

Gerhard Roth Aus Sicht des Gehirns

Vollständig überarbeitete

Neuaufgabe

suhrkamp taschenbuch

wissenschaft

suhrkamp taschenbuch
wissenschaft 1915

Gerhard Roth verfolgt das Projekt, mithilfe der Erkenntnisse der modernen Neurobiologie und Hirnforschung Fragen zu beantworten, die von jeher Philosophen, Wissenschaftler und alle denkenden Menschen beschäftigt haben: Sind wir Menschen einzigartig? Wie entsteht unsere Bewusstseinswelt? Können wir die Welt erkennen, wie sie ist, oder nehmen wir nur Konstruktionen unseres Gehirns wahr? Auf was sollen wir hören: auf den Verstand oder die Gefühle? Wer oder was formt uns: Gene, das Unbewusste oder die Erziehung? Ist mein Wille frei? Diese und ähnliche Fragen werden in zwölf Kapiteln auf eine Weise behandelt, die keinerlei fachwissenschaftliche Vorkenntnisse erfordert. Das Buch präsentiert die Umriss eines neuen Menschenbildes, das naturwissenschaftlich begründet ist und zugleich Einsichten der Geistes- und Sozialwissenschaften berücksichtigt.

Gerhard Roth ist Professor für Verhaltensphysiologie an der Universität Bremen.

Im Suhrkamp Verlag sind von ihm erschienen: *Das Gehirn und seine Wirklichkeit* (stw 1275), *Fühlen, Denken, Handeln* (stw 1678), *Freiheit, Schuld und Verantwortung* (mit Michael Pauen, eu 12) und *Willensfreiheit und rechtliche Ordnung* (hg. mit Ernst-Joachim Lampe und Michael Pauen, stw 1833)

Gerhard Roth
Aus Sicht des Gehirns

Vollständig überarbeitete Neuauflage

Suhrkamp

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

suhrkamp taschenbuch wissenschaft 1915

© Suhrkamp Verlag Frankfurt am Main 2003, 2009

Alle Rechte vorbehalten, insbesondere das der Übersetzung,
des öffentlichen Vortrags sowie der Übertragung
durch Rundfunk und Fernsehen, auch einzelner Teile.

Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form
(durch Fotografie, Mikrofilm oder andere Verfahren)
ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert
oder unter Verwendung elektronischer Systeme
verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Druck: Druckhaus Nomos, Sinzheim

Printed in Germany

Umschlag nach Entwürfen von
Willy Fleckhaus und Rolf Staudt

ISBN 978-3-518-29515-1

Inhalt

Vorwort zur überarbeiteten Auflage	7
Vorwort	11
1. Eine kleine Hirnkunde	13
2. Welt, Körper, Ich	33
3. Was uns Menschen so klug macht	51
4. Wahrnehmung: Abbildung oder Konstruktion?	69
5. Die Spur der Erinnerungen	90
6. Wer oder was bestimmt uns?	109
7. Geist und Gehirn	127
8. Ich und Es – die Welt der Persönlichkeit und des Psychischen	147
9. Verstand oder Gefühle – auf was sollen wir hören? ..	167
10. Freiheit, die ich meine	180
11. Über die letzten Dinge	205
12. Wissenschaft und Wahrheit	217
Weiterführende Literatur	233
Namenregister	238
Sachregister	239

Vorwort zur überarbeiteten Auflage

Die vorliegende Ausgabe ist eine vollständig überarbeitete Version des 2003 erstmalig erschienenen Buches *Aus Sicht des Gehirns*. Dessen Erscheinen fiel zeitlich zusammen mit dem Beginn der in der wissenschaftlichen wie medialen Öffentlichkeit heftig geführten Diskussion um die Willensfreiheit. Dabei waren das Kapitel 10 der bisherigen Fassung sowie die ausführlichere Darstellung in der überarbeiteten Auflage meines Buches *Fühlen, Denken, Handeln*, die zeitgleich ebenfalls im Suhrkamp Verlag erschien, vielzitiertes Anlass zu Zustimmung und Kritik. Ich hatte geglaubt, in beiden Texten eine sowohl wissenschaftlich als auch philosophisch ausgewogene Position zu vertreten. Das wurde aber von einer Reihe von philosophischen Kritikern nicht so gesehen; vielmehr unterstellten sie, dass ich – neben anderen Neurobiologen – Willensfreiheit komplett als »Illusion« ablehne und sogar die Existenz eines Willens in Zweifel ziehe. Tatsächlich aber wandte ich mich nur gegen die traditionelle dualistisch-indeterministische Auffassung von Willensfreiheit, die allerdings nicht nur unserem alltäglichen Empfinden der Handlungssteuerung, sondern auch dem deutschen und kontinentaleuropäischen Strafrecht und seinem Schuld begriff zugrunde liegt.

Es dauerte einige Jahre, bis sich von philosophischer Seite eine differenziertere Wahrnehmung des Standpunkts der beteiligten Hirnforscher herausbildete. Gleichzeitig veränderte sich auch – zumindest bei mir – die Einschätzung der Aussagekraft der vielzitierten Experimente Benjamin Libets und seiner Nachfolger. Und schließlich ergab sich für mich in der engen Zusammenarbeit mit dem Philosophen Michael Pauen eine Neukonzeption des Begriffs »Willensfreiheit«, die den Gegensatz zwischen Willensfreiheit und Determiniertheit philosophisch und wissenschaftlich auflöst. Michael Pauen und ich haben unsere gemeinsame Auffassung in dem Buch *Freiheit, Schuld und Verantwortung – Grundzüge einer naturalistischen Theorie der Willensfreiheit* dargelegt, das im Herbst 2008 ebenfalls im Suhrkamp Verlag erschienen ist, und ich habe entsprechend das Kapitel 10 des vorliegenden Buches umgearbeitet.

Erfreulich ist, dass nach anfänglicher und zum Teil harscher Kritik von Strafrechtlern, Strafrechtstheoretikern und forensischen

Psychiatern sich inzwischen eine Offenheit entwickelt, über die – auch in Kreisen der Strafrechtler bekannten – Unzulänglichkeiten des deutschen Strafrechts (insbesondere des § 20) und des ihm zugrunde liegenden Schuldbegriffs zu diskutieren und für die juristische Praxis nutzbar zu machen. Ich habe hierzu mit der Rostocker Strafrechtlerin Grisca Merkel (früher Detlefsen) kürzlich ausführlich Stellung genommen (Merkel und Roth, 2008).

Allerdings hat die Diskussion um die Willensfreiheit die Aufmerksamkeit von anderen neuen, zum Teil bahnbrechenden Erkenntnissen der Hirnforschung und benachbarter Disziplinen etwas abgelenkt. Diese neuen Erkenntnisse betreffen folgende Themenbereiche:

Die Erforschung der neurobiologischen Grundlagen von Bewusstseinszuständen ist durch neuartige Auswertemethoden (z. B. unter Verwendung »lernender« künstlicher neuronaler Netze) weiter vorangetrieben worden. Dadurch gelingt es anders als früher, scheinbar verrauschte Aktivitätszustände im Gehirn, z. B. im primären visuellen oder im präfrontalen Cortex, in ihrem Inhalt zu erfassen und so den Prozess des Bewusstwerdens von Wahrnehmungsinhalten und Entscheidungen noch deutlicher darzustellen. Dies hat auch Auswirkungen auf die Frage nach dem zeitlichen Auftreten des »Willensrucks«, wie sie erstmals von Libet untersucht worden war, und bestätigt die Auffassung, dass geistig-bewusste Zustände unauflösbar mit bestimmten Hirnprozessen verbunden sind, dass man aus der Kenntnis des einen verlässlich auf die Existenz des anderen schließen kann, und dass unbewusste Hirnaktivitäten bewussten Erlebniszuständen in gesetzmäßiger Weise vorhergehen. Ob damit das Geist-Gehirn-Problem von Philosophen demnächst als in befriedigendem Sinne gelöst betrachtet oder weiterhin als »ewiges Rätsel« kultiviert werden wird, sei dahingestellt.

Ein weiteres »ewiges Problem« der Geistesgeschichte ist das »Anlage-Umwelt-Problem«, d. h. die Frage, ob menschliches Handeln hauptsächlich bzw. vornehmlich von »angeborenen Faktoren« (d. h. Genen) bestimmt ist, oder von Lernen, Erziehung und damit von Umwelteinflüssen. Die neue Sicht dieser Zusammenhänge ergibt sich aus der Erkenntnis, dass Gene in aller Regel nicht direkt ein bestimmtes Verhalten oder eine bestimmte Persönlichkeitseigenschaft bestimmen (etwa als »Verbrecher-Gen« oder »Intelligenz-Gen«), sondern dass an Persönlichkeits- und Verhaltenseigenschaften viele

Gene meist sehr indirekt (d. h. über komplexe epigenetische Hirnentwicklungsprozesse) beteiligt sind, die sich je nach Umwelteinflüssen in unterschiedlicher Weise im Verhalten ausdrücken. Dabei sind Gen-Varianten, so genannte Polymorphismen, besonders interessant, weil sie in der Normalpopulation auftreten, wenngleich meist in niedriger Frequenz. Ebenso hat sich der seit langem hartnäckig behauptete wie bestrittene Einfluss frühkindlicher Erfahrung, besonders in Form psychischer Traumatisierung infolge Misshandlung, Vernachlässigung, sexuellem Missbrauch usw. voll bestätigt, und dieser Einfluss lässt sich auch neurobiologisch eindeutig nachweisen. Aus heutiger Sicht sind es vier Faktoren, die unsere Persönlichkeit und unser Handeln bestimmen, nämlich genetische Prädispositionen (Polymorphismen), Eigenheiten der Hirnentwicklung, frühe (z. T. vorgeburtliche) psychische Prägungen, insbesondere im Rahmen der Bindungserfahrung, und weitere psychosoziale Erfahrungen in Kindheit und Jugend. Zwischen diesen vier Hauptfaktoren besteht sowohl eine positiv wie auch negativ sich verstärkende oder schwächende Interaktion, wie insbesondere die Studien zur Genese gewalttätigen Verhaltens und psychischer Erkrankungen zeigen.

Das dritte Gebiet, auf dem sich derzeit eine stürmische Entwicklung vollzieht, schließt sich zum Teil hier an und betrifft die Aufklärung der Prozesse, die mit der Entwicklung der Persönlichkeit verbunden sind. Auch hier lassen sich verschiedene Faktoren identifizieren, die unsere Persönlichkeit formen, nämlich erstens genetisch fixierte Verhaltensprogramme, zweitens die Ergebnisse der individuellen emotionalen Konditionierung, drittens die Sozialisation des Verhaltens und viertens kognitive Denk-, Entscheidungs- und Kommunikationsmuster. Diese Faktoren werden zu ganz unterschiedlichen Entwicklungszeiten wirksam und bestimmen unsere Persönlichkeit »von unten nach oben«, d. h., jede frühere Entwicklungsstufe bestimmt weitgehend den Rahmen für die nächste Stufe, aber gleichzeitig bilden sich Kontrollmechanismen in entgegengesetzter Richtung aus. Diese Erkenntnisse betreffen auch die Frage nach der Veränderbarkeit des Menschen in seiner Persönlichkeitsstruktur. Es wird dabei deutlich, warum es so schwierig ist, andere Menschen zu ändern, und besonders schwer, sich selbst zu ändern. Dies wirft auch Licht auf die Frage nach dem Verhältnis von Verstand und Gefühlen und führt zur Erkenntnis, dass auch diese altherwürdige Dichotomie fragwürdig geworden ist.

Das vierte Gebiet hängt wiederum stark vom Erkenntnisfortschritt im zweiten und dritten Gebiet ab und betrifft die neurobiologischen Grundlagen des Psychischen, psychischer Erkrankungen und deren Therapie. Bei psychischen Erkrankungen einschließlich der Persönlichkeitsstörungen, zu denen auch antisoziales, gewalttätiges Verhalten gehört, zeigt sich am deutlichsten die Interaktion zwischen den oben genannten vier Faktoren, wobei der zweite Faktor (Hirnentwicklung) und der dritte Faktor (frühe psychische Prägung und Bindungserfahrung) wohl die wichtigsten sind. Allerdings ist wirklich verlässliches Wissen über die Grundlagen psychischer Erkrankungen noch rar, weil es hier neben dem Mangel an einem guten »Tiermodell« viele große methodische Schwierigkeiten gibt – ganz abgesehen von der hohen individuellen Variabilität. Noch dramatischer sieht es bei der Frage aus, was im Gehirn der Patienten geschieht, deren Psychotherapie erfolgreich war – oder eben nicht. Hier ist das derzeitige Wissen noch unzulänglicher, aber deshalb sind die Forschungsanstrengungen noch intensiver.

Das Bemerkenswerte an diesen Entwicklungen ist, dass es sich hierbei nicht um rein neurobiologische, sondern um eine zutiefst interdisziplinäre Forschung handelt, an der neben den Neurobiologen bzw. Hirnforschern auch Neuropsychologen, Entwicklungs- und Persönlichkeitspsychologen, Psychiater, Psychotherapeuten, Soziologen, Ökonomen und Philosophen beteiligt sind. Diese Interdisziplinarität ist der beste Garant gegen das Schreckensbild eines »Homo neurobiologicus«, d. h. des Menschen, der von Gehirnprozessen vollständig beherrscht wird, kein eigenes Ich und keinen freien Willen mehr hat. Das Gegenbild lautet, dass das Gehirn der Ort des Zusammenwirkens der genannten vier Faktoren und der aktuellen Einflüsse ist, und die Aussage »das Gehirn steuert unser Verhalten« nichts anderes heißt, als dass diese Faktoren über das Gehirn wirken. Worüber sonst!

In der vorliegenden Ausgabe habe ich alle Kapitel überarbeitet, dabei unklare Formulierungen, Fehler zu beseitigen und neue Erkenntnisse einzuarbeiten versucht. Größere Umarbeitungen und Ergänzungen finden sich in den Kapiteln 3, 6, 8 und 9; das Kapitel 10 habe ich vollständig neu geschrieben. Ebenso habe ich Änderungen bei den Abbildungen vorgenommen und die Literaturliste aktualisiert.

Brancoli, August 2008

Vorwort

Die Hirnforschung dringt in Gebiete ein, die ihr als einer Naturwissenschaft lange Zeit vollkommen verschlossen schienen. Dies gilt für geistige Leistungen des Menschen wie Wahrnehmen, Denken, Vorstellen, Erinnern und Handlungsplanen, inzwischen aber auch für emotionale und psychische Zustände. In diesem Zusammenhang ergeben sich unweigerlich Fragen nach der Natur des Geistes und des Bewusstseins, den Wurzeln der Persönlichkeit und des Ich, den Möglichkeiten und Grenzen von Erziehung und von Psychotherapie und schließlich nach der Existenz von Willensfreiheit.

Dies wiederum führt zur Diskussion um eine grundlegende Änderung des Bildes, das der Mensch von sich selbst entworfen hat, nämlich des Bildes von einem Wesen, das sich aufgrund von Geist, Bewusstsein, Vernunft, Moral und freiem Willen weit über alle anderen Lebewesen erhebt. Diese Diskussion versetzt viele Menschen in große Unruhe. Abhilfe können hier nur sachliche Information und nüchterne Interpretation schaffen.

Ich habe in meinen beiden Büchern *Das Gehirn und seine Wirklichkeit* und *Fühlen, Denken, Handeln* sowie in Buch- und Zeitschriftenaufsätzen versucht, hierzu einen Beitrag zu leisten. Obgleich sich die beiden genannten Bücher eines beträchtlichen Erfolges erfreuen, beklagen viele Leser zugleich die Fülle der wissenschaftlichen Details und die Kompliziertheit der Zusammenhänge. Man mag dies mit der Bemerkung abtun, dass man komplizierte Dinge nicht beliebig einfach darstellen kann.

Dann erhielt ich die Bitte des Suhrkamp Verlages, einige Aspekte der Hirnforschung und ihre Bedeutung für das Menschenbild in einer Weise darzustellen, die keine allzu große Geduld und Anstrengung erfordert, und ich habe dies als eine interessante Herausforderung angesehen. Der Leser möge entscheiden, in welchem Maße ich dem gerecht geworden bin. Wichtig ist, dass bei aller Allgemeinverständlichkeit die wissenschaftliche Korrektheit erhalten bleibt. Alle zwölf Kapitel sind eigens für dieses Buch geschrieben; inhaltliche Überschneidungen mit den beiden genannten Büchern wurden dabei bewusst in Kauf genommen. Der Wissensstand der Hirnforschung ist schließlich nicht beliebig vermehrbar.

Meiner Frau und Kollegin Dr. Ursula Dicke danke ich für zahlreiche fachliche Ratschläge. Für die Durchsicht der Texte danke ich meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern Nicole Becker, Christine Egger, Monika Lück, Uwe Opolka und Dr. Daniel Strüber vom Hanse-Wissenschaftskolleg.

Selbstverständlich gehen alle Fehler zu meinen Lasten.

Lilienthal, im Mai 2003

I. Eine kleine Hirnkunde

Manche Menschen, darunter Hirnforscher, sind der Meinung, unser Gehirn sei das komplizierteste System im Universum. Das soll natürlich unserem Selbstwertgefühl schmeicheln. Wer aber kennt schon das Universum?

Klar ist, dass man viele Jahre intensiven Studiums braucht, um das menschliche Gehirn in seinem Aufbau und seinen Funktionen gut zu verstehen. Es gibt allerdings einige Dinge, die einem die Sache erleichtern. Das Wichtigste ist dabei die Erkenntnis, dass das menschliche Gehirn in seinem Aufbau keineswegs einzigartig ist, sondern ein typisches Säugetiergehirn darstellt. Wenn wir also wissen, wie ein Säugetiergehirn aufgebaut ist, dann verstehen wir auch den Aufbau des menschlichen Gehirns. Allerdings sind die Gehirne von Säugetieren, und zwar auch scheinbar »primitive« wie die von Ratten und Mäusen, ebenfalls kompliziert aufgebaut. Hier hilft die zweite Erkenntnis, dass das Gehirn der Säugetiere ein typisches Wirbeltiergehirn ist und entsprechend den Gehirnen von Neunaugen, Knorpelfischen (Haien und Rochen), Knochenfischen, Amphibien (z. B. Fröschen und Salamandern), Reptilien (z. B. Schildkröten, Schlangen, Eidechsen, Krokodilen) und Vögeln im Grundaufbau sehr ähnlich ist.

Als Ausgangspunkt können wir das einfachste Gehirn nehmen, das sich bei den Wirbeltieren findet, und hier bietet sich das Gehirn der Frösche und Salamander an, mit denen ich mich seit vielen Jahren intensiv beschäftige (genauer gesagt handelt es sich um sekundär vereinfachte Gehirne – aber das spielt im vorliegenden Zusammenhang keine Rolle). In Abbildung 1 sind der Grundaufbau des Wirbeltiergehirns, ein Salamandergehirn und das menschliche Gehirn gezeigt, natürlich in unterschiedlichem Maßstab. Der oberen Abbildung entnehmen wir, dass sich alle Wirbeltiergehirne aus dem Vorderende eines rohrartigen Gebildes, des Neuralrohrs, entwickeln, dessen Wände die Hirnmasse und dessen Hohlraum die so genannten Ventrikel darstellen. Den langen hinteren Teil stellt das *Rückenmark* dar, das die Wirbelsäule durchzieht und die ursprüngliche Rohrartigkeit noch am meisten beibehält. Der vordere Teil, das *Gehirn*, unterteilt sich durch Wandverdickungen, Einschnü-

rungen und Ausweitungen in fünf Teile. Dabei handelt es sich um das Verlängerte Mark (lateinisch *Medulla oblongata*) als Fortsetzung des Rückenmarks, um das Kleinhirn (*Cerebellum*), das Mittelhirn (*Mesencephalon*), das Zwischenhirn (*Diencephalon*) und das Endhirn (*Telencephalon*), auch Großhirn genannt. Das Endhirn oder Großhirn ist in seinem vorderen Teil bei allen Wirbeltieren paarig angeordnet; die beiden Großhirnhälften nennt man *Hemisphären* (d. h. Halbkugeln). Bei Vögeln und Säugetieren unterscheidet man noch einen weiteren, sechsten Hirnteil, die Brücke (lateinisch *Pons*), der aber nur ein besonderer Teil des Mittelhirnbodens, des *Tegmentum*, ist.

Diese fünf bzw. sechs Teile sind bei Amphibien und Reptilien und den meisten Fischen hintereinander angeordnet; bei Säugetieren und Vögeln vergrößern sich aber das Zwischenhirn und das Endhirn überdurchschnittlich, und bei Säugetieren vergrößert sich zusätzlich die Hirnrinde und dehnt sich nach allen Seiten aus, so dass sie schließlich bei einigen Säugetieren wie den Primaten die übrigen Teile des Gehirns fast ganz überdeckt. So kommt es, dass beim menschlichen Gehirn ebenso wie bei den Gehirnen anderer großer Säugetiere äußerlich fast nur die Großhirnrinde sichtbar ist (Abbildung 2). Diese eindrucksvollen Veränderungen, die sich sowohl in der Stammesgeschichte (Phylognese) als auch der Individualgeschichte (Ontogenese) zeigen, ändern aber nichts an der Tatsache, dass der Grundaufbau des menschlichen Gehirns überhaupt nichts Besonderes an sich hat. Bei den Affen, insbesondere den Großaffen, zu denen auch wir Menschen gehören, ist allerdings das Gehirn in Höhe des Zwischenhirns »abgeknickt«, so dass Rückenmark, Verlängertes Mark, Brücke und Mittelhirn eine schräge Position einnehmen und das Endhirn mit der Großhirnrinde waagrecht nach vorn ausgerichtet ist. Dies hängt mit der zunehmend aufrechten Körperhaltung der Affen und der entsprechenden Umformung des Schädels bei diesen Tieren zusammen.

Das menschliche Gehirn wiegt bei Männern im Durchschnitt 1,35 Kilogramm und bei Frauen im Durchschnitt 1,22 Kilogramm. Dieser Unterschied hängt teilweise mit dem etwas geringeren Körpergewicht von Frauen zusammen, ist aber nicht allein hierdurch erklärbar. Frauen und Männer unterscheiden sich außer in ihrem Körper auch in vielen anderen Dingen voneinander, z. B. wie sie fühlen, denken, entscheiden und sich verhalten. Nichts davon hat

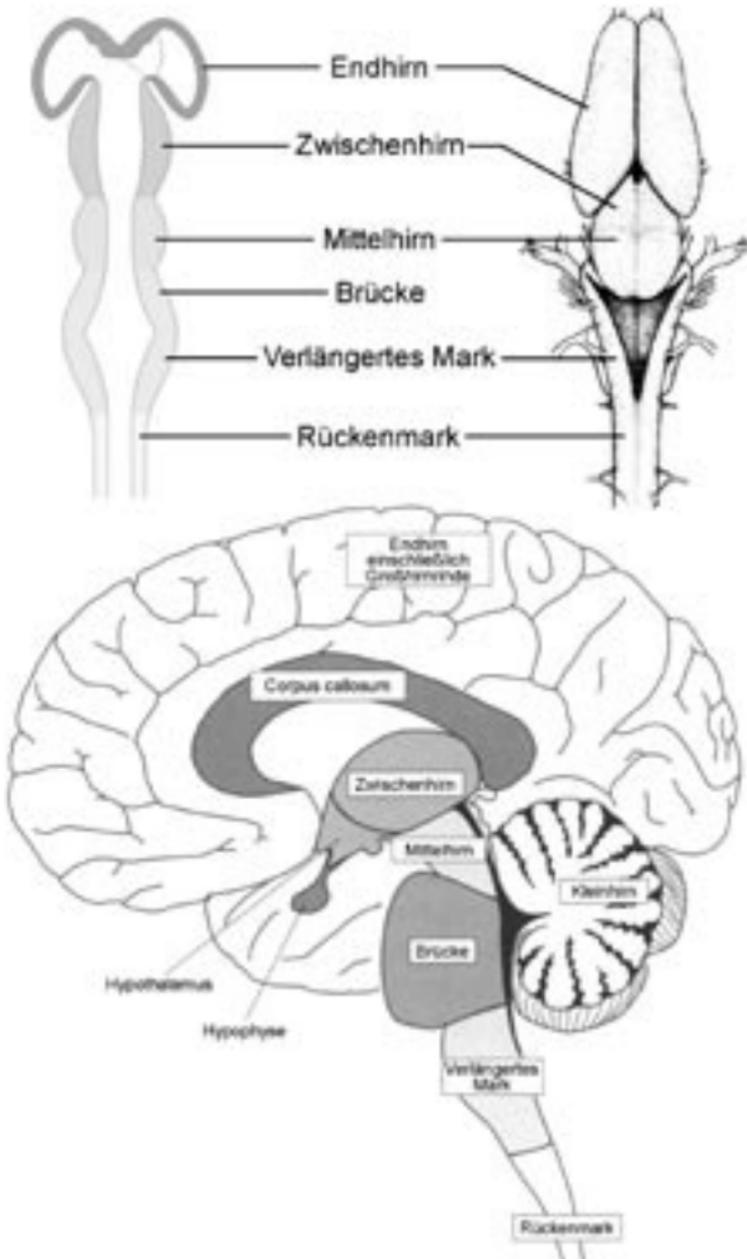


Abbildung 1: Oben links: Aufbau des Wirbeltiergehirns zu Beginn der Entwicklung (nach Zigmond et al. 1999; verändert). Oben rechts: Aufsicht auf ein Salamandergehirn (aus Roth 1987). Unten: Längsschnitt durch das menschliche Gehirn (nach Eliot 2001; verändert).

aber mit diesem Unterschied im Gehirngewicht zu tun, wie überhaupt die Leistungen menschlicher Gehirne, z. B. Intelligenz und Kreativität, und das Gehirngewicht in einer Spannweite zwischen einem und zwei Kilogramm wenig bis nichts miteinander zu tun haben.

Das menschliche Gehirn ist nicht nur in seiner Grundstruktur sehr konservativ, sondern auch in seinem Feinaufbau. Wie alle anderen Organe unseres Körpers besteht das Gehirn aus Zellen, und zwar aus Nervenzellen, *Neurone* (oder *Neuronen*) genannt, und Gliazellen. Nervenzellen sind die direkten Grundbausteine der Funktionen unseres Gehirns, während Gliazellen Stütz- und Versorgungsfunktionen für die Nervenzellen ausüben. Inwieweit sie bei der neuronalen Erregungsverarbeitung mitwirken, ist noch nicht ganz geklärt. Das menschliche Gehirn enthält schätzungsweise hundert Milliarden Nervenzellen, wovon allein das Kleinhirn dreißig Milliarden Nervenzellen beinhalten soll, aber Gliazellen gibt es etwa zehnmal so viele wie Nervenzellen. Allerdings gilt, dass die Zahl der Gliazellen bei einer Vergrößerung des Gehirns gegenüber den Nervenzellen überproportional zunimmt, was zur Folge hat, dass kleine Gehirne viel mehr Neurone als Gliazellen und große Gehirne viel mehr Gliazellen als Neurone haben. Das hängt damit zusammen, dass bei einer Gehirnvergrößerung der Versorgungsaufwand für die Nervenzellen, an denen die Gliazellen beteiligt sind, unverhältnismäßig wächst.

Nervenzellen kommen in vielerlei Gestalten im Gehirn vor. Alle haben aber dieselbe Funktion: Erregung wird aufgenommen, verarbeitet und wieder abgegeben. Wie Abbildung 3 zeigt, besteht eine typische Nervenzelle aus einem *Zellkörper*, von dem meist viele verzweigte Fortsätze, *Dendriten* genannt, entspringen, über die sie Erregungen von anderen Nervenzellen aufnimmt, und einem ebenfalls am Zellkörper oder an einem Hauptdendriten entspringenden Fortsatz, *Axon* genannt (es kann davon auch mehrere geben), über die die Zelle Erregungen an andere Nervenzellen weitergibt. Allerdings gibt es auch Nervenzellen, die axonlos sind, und bei denen die Erregungsverarbeitung zwischen den Dendriten verläuft.

Grundlage der Erregungsverarbeitung im Nervensystem (einschließlich des Gehirns) ist die Tatsache, dass die Hülle (*Membran*), die die Nervenzellen und ihre Fortsätze umgibt, elektrisch aufgeladen ist. Durch Messungen stellen wir fest, dass das Zell-

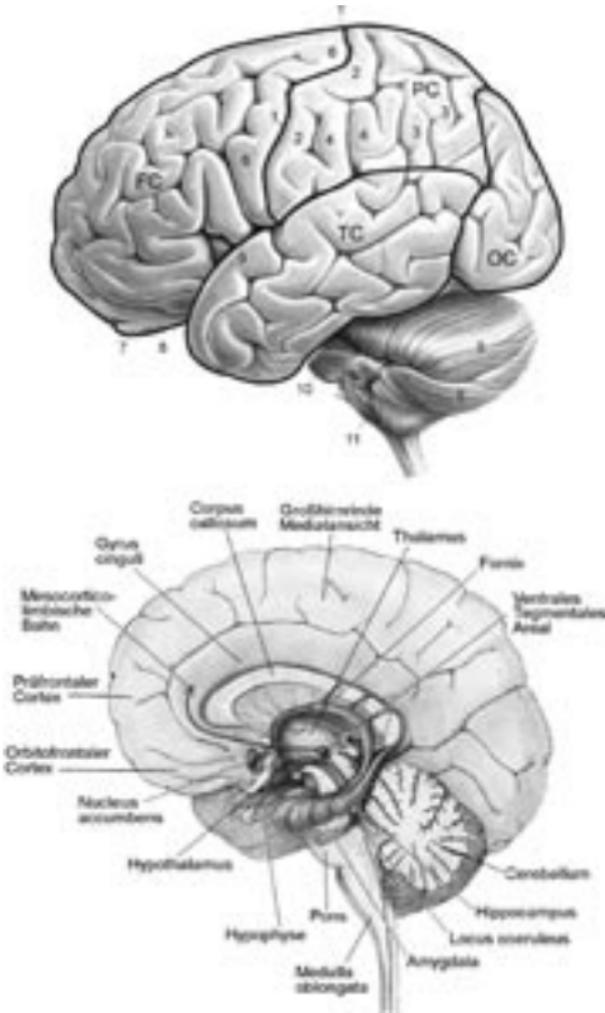


Abbildung 2: Oben: Seitenansicht des menschlichen Gehirns. Sichtbar ist die Großhirnrinde mit ihren typischen Windungen (Gyrus/Gyri) und Furchen (Sulcus/Sulci) und das ebenfalls stark gefurchte Kleinhirn. Abkürzungen: FC Stirnlappen; OC Hinterhauptslappen; PC Scheitellappen; TC Schläfenlappen; 1 Zentralfurche (Sulcus centralis); 2 Gyrus postcentralis; 3 Gyrus angularis; 4 Gyrus supramarginalis; 5 Kleinhirn-Hemisphären; 6 Gyrus praecentralis; 7 Riechkolben; 8 olfaktorischer Trakt; 9 Sulcus lateralis; 10 Brücke; 11 Verlängertes Mark. (Nach Nieuwenhuys et al. 1991, verändert.) Unten: Längsschnitt durch das menschliche Gehirn mit den wichtigsten limbischen Zentren (nach *Spektrum der Wissenschaft*, verändert). Weitere Erläuterungen im Text.

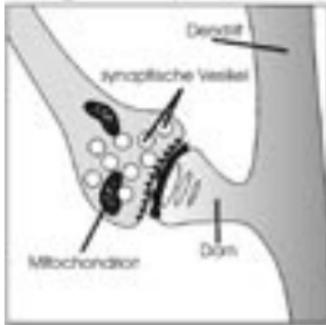
innere gegenüber der Umgebung eine negative Spannung von 40-70 Millivolt aufweist. Die Spannung der Membran kann sich nun kurzfristig entladen und dadurch elektrische Impulse erzeugen, die über die Oberfläche der Nervenzelle zum Ursprungsort des Axons und über das Axon zu anderen Zellen weiterlaufen. Diese Impulse nennt man *Aktionspotentiale*.

Eine einzelne Nervenzelle, wie sie in Abbildung 3 gezeigt ist, ist über viele kleine Kontaktpunkte, *Synapsen* genannt, mit tausenden anderer Nervenzellen verbunden. Diese Synapsen bestehen aus Endverdickungen von Axonen (*Präsynapsen* genannt), die an einem bestimmten Ort an einer anderen Nervenzelle ansetzen; diesen Ort nennt man *Postsynapse*. Meist befinden sich Synapsen an den Dendriten der nachgeschalteten Zelle, sie kommen aber auch am Zellkörper vor. Über die Axone laufen Aktionspotentiale vom Zellkörper zur Präsynapse. Bei so genannten chemischen Synapsen lösen diese Aktionspotentiale den Ausstoß von chemischen Boten- oder Überträgerstoffen, *Neurotransmitter* (oder einfach *Transmitter*) genannt, aus, die in den winzigen Zwischenraum zwischen Prä- und Postsynapse eindringen und auf die Postsynapse einwirken. Hier bewirken die Transmitter Veränderungen des elektrischen Ladungszustandes des Fleckchens Membran, das sich an der Postsynapse befindet. Dieser Ladungszustand ist im Ruhezustand, wie gehört, *negativ*, was bedeutet, dass sich gar nichts tut.

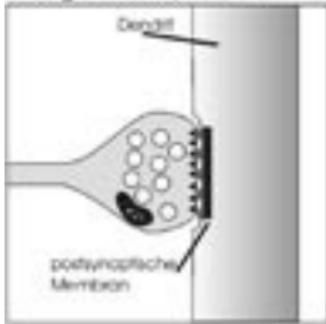
Durch Einwirkung der Transmitter auf die Postsynapse kann die Membran nun weniger negativ oder sogar positiv werden (dies nennt man *Depolarisation*), und dann läuft eine elektrische Erregung von der Postsynapse über die Dendriten zum Zellkörper und weiter zum Axon, wo sie unter günstigen Umständen Aktionspotentiale auslöst. Der Transmitter kann aber auch die postsynaptische Membran noch negativer machen und zum Beispiel auf minus 80 Millivolt treiben (dies nennt man *Hyperpolarisation*). Dies hemmt die Zelle und hat zur Folge, dass sie für nachfolgende Erregungen von der vorgeschalteten Zelle vorübergehend unempfindlicher wird.

Wir haben damit die beiden wichtigsten Wirkungen kennengelernt, die eine Nervenzelle auf andere Nervenzellen haben kann, nämlich Erregung (*Exzitation*) und Hemmung (*Inhibition*), natürlich in abgestufter Weise. Ob eine Präsynapse auf die Postsynapse erregend oder hemmend wirkt, hängt nicht nur von der Art des

erregende Synapse



erregende Synapse



hemmende Synapse

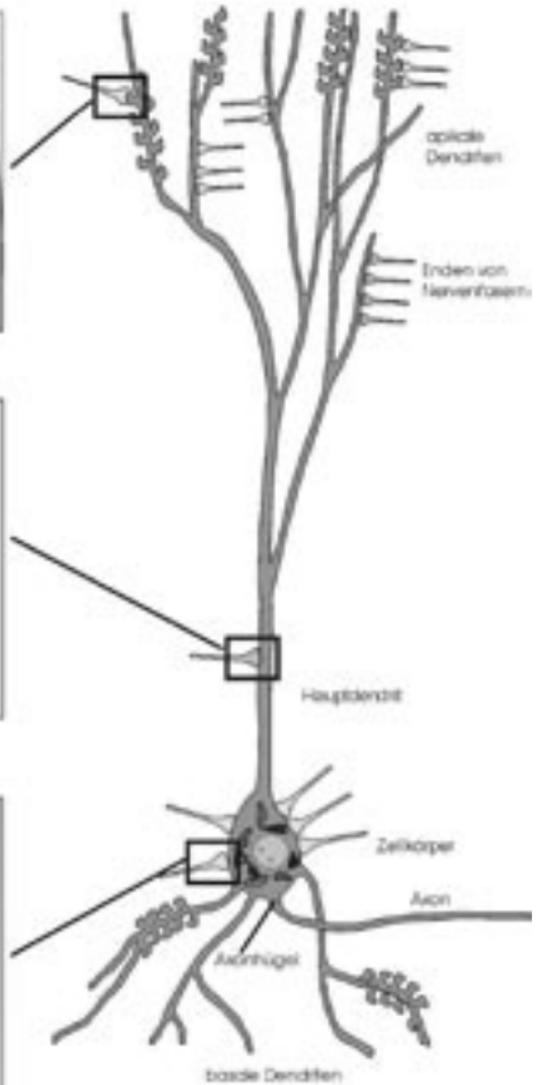


Abbildung 3: Aufbau einer idealisierten Nervenzelle (Pyramidenzelle der Großhirnrinde). Die apikalen und basalen Dendriten dienen der Erregungsaufnahme, das Axon ist mit der Erregungsweitergabe an andere Zellen (Nervenzellen, Muskelzellen usw.) befasst. Links vergrößert drei verschiedene Synapsentypen: oben eine erregende Synapse, die an einem »Dorn« eines Dendriten ansetzt (»Dornsynapse«); in der Mitte eine erregende Synapse, die direkt am Hauptdendriten ansetzt; unten eine hemmende Synapse, die am Zellkörper ansetzt. (Aus Roth 2001.)