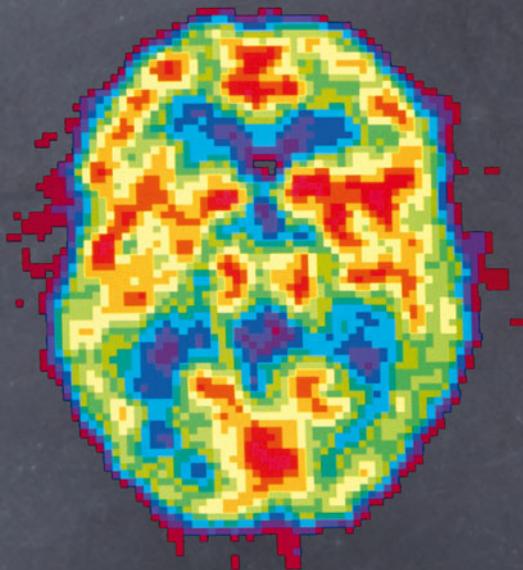


# Hirnforschung



Spektrum  
AKADEMISCHER VERLAG

Sachbuch

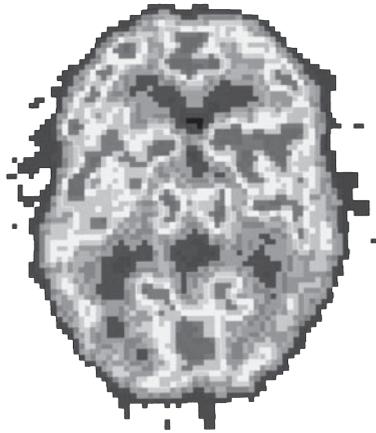
Moheb Costandi

**50** **schlüssel**  
**ideen**

Moheb Costandi

50 Schlüsselideen

# Hirnforschung



Aus dem Englischen übersetzt von Monika Niehaus



**Springer** Spektrum

# Inhalt

Einleitung 3

## **STRUKTUR UND FUNKTION DES NERVENSYSTEMS**

- 01 Das Nervensystem 4
- 02 Die Neuronenlehre 8
- 03 Gliazellen 12
- 04 Der Nervenimpuls 16
- 05 Synaptische Übertragung 20
- 06 Sensorische Wahrnehmung 24
- 07 Bewegung 28
- 08 Topografische Kartierung 32
- 09 Spezialisierte Hirnregionen 36
- 10 Asymmetrie des Gehirns 40

## **UNSER GEHIRN, UNSER ICH**

- 11 Spiegelneurone 44
- 12 Das Konnektom 48
- 13 Verkörperte Kognition 52
- 14 Körperbewusstsein 56
- 15 Der freie Wille 60
- 16 Geschlechtsunterschiede 64
- 17 Persönlichkeit 68
- 18 Hirngeschädigte Patienten 72
- 19 Das Theater des Bewusstseins 76
- 20 Bewusstseinsstörungen 80

## **DENKPROZESSE**

- 21 Aufmerksamkeit 84
- 22 Arbeitsgedächtnis 88
- 23 Lernen und Gedächtnis 92
- 24 Mentale Zeitreisen 96
- 25 Gedächtnis(re)konsolidierung 100
- 26 Entscheidungsfindung 104
- 27 Belohnung und Motivation 108

- 28 Sprachverarbeitung 112
- 29 Exekutive Funktionen 116

## **DAS DYNAMISCHE GEHIRN**

- 30 Zellwanderung und axonale Wegfindung 120
- 31 Zelltod 124
- 32 Synaptisches Pruning 128
- 33 Neuroplastizität 132
- 34 Adoleszenz 134
- 35 Stress und Gehirn 138
- 36 Das alternde Gehirn 142
- 37 Neurodegeneration 146

## **DOGMENBRÜCHE**

- 38 Adulte Neurogenese 152
- 39 Epigenetik 156
- 40 Default Mode Network 160
- 41 Hirnwellenoszillationen 164
- 42 Vorhersagefehler 168

## **NEUE TECHNIKEN UND HERAUSFORDERUNGEN**

- 43 Neuronale Stammzellen 172
- 44 Hirnstimulation 176
- 45 Kognitive Verstärkung 180
- 46 Hirnscan-Verfahren 184
- 47 Gedanken entschlüsseln 188
- 48 Hirn-Computer-Schnittstellen 192
- 49 Neurowissenschaften und das Gesetz 196
- 50 Neuroethik 200

Glossar 204

Index 206

# Einleitung

Die modernen Neurowissenschaften lassen sich bis in die 1890er-Jahre zurückverfolgen, als die Hirnforscher erstmals erkannten, dass das Nervensystem wie alle anderen Gewebe aus Zellen besteht. Ein Jahrhundert später erklärte der amerikanische Präsident George W. Bush die 1990er-Jahre zur „Dekade des Gehirns“, und seitdem hat sich die Erforschung der Funktionsweise dieses außerordentlich komplexen Organs in erstaunlichem Maße beschleunigt. Manche Leute sind der Ansicht, wir hätten in den letzten zehn Jahren mehr über das Gehirn gelernt als in den 100 Jahren davor. Aber selbst dann beginnen wir gerade erst, an der Oberfläche zu kratzen, und es bleibt noch sehr viel zu erforschen.

In dieser kurzen Zeit sind zahlreiche Ideen entwickelt worden, wie das Gehirn funktioniert und wie es unsere Gedanken und Verhaltensweisen erzeugt. Einige dieser früheren Ideen, wie die Phrenologie – eine im 19. Jahrhundert populäre Lehre, die versuchte, eine Beziehung zwischen Persönlichkeitsmerkmalen und Kopfform herzustellen – übten zu ihrer Zeit großen Einfluss aus, wurden jedoch schließlich als pseudowissenschaftlich entlarvt. Andere, wie die Neuronenlehre – die Vorstellung, dass das Gehirn aus einzelnen Zellen besteht – nehmen in den modernen Neurowissenschaften noch immer eine zentrale Stellung ein.

Mit zunehmendem technischen Fortschritt und wachsendem Wissen über die Funktionsweise des Gehirns ist auch das Interesse der Öffentlichkeit an den Neurowissenschaften und der Frage gestiegen, was diese spannenden neuen Erkenntnisse für den Einzelnen bedeuten. Gleichzeitig werden Ergebnisse der Hirnforschung von den Medien häufig sensationell aufgebauscht und nicht selten falsch dargestellt.

Ebenso kursieren in der Öffentlichkeit viele fantastische Vorstellungen über das Gehirn, und einige der populäreren Beispiele – wie die Vorstellung, das linke Gehirn sei „logisch“ und das rechte Gehirn „kreativ“ – gewinnen zunehmend an Akzeptanz, vor allen im Bildungs- und Geschäftssektor.

Dieses Buch ist ein Versuch, mehr als 100 Jahre des Nachdenkens über das Gehirn zusammenzufassen. Es gibt einen Überblick über einflussreiche Ideen in den Neurowissenschaften, bringt alte Konzepte im Licht aktueller Erkenntnisse auf den neuesten Stand und stellt neue Konzepte vor, die erst vor Kurzem entwickelt wurden. Es versucht, diese Ideen korrekt und allgemeinverständlich zu erklären, die Spreu vom Weizen zu trennen und diese geheimnisvolle Substanz im Inneren unseres Kopfes zu entmystifizieren. Wo möglich, beschreibe ich, wie diese Erkenntnisse gewonnen wurden – welche Techniken dabei zum Einsatz kommen und wie Forscher ihre Ideen angesichts neuer Ergebnisse weiterentwickeln.

Manche Menschen sind überzeugt, dass ein besseres Verständnis der Funktionsweise des Gehirns Antworten auf die großen Fragen des Lebens liefern wird. Doch das wird es nicht: Die Hirnforschung kann uns nicht alles über uns selbst verraten oder uns sagen, was es bedeutet, ein Mensch zu sein. Sie bietet jedoch die Chance, Therapien für zahlreiche schwere Erkrankungen zu entwickeln, zum Beispiel Suchterkrankungen, Alzheimer, Schlaganfall oder Lähmungen. *50 Schlüsselideen Gehirn* geht auch – mit vorsichtigem Optimismus – auf diese Hoffnungen ein.

# 01 Das Nervensystem

**Das Nervensystem besteht aus zwei Hauptkomponenten. Ein Teil, das Zentralnervensystem (ZNS), setzt sich aus Gehirn und Rückenmark zusammen; es erhält Informationen vom übrigen Körper und koordiniert dessen Aktivitäten. Der andere Teil, das periphere Nervensystem, umfasst die Nerven, die den Informationsaustausch zwischen Körper und ZNS gewährleisten.**

Das menschliche Gehirn enthält viele Hundert Milliarden Zellen, die in hochgradig organisierter Weise angeordnet sind, und es heißt oft, unser Gehirn sei das komplexeste Organ im ganzen bekannten Universum – obwohl es nur rund 1,5 kg wiegt. Es besteht aus zwei Hälften oder Hemisphären, die ihre Informationen jeweils von der gegenüberliegenden Seite des Körpers erhalten. Die Großhirnrinde (Cortex cerebri), die beide Hemisphären überzieht, ist auf beiden Seiten in je vier Lappen untergliedert, die alle unterschiedliche Aufgaben erfüllen und durch tiefe Furchen, so genannte Fissuren, voneinander getrennt sind.

**Der Stirn- oder Frontallappen** übernimmt komplexe geistige Funktionen, wie logisches Denken und Entscheidungsfindung, und enthält zudem die motorischen Areale, die Willkürbewegungen planen und durchführen.

**Der Scheitel- oder Parietallappen** enthält die somatosensorischen Areale, die Berührungsinformationen aus dem Körper verarbeiten. Zudem verknüpft er verschiedene Typen sensorischer Informationen, um uns ein „Raumgefühl“ zu vermitteln – im Grunde das Wissen darüber, wie unser Körper im Raum ausgerichtet ist.

**Der Schläfen- oder Temporallappen** empfängt Informationen von den Ohren, und seine Außenfläche enthält Areale, die auf das Verstehen von Sprache spezialisiert sind. Die Innenfläche enthält den Hippocampus, der entscheidend für die Speicherung von Erinnerungen ist und zusammen mit den umliegenden Bereichen eine wichtige Rolle bei der räumlichen Orientierung spielt.

## Zeitleiste

1700 v. Chr.

Der Papyrus Edwin Smith wird verfasst; er enthält die erste Beschreibung des Nervensystems

900

Al-Razi beschreibt im *Kitab al-Hawi Fi Al Tibb* die Hirnnerven

1543

Andreas Vesalius veröffentlicht sein Werk *De humani corporis fabrica libri septem*

### Verschiedene Schichten der Komplexität

Der Cortex (lat. *cortex*, „Rinde“) ist eine stark gefaltete, dünne Gewebeschicht, die die Oberfläche des Gehirns überzieht. Er weist beim Menschen eine viel größere Oberfläche auf als bei anderen Tieren – flach ausgebreitet sind es 0,2 m<sup>2</sup>. Die starke Faltung des Cortex mit all seinen Gyri und Sulci (Windungen und Rinnen) verleiht dem Gehirn sein

vertrautes Aussehen. Der Cortex ist nur wenige Millimeter dick, umfasst aber sechs Schichten, in denen die Zellen jeweils in einheitlicher Weise angeordnet sind. Trotz dieser einheitlichen Struktur enthält der Cortex eine Vielzahl eigenständiger Areale, von denen jedes auf eine bestimmte Funktion spezialisiert ist.

**Der Hinterhaupts- oder Okzipitallappen** liegt am hinteren Hirnpol und enthält Dutzende verschiedene Bereiche, die auf die Verarbeitung und Interpretation visueller Signale spezialisiert sind.

**Im Inneren des Gehirns** Unter dem Cortex befinden sich mehrere große Ansammlungen (Cluster) von Neuronen. Der Thalamus (gr. *thalamos*, „Schlafgemach, kleines Zimmer“) liegt genau im Zentrum des Gehirns und leitet wie eine Relaisstation Informationen von den Sinnesorganen an die entsprechenden Regionen im Gehirn weiter. Rund um den Thalamus liegen die Basalganglien, mehrere Ansammlungen von Nervenzellkörpern (Kerne), die hauptsächlich für die Kontrolle von Willkürbewegungen zuständig sind. Das limbische System umfasst ebenfalls eine Reihe subcorticaler Strukturen und liegt zwischen Basalganglien und Cortex. Dieses System, das manchmal als „Reptiliengehirn“ bezeichnet wird, ist evolutionär gesehen primitiv und spielt für Emotionen, Belohnung und Motivation eine Rolle. Dazu zählen auch Hippocampus und Amygdala, die beide an der Bildung von Langzeiterinnerungen beteiligt sind.

Das Mittelhirn ist ein kleiner Bereich oberhalb des Stammhirns. Es enthält mehrere Kerne, die die Augenbewegung kontrollieren, und ist die Hauptquelle für den Neurotransmitter Dopamin. Neurone, die Dopamin produzieren, erzeugen auch das Pigment Melatonin, das einem Teil des Mittelhirns ein dunkles Aussehen verleiht. Dieser Teil wird daher als Substantia nigra („schwarze Substanz“) bezeichnet.

**1641**

Franciscus de la Boë Sylvius beschreibt die Fissur (Furche) an der Seite des Gehirns

**1664**

Thomas Willis veröffentlicht *Cerebri anatome*

**1695**

Veröffentlichung von Humphrey Ridleys *The Anatomy of the Brain*

### » Das menschliche Gehirn ... ist die komplexeste Anordnung von Materie, die wir kennen. «

Isaac Asimov, 1986

Das Rautenhirn umfasst drei Strukturen oberhalb des Rückenmarks, die gemeinsam den Hirnstamm bilden. Der untere Teil des Hirnstamms, die Medulla oblongata, kontrolliert wichtige Vitalfunktionen wie Atmung und Herzschlag und ist eng mit dem Wachbewusstsein verknüpft. Über der Medulla liegt der Pons (lat. *pons*, „Brücke“); er verbindet den Cortex mit dem Rückenmark und ist ebenfalls für das Wachbewusstsein von Bedeutung. Die dritte Komponente des Rautenhirns, das Kleinhirn oder Cerebellum, spielt für die Gleichgewichtskontrolle und die Bewegungskoordination eine wichtige Rolle. Das Kleinhirn ist für das Erlernen motorischer Fertigkeiten wie das Fahrradfahren wesentlich, aber auch mit Emotionen und Denkprozessen verknüpft.

**Hochbetrieb** Das Rückenmark im Zentrum des körpereigenen Transportnetzes ist ein riesiges Bündel von Millionen Nervenfasern, das den Informationsaustausch zwischen Gehirn und Körper sichert. Diese sehr empfindliche Struktur, die von der Wirbelsäule geschützt wird, kann gewisse Funktionen, wie den Patellarsehnenreflex, ohne „Befehl von oben“ in Eigenregie durchführen. Dieses zentrale Nervenbündel ist zudem segmentiert; in regelmäßigen Abständen treten Nerven ins Rückenmark ein und aus, und zwar in hochgradig geordneter Weise. Der Querschnitt des Rückenmarks ähnelt einer Schmetterlingsfigur.

Die Fasern der Motoneurone entspringen vorn im Rückenmark, ziehen zur Körpermuskulatur und übermitteln ihr die Anweisungen des Gehirns im Hinblick auf Willkürbewegungen. Die Axone der sensorischen Neurone hingegen transportieren Informationen vom Körper zum Rückenmark und nehmen Kontakt mit nachgeordneten Neuronen auf, die die Informationen hinauf zum Gehirn schicken. Die Axone der motorischen und der sensorischen Neurone sind in den peripheren Nerven gebündelt.

**Botenstoffe** Das periphere Nervensystem setzt sich aus allen Nerven zusammen, die aus dem Gehirn und dem Rückenmark austreten, und wird in zwei Komponenten unterteilt. Ein Teil, das somatische Nervensystem, besteht aus den motorischen und sensorischen Nervenfasern, die Informationen zwischen Körper und Rückenmark austauschen. Diese Nerven beschäftigen sich mit der bewussten Aufnahme sensorischer Empfindungen und mit Willkürbewegungen.

Die zweite Komponente, das autonome oder vegetative Nervensystem, lässt sich weiter in das sympathische und das parasympathische Nervensystem unterteilen, die komplementäre Funktionen aufweisen. Das sympathische Nervensystem verwendet den Neurotransmitter Noradrenalin, um die Herzfrequenz zu erhöhen, Pupillen und Bronchien zu erweitern und die Durchblutung des Verdauungssystems zu reduzieren. All dies bereitet den Körper auf Aktivität vor; man spricht daher auch von der Kampf-oder-Flucht-Reaktion. Das parasympathische Nervensystem dagegen benutzt den Neurotransmitter Acetylcholin, der die Pupillen und die Bronchien verengt, die Herzfrequenz senkt und die Verdauungstätigkeit steigert.

Die Hirnnerven sind ebenfalls Teil des peripheren Nervensystems. Diese Nerven treten aus dem Hirnstamm aus und übermitteln Informationen zwischen dem Gehirn und den Sinnesorganen. Der Vagusnerv, der 10. Hirnnerv, ist der längste von allen und entsendet Äste bis in Herz, Brust und Bauch.

» **Der Geist, eine geheimnisvolle Form der Materie, sezerniert vom Gehirn.** «

**Ambrose Bierce, 1911**

Worum es geht  
**Das Nervensystem ist außerordentlich komplex und hochgradig geordnet**

# 02 Die Neuronenlehre

**Die modernen Neurowissenschaften basieren weitgehend auf der Vorstellung, dass das Gehirn aus Zellen besteht. Das menschliche Gehirn setzt sich Schätzungen zufolge aus 80 bis 120 Milliarden Neuronen zusammen, die komplexe Netze zur Informationsverarbeitung bilden. Neurone (Nervenzellen), einer der beiden Typen von Hirnzellen, sind darauf spezialisiert, elektrische Signale zu erzeugen und miteinander zu kommunizieren.**

In den 1830er-Jahren entwickelten zwei deutsche Wissenschaftler die Zelltheorie, der zufolge alle Lebewesen aus Zellen bestehen. Damals war die Auflösung der Mikroskope noch zu gering, um den Aufbau des Nervensystems im Detail zu zeigen, daher war unklar, ob die Zelltheorie auch für Nervengewebe galt, und über diese Frage wurde lange diskutiert. Einige Forscher waren überzeugt, dass das Nervensystem wie andere Teile des Körpers aus Zellen bestehen müsse, doch andere vertraten die Meinung, es handele sich um ein zusammenhängendes Gewebenetz.

Mit steigender Auflösung der Mikroskope und verbesserten Färbemethoden für Gewebeschnitte konnten die Forscher immer feinere Details des Nervensystems erkennen. Ein wichtiger Fortschritt, der Camillo Golgi gelang, war die Entdeckung der so genannten „Schwarzen Reaktion“, einer Färbetechnik, bei der das Gewebe mit Kaliumbichromat und Ammoniak gehärtet und anschließend in eine Silbernitratlösung eingelegt wird. Die Schwarze Reaktion färbt nach dem Zufallsprinzip eine kleine Zahl von Neuronen in einer Gewebeprobe an; die Zellen werden in ihrer Gänze gefärbt, sodass ihre vollständige Silhouette sichtbar wird. In den 1880er-Jahren begann der spanische Neuroanatom Santiago Ramón y Cajal damit, Golgis Färbemethode einzusetzen, um Gewebe aus vielen Hirnregionen verschiedener Tierarten zu untersuchen und zu vergleichen. Cajal verbesserte die Methode, indem er seine Proben zweimal in die Lösungen tauchte. Dadurch wurden die Neurone stärker angefärbt, sodass noch mehr Einzelheiten sichtbar wurden.

## Zeitleiste

**1655**

 Robert Hooke  
entdeckt die Zellen

**1838**

 Robert Remak vermutet  
eine Verbindung zwischen  
Nervenfaser und  
Nervenzellen

**1839**

 Theodor Schwann und  
Matthias Schleiden  
entwickeln die  
Zelltheorie

**1865**

 Posthume Veröffentlichung  
von Otto Deiters Beschreibung  
von Axonen und Dendriten

**Wie der Insektenforscher auf der Jagd nach den farbenfrohen Schmetterlingen, so verfolgte mein Interesse im Blumengarten der grauen Substanz die Zellen mit feinen und eleganten Formen, die geheimnisvollen Schmetterlinge der Seele.**

**Santiago Ramón y Cajal, 1894**

Cajal kam zu dem Schluss, dass das Gehirn tatsächlich aus Zellen besteht, und auf einer Konferenz 1889 gelang es ihm, seine Kollegen davon zu überzeugen. Das war die Geburtsstunde der Neuronenlehre, die besagt, dass Neurone die Grundbausteine und Funktionseinheiten des Nervensystems sind, und Cajal und Golgi teilten sich 1906 für ihre Leistungen den Nobelpreis für Physiologie. Obgleich Golgi die Methode entwickelt hatte, die zur Entdeckung des Neurons führte, hielt er ironischerweise an der Vorstellung fest, das Nervensystem sei ein zusammenhängendes Gewebenetz. Cajal hingegen gilt heute als Vater der modernen Neurowissenschaften.

**Übermitteln von Botschaften** Das menschliche Gehirn enthält mindestens mehrere Hundert, vielleicht sogar mehrere Tausend verschiedene Neuronentypen in allen Formen und Größen, die sich jedoch anhand ihrer Funktion grob in drei Kategorien unterteilen lassen. Sensorische Neurone schicken Informationen von den Sinnesorganen zum Gehirn, Motoneurone senden Befehle an Muskeln und Organe, und Interneurone übermitteln Informationen zwischen Neuronen in lokalen Schaltkreisen oder über größere Entfernungen zwischen Neuronen in verschiedenen Hirnregionen.

Trotz dieser verwirrenden Vielfalt teilt die große Mehrheit der Neurone einige Grundmerkmale. Traditionell werden Neurone in drei Funktionseinheiten unterteilt, von denen jedes eine andere Aufgabe hat:

**Dendrit:** Die Bezeichnung leitet sich vom griechischen Wort *dendron*, „Baum“, ab; dabei handelt es sich um einen stark verzweigten Fortsatz, der aus dem Zellkörper entspringt. Dendriten bilden die Eingangs- oder Input-Einheiten des Neurons –

**1873**

Camillo Golgi entdeckt die „Schwarze Reaktion“

**1889**

Santiago Ramón y Cajal behauptet, dass das Nervensystem aus Zellen besteht

**2005**

Itzhak Fried und Kollegen entdecken die „Jennifer-Aniston“-Neurone

### Jennifer-Aniston-Zellen

Forscher haben bei der Untersuchung des Gehirns von Epileptikern, die sich einer Operation unterziehen mussten, Neurone entdeckt, die sehr spezifisch auf Bilder von Stars wie Jennifer Aniston oder Halle Berry reagieren (oder auf berühmte Sehenswürdigkeiten wie den Eiffelturm oder das Weiße Haus). Diese Zellen liegen in einem Teil des Gehirns, der Strukturen enthält, von denen wir wissen, dass sie entscheidend für das Erinnerungsvermögen sind. Anschließend entdeckten dieselben Forscher, dass diese Zellen nicht nur dann aktiviert werden, wenn die Patienten Bilder dieser Stars oder

Sehenswürdigkeiten betrachten, sondern auch dann, wenn sie nur an diese denken. Diese Entdeckungen ließen einige spekulieren, dass individuelle Zellen für die Kodierung abstrakter Konzepte verantwortlich sind. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass jede Zelle Teil eines diffus verteilten Netzes aus mehreren Millionen Neuronen ist, in dem ein solcher Gedächtniseintrag über den Star oder die Sehenswürdigkeit gespeichert ist. Jede einzelne Zelle leistet wahrscheinlich einen Beitrag zu Millionen von Netzen, die jeweils eine bestimmte Erinnerung oder ein Konzept speichern.

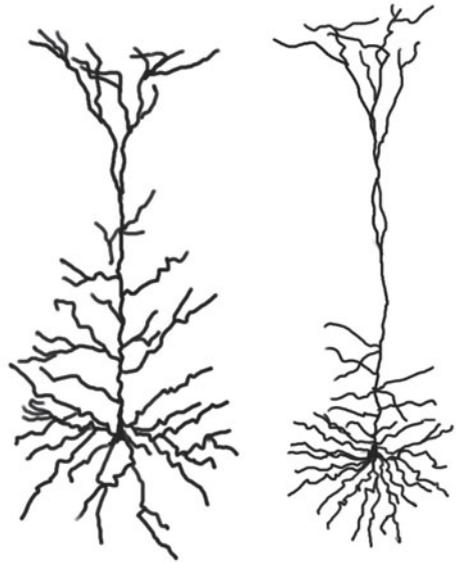
sie empfangen und verrechnen Signale von anderen Neuronen, bevor sie diese an den Zellkörper weiterleiten.

**Zellkörper (Soma):** Verrechnet die verschiedenen Signaltypen, die er von den Dendriten erhält, und erzeugt ein Ausgangssignal (Output). Zudem enthält er den Zellkern, der vollgepackt ist mit DNA – einem langen Molekül, das die Informationen für die Synthese von Tausenden von Proteinen enthält, die die Zellfunktion steuern. Jeder Neuronentyp exprimiert eine unverwechselbare Kombination von Genen, die ihm seine unverwechselbaren Merkmale verleiht.

**Axon:** Das Axon ist ein einzelner, langer Nervenfortsatz, der an einer anderen Stelle des Neurons entspringt; es bildet die Ausgangs- oder Output-Einheit des Neurons. Das Axon entspringt am Axonhügel aus dem Zellkörper; dort werden elektrische Signale generiert und über das Axon zu anderen Zellen weitergeleitet. Am Ende des Fortsatzes befinden sich die so genannten axonalen Endigungen, die sich verzweigen und den Output des Neurons an zahlreiche „Zielzellen“ übermitteln. Wir wissen jedoch inzwischen, dass in jedem Teil des Neurons elektrische Impulse erzeugt werden und in beide Richtungen wandern können.

**Bestens organisiert** Die große Mehrheit aller Neurone – rund 80 Prozent – findet sich im Kleinhirn. Die Zellen in dessen Cortex (der äußeren Schicht) sind in hochgradig, ja geradezu soldatisch geordneten Schichten angeordnet. Zwei Zelltypen in diesem Teil des Gehirns illustrieren, wie vielfältig diese Neurone sind. Purkinjezellen sind der größte Zelltyp im Gehirn. Sie sind breit, flach und außerordentlich komplex. Körnerzellen sind hingegen die kleinsten Zellen im Gehirn. Sie weisen nur einen einzigen Fortsatz auf, der sich kurz nach Verlassen des Zellkörpers in zwei Äste aufspaltet, und verlaufen senkrecht zu den Dendriten der Purkinjezellen. Jede Purkinjezelle bildet Kontakte mit rund 250 000 Körnerzellen aus.

Die Großhirnrinde besteht ebenfalls aus Schichten mit wohlgeordneten Neuronen. Pyramidenzellen, die man in allen Schichten (bis auf die äußerste) findet, bilden einen der wichtigsten Zelltypen und sind in einem regelmäßigen Muster in Gruppen (Clustern) angeordnet, die sich alle Dreißigtausendstel Millimeter wiederholen. Ihr Aussehen variiert zwischen verschiedenen Schichten und Hirnregionen, doch alle haben einen typisch pyramidenförmigen Zellkörper, stark verzweigte Dendriten und ein verzweigtes Axon, das sich bis zu Zellen in anderen Schichten des Cortex und in entfernte Hirnregionen erstreckt.



Pyramidenzellen aus verschiedenen Teilen der Großhirnrinde

Worum es geht  
**Neurone sind die Grundbausteine  
 des Nervensystems**

# 03 Gliazellen

**Neben den Neuronen enthält das Gehirn noch einen anderen Zelltyp, die Gliazellen. Lange Zeit wurden Gliazellen in der Neurowissenschaft als „Hilfszellen“ abgetan. Inzwischen wissen wir jedoch, dass Gliazellen nicht nur wichtige unterstützende Funktionen wahrnehmen, sondern darüber hinaus eine Schlüsselrolle spielen, wenn es um Entwicklung, Funktion und Erkrankungen des Gehirns geht.**

Mehr als 150 Jahre lang nahm man an, die einzige Aufgabe von Gliazellen sei es, Nervenzellen zu stützen, zu ernähren und zu schützen. Wie die moderne Forschung gezeigt hat, tragen sie jedoch auch eine Menge zur Informationsverarbeitung im Gehirn bei.

Im Gehirn übersteigt die Zahl der Gliazellen diejenige der Neurone, doch seit ihrer Entdeckung sind sie von Forschern weitgehend vernachlässigt worden. Inzwischen wird aber zunehmend deutlicher, dass wir auch sie berücksichtigen müssen, wenn wir die Funktionsweise des Gehirns verstehen wollen. Statt lediglich Hilfestellung zu leisten, spielen Gliazellen eine wichtige Rolle für die Gehirnfunktion und könnten sich als die wahren Stars der Show erweisen.

**Das Einmaleins der Gliazellen** Im Gehirn finden sich verschiedene Gliazelltypen, die allesamt spezielle Aufgaben haben:

**Astrozyten** sind sternförmige Zellen, die sich eng rund um Neuronen gruppieren. Sie versorgen Neurone mit Nährstoffen und regulieren deren chemisches Milieu, spielen aber auch eine entscheidende Rolle bei der Informationsverarbeitung.

**Ependymalzellen** kleiden die Wände der Hirnventrikel aus, produzieren Hirnrückenmarksflüssigkeit (Cerebrospinalflüssigkeit) und scheiden sie in die Ventrikel ab. Sie verfügen über haarähnliche Ausstülpungen, so genannte Cilien, die in die Ventrikel hineinragen und durch Schlägen zur Zirkulation der Cerebrospinalflüssigkeit beitragen.

## Zeitleiste

1839

Theodor Schwann beschreibt den Aufbau von peripheren Nerven und entdeckt die Schwann-Zellen

1856

Rudolf Virchow prägt den Begriff *Neuroglia*, „Nervenkit“

1896

Gheorghe Marinescu erkennt, dass Gliazellen Neurone per Phagozytose verschlingen

**Mikrogliazellen** sind die Notfalleinsatztruppe des Gehirns; sie bilden eine erste Verteidigungslinie gegen Mikroorganismen und entsorgen die Überbleibsel abgestorbener Neurone (*siehe S. 126f*).

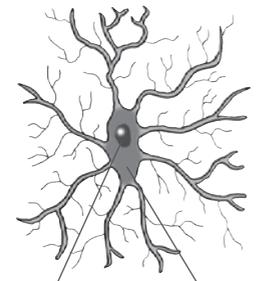
**Oligodendrozyten** erzeugen eine fetthaltige Substanz namens Myelin, die sich um die Axone wickelt, sodass Nervenimpulse effizienter weitergeleitet werden können (im peripheren Nervensystem übernehmen Schwann-Zellen diese Aufgabe).

**Radiale Gliazellen** sind nur während der Frühentwicklung des Gehirns vorhanden (*siehe Kasten*). Sie produzieren die riesige Zahl von Neuronen im Gehirn und kontrollieren deren Wanderung in die sich entwickelnde Großhirnrinde.

**Mehr als nur Leim** *Glia* stammt aus dem Griechischen und bedeutet „Leim“ – das spiegelt die Rolle wider, die diesen Zellen lange Zeit zugeschrieben wurde. In den letzten zehn Jahren hat sich jedoch herausgestellt, dass Gliazellen tatsächlich für alle Aspekte der Gehirnfunktion eine entscheidende Rolle spielen.

### Die Notfallhelfer des Gehirns

Mikroglia wird im Knochenmark gebildet; diese Zellen fungieren als Immunzellen des Gehirns. Sie patrouillieren in allen Bereichen des Gehirns und strecken ihre fingerförmigen Fortsätze ständig aus und ziehen sie wieder ein, um mögliche Anzeichen für Infektionen, Verletzungen oder Erkrankungen zu entdecken. Wenn Mikrogliazellen auf ins Gehirn eingedrungene Mikroorganismen stoßen, kriechen sie wie Amöben auf den Eindringling zu und verschlingen ihn mittels Phagozytose (wörtlich „Zellfressen“). Dabei benutzt die Mikrogliazelle ihre Zellmembran, um eine Hülle um den Eindringling zu bilden, bevor sie ihn in ihren Zellkörper schleust und zerstört. Mikroglia kommt auch bei Hirnverletzungen zum Einsatz. Die Zellen nehmen ein chemisches Stresssignal wahr, das von geschädigten und sterbenden Neuronen ausgeschickt wird, und reagieren darauf, indem sie zum Ort der Verletzung kriechen. Dort angekommen, räumen sie tote Zellen und Zelltrümmer beiseite.



Zellkern      Zellkörper

Eine Mikrogliazelle

**1920**

Pio del Rio-Hortega unterteilt Gliazellen in vier Typen

**1966**

Stephen Kuffler und Kollegen zeigen, dass Gliazellen auf Signale von Neuronen reagieren

**1970**

Pasko Rakic beschreibt die Migration von jungen Neuronen entlang radialer Gliafasern

Die Astrozyten sind beispielsweise weitaus mehr als nur Stützzellen, die die Neurone an Ort und Stelle halten. Sie bilden funktionale Netzwerke und kommunizieren via chemische Signale miteinander und mit Neuronen, was die Mechanismen der Informationsverarbeitung um eine weitere Komplexitätsstufe ergänzt. Sie leisten zudem einen wichtigen Beitrag zur Bildung von Synapsen (Kontaktstellen zwischen Neuronen) während der Embryonalentwicklung.

Diese sternförmigen Zellen kontrollieren, wie Neurone miteinander kommunizieren, und spielen daher eine entscheidende Rolle für die Synapsenfunktion im reifen Gehirn. Sie kommen in engen Kontakt mit Synapsen und umfassen sie mit fingerartigen Fortsätzen, die ihren Griff auf die Synapsen verstärken oder lockern können, um den Fluss chemischer Signale zwischen den Neuronen zu regulieren. Zudem verfügen Astrozyten über andere Fortsätze, die als Endfüßchen bezeichnet werden und sich um Kapillaren wickeln, um die Hirndurchblutung zu kontrollieren.

Astrozyten regulieren auch die so genannte synaptische Plastizität – den Prozess, durch den neuronale Verbindungen in Reaktion auf Erfahrungen stärker oder schwächer werden. Diese neu entdeckten Funktionen lassen manche Forscher vermuten, dass die einst so vernachlässigten Astrozyten entscheidend für geistige

Funktionen wie das Gedächtnis sein könnten.

Und das ist noch nicht alles. Die radialen Gliazellen spielen eine entscheidende Rolle bei der Hirnentwicklung. Im Frühstadium besteht das Nervensystem aus einem Rohr, an dessen einem Ende sich das Gehirn bildet, während am anderen das Rückenmark heranwächst. Radiale Gliazellen weisen einen einzelnen Fortsatz auf, der sich durch das Lumen des Rohrs erstreckt, und teilen sich in der Nähe der inneren Oberfläche; so produzieren sie unreife Neuronen.

Diese jungen Neuronen klettern auf die Fortsätze der radialen Gliazelle, die sie erzeugt hat, und kriechen dann in Richtung Rohroberfläche an ihm entlang. Diese „radiale Wanderung“

erfolgt in Schüben und baut so die charakteristischen Schichten des Cortex auf, die sich von innen nach außen bilden – der erste Schub auswandernder Neurone bildet die innerste Schicht des Cortex, und jeder folgende Schub wandert an der bereits gebildeten Schicht vorbei und bildet eine weitere Schicht, die näher an der Oberfläche des Rohres liegt.

**Wenn das Aufräumkommando versagt** Gliazellen sind an vielen neurologischen Störungen beteiligt. Die Multiple Sklerose etwa ist eine Erkrankung, bei der das Immunsystem irrtümlich die eigenen Oligodendrozyten angreift und damit die

**» Gliazellen spielen eine entscheidende Rolle für alle wichtigen Aspekte der Entwicklung, Funktion und Erkrankungen des Gehirns. «**

**Ben Barres,**

**amerikanischer Neurobiologe, 2008**

**› Diese verbindende Substanz ...  
ist eine Art Kitt, in den die nervösen  
Elemente eingebettet sind. ‹**

**Rudolf Virchow, 1856**

isolierende Myelinscheide zerstört, die diese produzieren. Das beeinträchtigt die Signalweiterleitung im Axon und ruft dadurch die Symptome der Krankheit hervor. Im schlimmsten Fall führt die Schädigung der Myelinisierung der peripheren Nerven zu Lähmungserscheinungen, eine Schädigung des Sehnervs hingegen zum Erblinden.

Gliazellen spielen auch bei neurodegenerativen Erkrankungen wie Alzheimer- und Parkinson-Krankheit eine Rolle. Typisch für all diese Krankheiten sind abnorm gefaltete Proteine, die als unlösliche Klumpen in oder rund um Nervenzellen abgelagert werden. Normalerweise patrouillieren Mikrogliazellen im Gehirn und räumen sämtliche Ablagerungen weg, doch neue Befunde sprechen dafür, dass es ihnen nicht gelingt, Proteinklumpen zu entsorgen, die sich im Gehirn von Patienten mit neurodegenerativen Erkrankungen ansammeln. Wie vor kurzem entdeckt wurde, sezernieren bei Menschen mit Amyotropher Lateralsklerose (ALS), einer Erkrankung der Motoneurone, mutierte Astrozyten toxische Substanzen, die die Motoneurone abtöten.

**Worum es geht**  
**Gliazellen spielen Schlüsselrollen  
für die Gehirnfunktion**

# 04 Der Nervenimpuls

**Neurone sind darauf spezialisiert, elektrische Signale zu erzeugen, die längs ihres Axons weitergeleitet werden. Diese Signale, die als Nervenimpulse oder Aktionspotenziale bezeichnet werden, werden von winzigen elektrischen Strömen durch die Membran der Nervenzelle erzeugt. Neuronen können bis zu 1000 Aktionspotenziale oder Spikes pro Sekunde erzeugen, und das Impulsmuster codiert dabei die zu übermittelnde Information.**

Nervenimpulse sind elektrische Signale, die die Axone entlang wandern und den Neuronen ermöglichen, miteinander und mit dem übrigen Körper zu kommunizieren. Die elektrischen Eigenschaften von Neuronen werden von der Zellmembran bestimmt, die aus zwei durch einen schmalen Zwischenraum getrennten Schichten besteht. Die Membran arbeitet als Kondensator, der elektrische Energie in Form von Ionen (positiv oder negativ geladenen Atomen) speichert, und als Widerstand, der den Stromfluss blockiert. Wenn sich ein Neuron im Ruhezustand befindet, lagern negativ geladene Ionen an der Innenseite und positiv geladene Ionen an der Außenseite der Membran. Diese Ladungsverteilung führt dazu, dass die Innenseite des Neurons im Vergleich zur Außenseite negativ geladen ist.

Wird ein Neuron aktiviert, sagt man, es erzeugt ein Aktionspotenzial oder einen Spike: Es „feuert“. Das geschieht in Reaktion auf Signale, die es von anderen Neuronen empfängt, und führt zu einer kurzzeitigen Umkehr der Membranspannung: Die Innenseite wird im Vergleich zur Außenseite für einen Moment positiv, bevor sich die Verhältnisse erneut umkehren und das Neuron zum Ruhezustand zurückkehrt. Während ein Neuron feuert, können gewisse Ionenarten die Membran in der einen oder anderen Richtung passieren. Da Ionen elektrisch geladen sind, stellt ihre Bewegung einen Stromfluss durch die Membran dar.

## Zeitleiste

**1791**

Luigi Galvani untersucht Bioelektrizität an Froschbeinen

**1848**

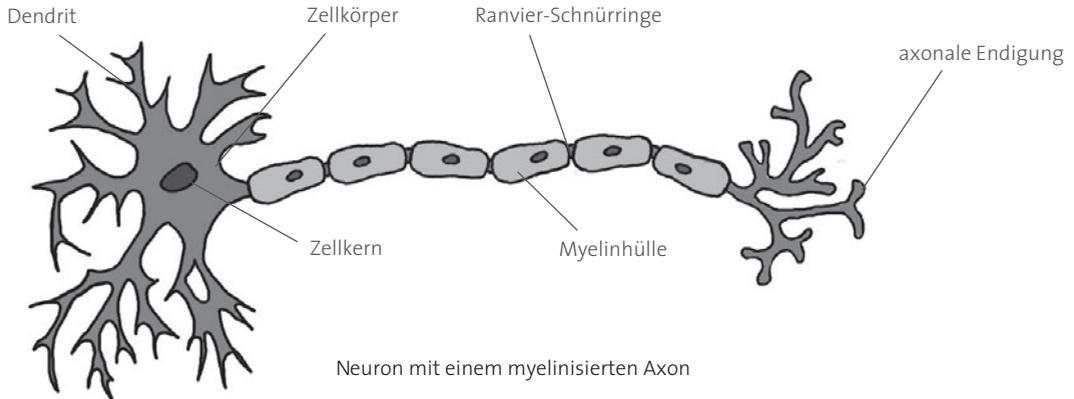
Emil Du Bois-Reymond entdeckt den Nervenimpuls

**1850**

Hermann von Helmholtz misst die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Nervenimpulsen in Froschnerven

**1878**

Louis-Antoine Ranvier beschreibt die Schnürringe in der Myelinscheide



**Neurone im Ruhezustand** Neurone enthalten eine Lösung verschiedener Ionen (elektrisch geladener Atome) und sind von Flüssigkeit umgeben, die dieselben Ionen enthält, aber in anderen Konzentrationen. Ionen haben die Tendenz, sich aus einem Bereich, in dem sie hoch konzentriert sind, in einen Bereich niedriger Konzentration zu bewegen und einen Gleichgewichtszustand zu erreichen, werden aber daran gehindert, weil die Nervenmembran weitgehend undurchlässig (impermeabel) für sie ist.

Das führt dazu, dass sich gewisse Ionen an der Außenseite der Membran sammeln, andere hingegen an der Innenseite. Diese ungleiche Verteilung elektrischer Ladungen führt dazu, dass die Innenseite der Membran gegenüber der Außenseite negativ geladen ist. Man sagt daher, die Membran sei *polarisiert*.

» Die Annahme scheint plausibel, ... dass der Nerv wie ein elektrischer Leiter funktioniert. «  
Luigi Galvani, 1791

**Es begann mit einem Tintenfisch** Der Mechanismus des Aktionspotenzials wurde Anfang der 1950er-Jahre mithilfe einiger klassischer Experimente aufgeklärt, bei denen Mikroelektroden in die Riesenaxone eines Kalmars eingestochen wurden. Diese Experimente zeigten, dass das Aktionspotenzial von einer Reihe sukzessiver Ionenbewegungen durch die Membran hervorgerufen wird.

**1893**

Paul Flechsig beschreibt die Entwicklung von Myelinscheiden im Gehirn

**1952**

Alan Hodgkin und Andrew Huxley beschreiben Entstehung und Fortleitung von Nervenimpulsen im Riesenaxon des Tintenfischs

**1998**

Rod MacKinnon und Kollegen entschlüsseln den Aufbau des spannungsgesteuerten Kaliumkanals

### Das ohmsche Gesetz

Das ohmsche Gesetz erklärt, wie sich die elektrischen Eigenschaften der Hirnzellen in Reaktion auf einlaufende Signale verändern. Es beschreibt die Beziehung zwischen der Spannung über der Nervenmembran, ihrem Widerstand und dem elektrischen Strom, der über sie fließt, und besagt, dass der Strom zu der Spannung über der Membran direkt proportional ist. Das wird durch die Gleichung  $I = V/R$  ausgedrückt, wobei  $I$  der elektrische Strom,  $V$  die Membranspannung und  $R$  der Membranwiderstand ist.

In der ersten Phase des Aktionspotenzials wird die Membran kurz für Natriumionen durchlässig (permeabel), die somit in die Zelle einströmen. Das führt zu einer Depolarisation der Zelle – die Membranspannung kehrt sich um, und die Innenseite wird positiv gegenüber der Außenseite. Darauf folgt rasch ein Ausströmen von Kaliumionen aus der Zelle, was zu einer erneuten Umkehr des Membranpotenzials führt. Der Einstrom von Kaliumionen hat zur Folge, dass das Membranpotenzial negativer wird als im Ruhezustand, und man sagt, die Zelle ist in diesem Zustand *hyperpolarisiert*. Während dieser so genannten Refraktärzeit kann das Neuron kein weiteres Aktionspotenzial

erzeugen, doch das Neuron kehrt rasch in seinen Ruhezustand zurück.

Aktionspotenziale werden am Axonhügel ausgelöst, also der Stelle, an der das Axon aus dem Zellkörper entspringt. Sie wandern über das Axon, weil die Depolarisation eines Segments des Axons dazu führt, dass der Nachbarbereich ebenfalls depolarisiert wird. Diese Depolarisationswelle entfernt sich vom Zellkörper, und wenn das Aktionspotenzial die axonalen Endigungen (Axonterminale) erreicht, bewirkt es die Ausschüttung von Neurotransmittern in den synaptischen Spalt.

Ein einzelnes Aktionspotenzial dauert etwa eine Tausendstelsekunde, und Neurone codieren Informationen in zeitlich präzise festgelegten Impulsfolgen, doch wie solche „Spitzezüge“ Informationen genau verschlüsseln, ist noch immer nicht völlig geklärt. Neurone erzeugen häufig Aktionspotenziale in Reaktion auf Signale anderer Zellen, doch sie generieren auch spontan Impulse. Die Feuerrate im Grundzustand – die Spontanaktivität

– variiert bei verschiedenen Neuronentypen und kann durch Signale anderer Zellen verändert werden.

Die Membran fungiert als Barriere und verhindert, dass sich die Ionen im äußeren Milieu mit denjenigen im inneren Milieu mischen. 

Alan Hodgkin, 1964

### Schneller als Usain Bolt

Axone im Gehirn und im Rückenmark sind durch eine fetthaltige Myelinscheide elektrisch isoliert, die von speziellen Hirnzellen, den Oligodendrozyten, erzeugt werden. Die Fortsätze eines solchen Oligodendrozyten bilden große flache Lappen aus Myelin, die sich mehrfach um einen Abschnitt des Axons eines benachbarten Neurons wickeln. Diese Myelinscheide ist somit nicht kontinuierlich, sondern weist in regelmäßigen Abständen

Lücken auf, die als Ranvier-Schnürringe bezeichnet werden. An diesen Schnürringen, an denen die Axonmembran freiliegt, befinden sich zahlreiche Ionenkanäle; sie ermöglichen es Aktionspotenzialen, von einem Schnürring zum nächsten zu springen. Dadurch erhöht sich ihre Fortleitungsgeschwindigkeit längs des Axons auf bis zu 100 m pro Sekunde.

**Nur wenige dürfen passieren** Ionen passieren die Nervenmembran durch tönchenförmige Proteine, so genannte Ionenkanäle, die in die Membran eingebettet sind und Poren zwischen innen und außen bilden. Diese Ionenkanäle verfügen über Sensoren, die Veränderungen der Membranspannung registrieren und sich in Reaktion auf diese Veränderungen öffnen oder schließen.

Menschliche Neuronen verfügen über mehr als ein Dutzend verschiedener Ionenkanaltypen, von denen jeder nur eine einzige Ionenart passieren lässt. Die Aktivität all dieser Ionenkanäle ist während eines Aktionspotenzials präzise aufeinander abgestimmt. Die Kanäle öffnen und schließen sich in einer bestimmten Reihenfolge, sodass Neurone auf Signale von anderen Zellen mit entsprechenden Mustern von Nervenimpulsen reagieren können.

Worum es geht  
**Neurone erzeugen elektrische Signale,  
 die Informationen transportieren.**

# 05 Synaptische Übertragung

**Nervenzellen kommunizieren miteinander durch einen Vorgang, der als neurochemische Übertragung (Transmission) bezeichnet wird. Diese findet an speziellen Kontaktstellen statt, den Synapsen, und dabei spielen chemische Botenstoffe, so genannte Neurotransmitter, eine entscheidende Rolle; sie diffundieren vom Sender- zum Empfängerneuron und übertragen Signale. Diese neurochemische Transmission kann durch Lernen modifiziert werden.**

Neuronale elektrische Signale können nicht einfach von einer Zelle zur anderen springen, sondern müssen zunächst in chemische Signale umgewandelt werden, die von einer Zelle zur nächsten übermittelt werden können. Dieser Vorgang, der als Neurotransmission bezeichnet wird, findet an hochspezialisierten Kontaktstellen, den Synapsen, statt und erfordert chemische Botenstoffe, die Neurotransmitter, die von einer Zelle zur anderen diffundieren. Allgemein gilt, dass Neurone nur einen Typ Transmitter synthetisieren und abscheiden; sie bilden präzise Verbindungen aus, sodass jeder Signaltyp auf bestimmte Zielzellen abgestimmt ist. Man nimmt an, dass Lernen und Gedächtnis mit der Modifikation von Synapsen innerhalb neuronaler Netzwerke einhergehen und Psychopharmaka wie Drogen dadurch wirken, dass sie die synaptische Übertragung beeinflussen.

**Die Supersynapse** Synapsen bestehen aus zwei spezialisierten Komponenten: der *präsynaptischen Endigung* der Zelle, die das Signal sendet, und der *postsynaptischen Region* der Zelle, die das Signal empfängt. An der präsynaptischen Endigung werden Neurotransmittermoleküle in synaptischen Bläschen (Vesikeln) gespeichert, die an der aktiven Zone nahe der Zellmembran „angedockt“ sind. Läuft ein Aktionspotenzial in die axonale Endigung ein, veranlasst dies die Vesikel,

## Zeitleiste

1897

Charles Sherrington prägt den Begriff „Synapse“ (gr. *synapsis*, „Verbindung“)

1914

Henry Dale und Kollegen identifizieren Acetylcholin als potenziellen Neurotransmitter