männlichen sekundären Geschlechtsmerkmalen wie dem Bartwuchs, dem Stimmbruch und der körperlichen Reife beteiligt. Testosteron kann sogar den Aggressions- und Sexualtrieb steigern. Bei der Frau stimuliert ein Hormon der Hirnanhangdrüse die Produktion von **Östrogen**, das für die hormonelle Kettenreaktion essenziell ist, welche die Freisetzung von Eizellen aus den Eierstöcken der Frau anregt und die Frau fruchtbar macht. Diverse Antibabypillen wirken, indem sie die Mechanismen in der Hirnanhangdrüse blockieren, die diesen Hormonfluss kontrollieren, und verhindern so einen Eisprung.

3.3.6 Plastizität und Neurogenese: Unser Gehirn verändert sich

Sie haben jetzt eine gute allgemeine Vorstellung davon, wie das Nervensystem arbeitet: Zu jedem Zeitpunkt kommunizieren Millionen von Neuronen miteinander, um Körper und Geist am Laufen zu halten. Was das Gehirn aber noch interessanter macht, ist eine Folge all dieser neuronalen Kommunikation: Das Gehirn selbst verändert sich im Laufe der Zeit. Wollen Sie sich einen Moment Zeit nehmen, um Ihr Gehirn zu verändern? Blättern Sie ein paar Seiten zurück und lernen Sie die Definition von *Aktionspotenzial* auswendig. Wenn Sie das – oder das Lernen einer beliebigen anderen Information – geschafft haben, dann haben Sie bereits eine Modifikation Ihres Gehirns verursacht. In der Forschung werden Änderungen in der Hirnleistung als **Plastizität** bezeichnet. Ein Großteil der neurowissenschaftlichen Forschung befasst sich mit den physischen Grundlagen der Plastizität. So wird beispielsweise untersucht, wie ein Lerneffekt aus der Bildung neuer Synapsen oder aus der Veränderung der Kommunikation über bestehende Synapsen resultiert (Baudry et al., 1999).

Weil die Hirnplastizität von der Lebenserfahrung abhängt, wird es Sie nicht überraschen, dass Gehirne

Tabelle 3.1

Die wichtigsten endokrinen Drüsen und die Funktionen der Hormone, die sie produzieren

Diese Drüsen ...	produzieren Hormone, die Folgendes regulieren:
Hypothalamus	Freisetzung der Hormone der Hirnanhangdrüse
Vordere Hirnanhangdrüse	Hoden und Eierstöcke Milchproduktion Stoffwechsel Stressreaktionen
Hintere Hirnanhangdrüse	Wasserhaushalt Milchfluss Kontraktion des Uterus (Wehen)
Schilddrüse	Stoffwechsel Wachstum und Entwicklung
Nebenschilddrüse	Kalziumspiegel
Darm	Verdauung
Bauchspeicheldrüse (Pankreas)	Glukosestoffwechsel
Nebennieren	Kampf- oder Fluchtreaktionen Stoffwechsel Sexuelle Begierde bei Frauen
Eierstöcke	Entwicklung weiblicher Geschlechtsmerkmale Eizellenproduktion
Hoden	Entwicklung männlicher Geschlechtsmerkmale Spermienproduktion Sexuelle Begierde bei Männern

verschiedene Umgebungen und Aktivitäten widerspiegeln. Eine Forschungsrichtung, die von **Mark Rosenzweig** begründet wurde, zeigt, welche Konsequenzen das Aufwachsen von Ratten in reizarmen oder reizangereicherten Umgebungen hat (für einen Überblick siehe Rosenzweig, 1996, 1999). Frühe Versuche zeigten einen Vorteil für Jungtiere: Der Cortex von Ratten, die in Umgebungen mit vielen Reizen aufwuchsen, war im Durchschnitt schwerer und dicker – positive Attribute – als der ihrer reizarm aufgewachsenen Geschwister. Die Forschung hat gezeigt, dass die Menge an Umgebungsreizen auch auf das Gehirn ausgewachsener Ratten noch Einfluss hat.

AUS DER FORSCHUNG

25 männliche Ratten aus demselben Wurf wurden in ihren ersten 120 Lebenstagen in kleinen Gruppen gehalten – nach dieser Zeitspanne sind die Ratten ausgewachsen. Danach wurden sie in eine von drei Umgebungen verlegt. In der

komplexen Umgebung waren die Ratten zusammen in einem Käfig untergebracht, „der mit einer Auswahl von Gegenständen wie Schaukeln, Holzklötzen, Spielzeugautos, Plastiktunnels und Spiegeln gefüllt war“ (Briones et al., 2004, S. 131). In der inaktiven Umgebung waren die Ratten einzeln in ansonsten leeren Käfigen untergebracht. In der sozialen Umgebung lebten die Ratten zu zweit in ansonsten leeren Käfigen. Nach 30 Tagen untersuchten die Experimentatoren den Effekt der Umgebungen auf die Neuronen im visuellen Cortex. Die Analysen zeigten, dass die Ratten aus der komplexen Umgebung 21 Prozent mehr Synapsen pro Neuron aufwiesen als die Ratten aus der sozialen Umgebung und 27 Prozent mehr als die isolierten Ratten. Diese Ergebnisse bestätigen, dass reizangereicherte Umgebungen auch im Gehirn von ausgewachsenen Ratten noch Veränderungen hervorrufen.

Mithilfe bildgebender Verfahren ist es möglich, sehr spezifische Unterschiede im Gehirn zu messen, die mit der individuellen Lebenserfahrung in Zusammenhang ste-

hen. Man denke an Musiker, die Geige spielen. Sie müssen die Finger ihrer linken Hand mit höchster Genauigkeit kontrollieren können. In Abbildung 3.20 sahen wir, dass ein beträchtlicher Teil des sensorischen Cortex für die Finger zuständig ist. Aufnahmen des Gehirns zeigen, dass die Repräsentation der Finger der linken Hand bei Geigern im Vergleich zu nicht Geigenspielenden Menschen sogar noch verstärkt ist (Elbert et al., 1995). Eine solche Verstärkung findet man nicht für die Finger der rechten Hand, die beim Geigenspiel keine derart große sensorische Rolle besitzt. Die verbesserte Repräsentation der Finger der linken Hand war bei denjenigen Geigern am größten, die das Instrument vor ihrem 12. Lebensjahr erlernten.

Ein wichtiger Aspekt der Plastizitätsforschung betrifft Fälle, in denen Menschen oder Tiere durch Schlaganfälle, degenerative Krankheiten oder Unfälle Hirn- oder Rückenmarksschäden erlitten haben. Es gibt hinreichend klinische Beweise dafür, dass sich das Gehirn manchmal selbst heilen kann. Zum Beispiel genesen Schlaganfallpatienten, die das Sprechvermögen verloren haben, im Laufe der Zeit oft wieder. In manchen Fällen verbleibt dem geschädigten Hirnareal genug Restkapazität, um eine Erholung zu ermöglichen; in anderen Fällen übernehmen andere Hirnareale die Funktionen des geschädigten Bereichs (Kuest & Karbe, 2002). Die Forschung hat inzwischen auch mit der Entwicklung von Verfahren begonnen, die das Gehirn in seinem Heilungsprozess unterstützen. In den letzten Jahren konzentriert sich die Aufmerksamkeit dabei auf *Stammzellen* – unspezialisierte Zellen, die unter den richtigen Bedingungen dazu gebracht werden können, als neue Neuronen zu fungieren (Kintner, 2002; Wilson & Edlund, 2001). Es besteht die Hoffnung, dass Stammzellen letztlich dazu dienen können, geschädigtes Gewebe im Nervensystem durch nachwachsendes neuronales Gewebe zu ersetzen. Weil die flexibelsten Stammzellen aus Embryonen und abgetriebenen Föten stammen, ist die Stammzellenforschung allerdings politisch umstritten. Forscher sind indes überzeugt, dass die Stammzellenforschung sogar zu Heilverfahren für Lähmungen und andere tiefgreifende Fehlfunktionen des Nervensystems führen könnte. Deshalb ist die *scientific community* sehr daran interessiert, einen Weg zu finden, diese Forschung im Rahmen eines gesellschaftlichen Konsenses fortzusetzen.

Die Erforschung der Heilungsprozesse im Gehirn hat in den letzten Jahren durch neue Daten Auftrieb erhalten. Diese Daten legen nahe, dass **Neurogenese** – die Produktion neuer Gehirnzellen aus natürlichen Stammzellen – auch in den Gehirnen adulter Säuge-

tiere einschließlich des Menschen stattfindet (Gould & Gross, 2002; Gross, 2000). Fast einhundert Jahre lang ist die Neurologie davon ausgegangen, dass im erwachsenen Säugerhirn keine Neuronen nachwachsen – alles, was sich in der adulten Phase ereignen könne, sei das Absterben von Neuronen. Diese Ansicht ist durch das neue Datenmaterial in Frage gestellt worden. Erinnern wir uns beispielsweise daran, dass wir den Hippocampus als eine wichtige Struktur für die Aneignung bestimmter Arten von Gedächtnisinhalten identifiziert haben. Nachdem die Forschung inzwischen Neurogenese im Hippocampus bei Erwachsenen belegt hat, wird jetzt versucht, die Rolle neu entstandener Neuronen beim Erhalt dauerhafter Zugänglichkeit von Gedächtnisspuren zu verstehen (Kempermann, 2002).

In diesem Kapitel haben wir einen kurzen Blick in das wundervolle Anderthalb-Kilo-Universum geworfen, das unser Gehirn ist. Es ist eine Sache, zu erkennen, dass Verhalten und geistige Vorgänge vom Gehirn kontrolliert werden, aber eine ganz andere, zu verstehen, wie es das eigentlich anstellt. Die Neurowissenschaft untersucht die faszinierende Wechselwirkung von Gehirn, Verhalten und Umwelt. Sie haben jetzt das Hintergrundwissen, um neue Forschungsergebnisse würdigen zu können.

ZWISCHENBILANZ

- 1 Welche Vorteile hat fMRT gegenüber anderen bildgebenden Verfahren in der Hirnforschung?
- 2 Aus welchen zwei Hauptbestandteilen besteht das autonome Nervensystem?
- 3 Welche Hauptfunktionen hat die Amygdala?
- 4 Welche Verarbeitungsweisen zeigen die beiden Hirnhemisphären?
- 5 Warum wird die Hirnanhangdrüse oft als „wichtigste aller Drüsen“ bezeichnet?
- 6 Was ist Neurogenese?

KRITISCHES DENKEN: Warum haben die Experimentatoren bei der Plastizitätsstudie an adulten Ratten sowohl eine inaktive als auch eine soziale Kontrollgruppe eingesetzt?

PSYCHOLOGIE IM ALLTAG

Warum beeinflusst Musik, wie man sich fühlt?



Angenommen, Sie sitzen im Kino und sehen sich eine Komödie an. Sehr wahrscheinlich wird im Soundtrack aufmunternde und lebhaftere Musik vorkommen – Musik, die man als „fröhlich“ bezeichnen könnte. In Saal 2 wird ein Drama von „trauriger“ Musik begleitet. Der Horrorfilm in Saal 3 benutzt Musik, um ängstliche Spannung zu erzeugen. Hat Musik wirklich Auswirkungen auf unsere Emotionen? Die Forschung sucht die Antwort auf diese Frage im Gehirn.

Wie wir in Kapitel 12 sehen werden, hat es wesentliche Fortschritte im Verständnis des Verhältnisses zwischen Hirnaktivität und Gefühlen gegeben. Diese Ergebnisse bieten einen Hintergrund für die Untersuchung der Wirkung von Musik auf das Gehirn. Wir wissen zum Beispiel, dass angenehme und unangenehme Bilder unterschiedliche Aktivitätsmuster im Gehirn auslösen (Davidson et al., 2000). Beim Betrachten angenehmer Reize zeigt das Gehirn vergleichsweise mehr Aktivität im präfrontalen Cortex (dem vorderen Bereich der Frontallappen) der linken Hirnhälfte; unangenehme Stimuli lösen dagegen stärkere Aktivität in der entsprechenden Region der rechten Hirnhälfte aus. Folgt Musik demselben Schema? Um dies herauszufinden, zeichneten Forscher EEG-Daten von Studierenden auf, die sich angenehme (lebhaft und fröhlich) oder unangenehme (unheimlich oder traurig) Musik anhörten (Schmidt & Trainor, 2001). Die Musikstücke erzeugten dieselben Asymmetrien in der Gehirnaktivität wie sie für andere Stimuli gefunden wurden. Diese Ergebnisse zeigen, dass beispielsweise fröhliche Musik einen glücklich stimmt, weil sie dieselben Hirnareale aktiviert wie andere Reize, die Glücksgefühle auslösen.

Aber welche Bestandteile der Musik lassen sie eigentlich fröhlich oder traurig klingen? Ein wichtiger Unterschied ist das *Tempo*: Schnellere Musik wirkt im Allgemeinen fröhlicher als langsame. Um die Auswirkungen verschiedener Tempi zu erfassen, werteten die Experimentatoren wieder die EEG-Auf-

zeichnungen Musik hörender Studierenden aus. In diesem Fall waren die Musikstücke entweder relativ schnell oder relativ langsam (Tsang et al., 2001). Auch hier zeigte das Gehirn eine asymmetrische Aktivität. In einer Entsprechung zu den früheren Ergebnissen ergab ein „fröhlicheres“ Tempo höhere Aktivität im linken Frontalcortex, während „traurigeres“ Tempo vergleichsweise stärkere Aktivität in der rechten Hirnhälfte auslöste.

Betrachten wir noch einen weiteren Aspekt von Emotion und Musik. Haben Sie jemals Musik gehört, die so schön war, dass sie davon eine Gänsehaut bekamen? Um dieses Phänomen zu erforschen, baten die Forscher zehn Studierende, ihre eigene „Gänsehaut-Musik“ ins Labor mitzubringen (Blood & Zatorre, 2001). Während die Probanden abwechselnd ihrer Lieblingsmusik und neutralen Musikstücken lauschten, wurden sowohl ihre physiologische Erregung (z.B. Herzfrequenz und Atmung) als auch die Hirnaktivität (mit PET-Scans) überwacht. Die physiologischen Daten bestätigten die Realität der Gänsehaut: Gegenüber dem Hören neutraler Musik war die Herz- und Atemfrequenz beim Hören der Lieblingsmusik erhöht. Die PET-Scans zeigten, dass die Gänsehautempfindung von verstärkter Hirnaktivität in Bereichen begleitet war, die angenehme emotionale Erregung signalisieren – je intensiver die Gänsehaut, desto aktiver wurden diese Areale. Die Forscher erklärten die Bedeutung dieser Ergebnisse: „Die Musik bedient sich neuronaler Belohnungs- und Emotionsmechanismen ähnlich derer, die speziell auf biologisch relevante Stimuli reagieren, wie etwa Nahrung und Sex, und derer, die künstlich durch Drogen aktiviert werden. Das ist recht bemerkenswert, weil Musik weder für das biologische Überleben oder für die Fortpflanzung notwendig, noch eine pharmakologische Substanz ist“ (S. 11823).

Wenn Ihnen das nächste Mal Musik einen Schauer über den Rücken jagt, denken Sie daran, wie Ihr Gehirn genau beteiligt ist.

Z U S A M M E N F A S S U N G

Vererbung und Verhalten

- Arten entstehen und verändern sich mit der Zeit aufgrund der natürlichen Selektion.
- Bei der Evolution des Menschen waren der aufrechte Gang auf zwei Beinen und die Ausbildung des Großhirns für anschließende Fortschritte wie Sprache und Kultur verantwortlich.
- Die Basiseinheit der Vererbung ist das Gen. Gene legen das Ausmaß der Auswirkungen fest, die Faktoren der Umwelt auf die Ausbildung phänotypischer Merkmale haben können.

Das Nervensystem in Aktion

- Das Neuron, die Basiseinheit des Nervensystems, empfängt, verarbeitet und überträgt Informationen auf andere Zellen, Drüsen und Muskeln.
- Neurone übertragen Informationen von den Dendriten über den Zellkörper (Soma) und das Axon hin zu den Endknöpfchen.
- Sensorische Neurone erhalten von speziellen Rezeptorzellen Botschaften und senden sie an das ZNS. Motorneurone leiten Botschaften vom ZNS zu Muskeln und Drüsen. Interneurone übertragen Informationen von sensorischen Neuronen auf andere Interneurone oder auf Motorneurone.
- Überschreitet einmal die Summe der Inputs eines Neurons eine spezifische Schwelle, wird ein Aktionspotenzial das Axon entlang bis hin zum Endknöpfchen gesendet.
- Alles-oder-Nichts-Aktionspotenziale werden erzeugt, wenn die Öffnung der Ionenkanäle einen Austausch von Ionen durch die Zellmembran hindurch ermöglicht.
- Neurotransmitter werden in den synaptischen Spalt zwischen Neuronen ausgeschüttet. Diffundieren sie durch den Spalt, binden sie an die Rezeptormoleküle der postsynaptischen Membran.
- Ob diese Neurotransmitter die Membran erregen oder hemmen, hängt von der Beschaffenheit der Rezeptormoleküle ab.

Biologie und Verhalten

- Neurowissenschaftler setzen verschiedene Methoden zur Erforschung der Beziehung zwischen Ge-

hirn und Verhalten ein: Sie untersuchen Patienten mit Hirnschädigungen, sie erzeugen Läsionen an bestimmten Stellen im Gehirn, sie stimulieren das Gehirn elektrisch, sie zeichnen Hirnaktivität auf und sie erzeugen am Computer Bilder vom Gehirn.

- Hirn und Rückenmark bilden das Zentralnervensystem (ZNS).
- Das periphere Nervensystem (PNS) besteht aus allen Neuronen, die das ZNS mit dem Körper verbinden. Das PNS setzt sich aus dem somatischen Nervensystem, das die Skelettmuskulatur des Körpers steuert, und dem autonomen Nervensystem (ANS), das lebenserhaltende Prozesse reguliert, zusammen.
- Das Hirn besteht aus drei integrierten Schichten: dem Hirnstamm, dem limbischen System und dem Großhirn.
- Der Hirnstamm ist für Atmung, Verdauung und Herzschlag verantwortlich.
- Das limbische System ist an Langzeitgedächtnis, Aggression, Essen, Trinken und Sexualverhalten beteiligt.
- Das Großhirn kontrolliert höhere mentale Funktionen.
- Einige Funktionen sind auf eine Hemisphäre des Gehirns lateralisiert. Bei den meisten Menschen sitzt beispielsweise die Sprache in der linken Hemisphäre.
- Obwohl die beiden Hemisphären reibungslos zusammenarbeiten, verkörpern sie typischerweise unterschiedliche Verarbeitungsstile: Die linke Hemisphäre arbeitet eher analytisch, die rechte eher holistisch.
- Das endokrine System produziert Hormone und entlässt sie in die Blutbahn.
- Hormone tragen dazu bei, Wachstum, primäre und sekundäre Geschlechtsmerkmale, Stoffwechsel, Verdauung und Erregungsniveau zu regulieren.
- Das Wachstum neuer Zellen und Lebenserfahrungen beeinflussen die Umbildung des Gehirns nach der Geburt.

Z U S A M M E N F A S S U N G

SCHLÜSSELBEGRIFFE

Aktionspotenzial (S. 78)	Hirnanhangdrüse (S. 99)
Alles-oder-Nichts-Gesetz (S. 78)	Hirnstamm (S. 92)
Amygdala (S. 93)	Homöostase (S. 93)
Assoziationscortex (S. 95)	Hormone (S. 98)
Auditorischer Cortex (S. 95)	Hypothalamus (S. 93)
Autonomes Nervensystem (ANS) (S. 89)	Inhibitorischer Input (S. 77)
Axon (S. 75)	Interneurone (S. 76)
Broca-Areal (S. 84)	Ionenkanäle (S. 78)
Brücke (Pons) (S. 92)	Läsionen (S. 85)
Cerebellum (Kleinhirn) (S. 92)	Limbisches System (S. 92)
Cerebrale Hemisphären (S. 93)	Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) (S. 87)
Cerebraler Cortex (Großhirnrinde) (S. 93)	Medulla oblongata (S. 92)
Cerebrum (Großhirn) (S. 93)	Motorischer Cortex (S. 94)
Corpus callosum (S. 93)	Motorneurone (S. 76)
Dendriten (S. 75)	Natürliche Selektion (S. 67)
DNS (Desoxyribonukleinsäure) (S. 72)	Neurogenese (S. 101)
Elektroenzephalogramm (EEG) (S. 87)	Neuromodulator (S. 83)
Endknöpfchen (S. 76)	Neuron (S. 75)
Endokrines System (S. 98)	Neurotransmitter (S. 80)
Erblichkeit (S. 72)	Neurowissenschaft (S. 75)
Evolutionäre Psychologie (S. 74)	Okzipitallappen (S. 93)
Exzitatorischer Input (S. 77)	Östrogen (S. 99)
Formatio reticularis (S. 92)	Parasympathisches Nervensystem (S. 90)
Frontallappen (S. 93)	Parietallappen (S. 93)
Funktionale MRT (fMRT) (S. 87)	Peripheres Nervensystem (PNS) (S. 98)
Gene (S. 72)	Phänotyp (S. 69)
Genetik (S. 71)	Plastizität (S. 99)
Genom (S. 72)	Positronen-Emissions-Tomographie (S. 87)
Genotyp (S. 69)	Refraktärphase (S. 79)
Geschlechtschromosomen (S. 72)	Repetitive transkraniale Magnetstimulation (rTMS) (S. 85)
Gliazellen (S. 76)	Ruhepotenzial (S. 78)
Großhirn (S. 93)	Sensorische Neurone (S. 76)
Hippocampus (S. 92)	

Soma (S. 75)

Somatisches Nervensystem (S. 89)

Somatosensorischer Cortex (S. 94)

Soziobiologie (S. 74)

Sympathisches Nervensystem (S. 90)

Synapse (S. 80)

Synaptische Übertragung (S. 80)

Temporallappen (S. 93)

Testosteron (S. 99)

Thalamus (S. 92)

Vererbung (S. 71)

Verhaltensgenetik (S. 72)

Visueller Cortex (S. 95)

Zentrales Nervensystem (ZNS) (S. 88)



Übungsaufgaben, Lösungen und weitere Informationen zu diesem Buchkapitel finden Sie auf der Companion-Website unter <http://www.pearson-studium.de>