

Christina Lohr

Faszination Neurowissenschaften und das lernende Gehirn¹

1. Ein erster Blick in den Kopf – unser Gehirn

Unser Gehirn ist wohl eines der komplexesten Organe, das der Mensch besitzt. Es wiegt circa 1,3 kg, wobei das Gehirn von Männern im Durchschnitt etwas schwerer ist als das der Frauen. Im lebenden Zustand hat das Organ ungefähr die Konsistenz von gekochtem Pudding und erscheint unter den Hirnhäuten beim Öffnen der Schädeldecke weiß und pulsierend. Wenn der Mensch gestorben ist, besteht die Möglichkeit, das Gehirn zu entnehmen und in Formalin zu konservieren, d. h. Wasser und Blut werden dem Gehirn entzogen und dieses somit in eine feste Form gebracht. Dabei erhält es eine eher gräulich-beige Farbe. Meistens werden dabei auch die Hirnhäute entfernt. Die harte Hirnhaut, die *Dura mater*, sieht einer sehr eng anliegenden, aber extrem festen Latexbadekappe ähnlich und schützt das empfindliche Gehirn vor Stößen. Die mittlere Schicht (*Arachnoidea mater*) dagegen sieht eher aus wie ein feines Spinnennetz, sie sorgt zusammen mit der dritten Schicht, der *Pia mater*, für die Versorgung des Gehirns und der Hirnhäute. Beide zusammen bilden die weiche Hirnhaut (*Leptomeninges*). Erst wenn die Hirnhäute mit ihrem Gefäßnetz entfernt werden, kommt das Gehirn mit seiner charakteristischen Windungen- und Furchenlandschaft zum Vorschein. Dann wird auch die typische Form des Gehirns sichtbar, die jeder von uns aus Abbildungen und Fotos kennt: Es erinnert an zwei Walnusshälften.

Wenn man das Gehirn im Ganzen betrachtet, fällt sofort auf, dass es aus zwei Hälften besteht, den sogenannten *Hemisphären*. Außerdem sieht man einen Teil am unteren Ende der beiden Gehirnhälften, der sich auch von seiner Struktur her deutlich von den beiden Hemisphären absetzt, das Kleinhirn (Trepel 2004).

2. Die »kleine Lappenkunde« und andere Gehirnsysteme

Wenn wir das Großhirn anschauen, das in zwei Hemisphären aufgeteilt ist, so lassen sich von außen vier sogenannte »Gehirnlappen« unterscheiden (vgl. Abb. 1):

1 Bonuskapitel zum Buch »Selbstorganisiertes Lernen in Schule und Beruf« von Cindy Herold und Martin Herold. © 2011, Beltz Verlag • Weinheim und Basel.

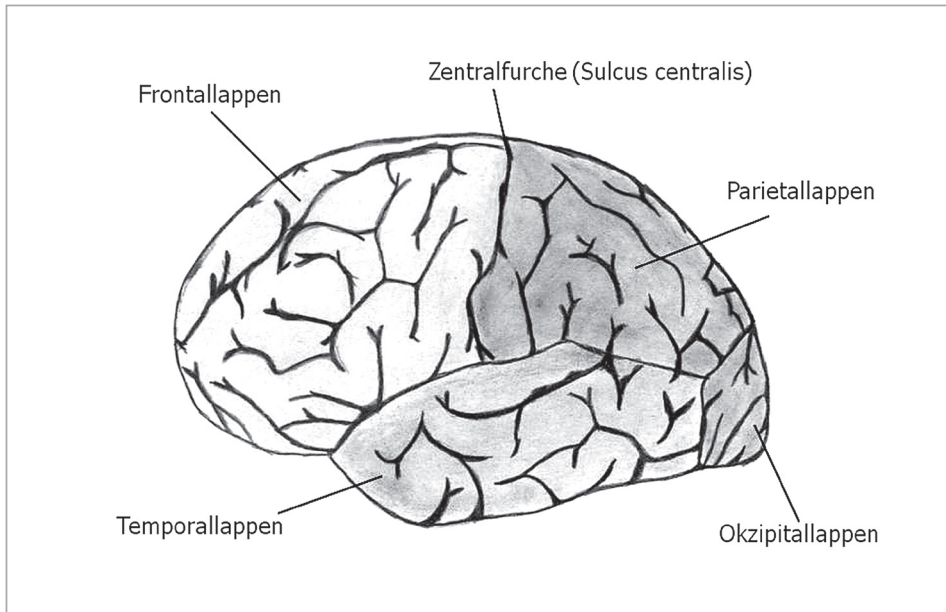


Abb. 1: Gehirn mit Lappenkennzeichnung

- der *Frontallappen* direkt hinter der Stirn, er ist der größte der vier Lappen,
- der *Parietallappen*, seitlich oben zwischen Frontal- und Okzipitallappen,
- der *Temporallappen*, seitlich unten hinter der Schläfe, quasi als Verlängerung des Parietallappens, und
- der kleinste der vier, der *Okzipitallappen*, der direkt am Hinterkopf sitzt.

Zwei Hirnbereiche gibt es, die sich keinem der beschriebenen Lappen zuordnen lassen: der *Gyrus cinguli* und die Inselrinde, die seitlich liegt und von den Frontal-, Parietal- und Temporallappen verdeckt wird. Von allen Lebewesen besitzt der Mensch das am meisten gefaltete Großhirn, denn nur so konnte der Platz innerhalb des Schädels optimal ausgenutzt werden. Durch die Faltung ergeben sich die Windungen (*Gyri*) und die Furchen (*Sulci*). Die beiden ausgeprägtesten Furchen sind die zentrale Furche (*Sulcus centralis*) und die seitliche Furche (*Sulcus lateralis*). Der *Sulcus centralis* teilt dabei den Frontallappen vom Parietallappen, die *Sulci lateralis* trennen diese beiden vom Temporallappen. Zwei Windungen, die besonders deutlich zu erkennen sind, sind der *Gyrus praecentralis* und der *Gyrus postcentralis*. Der *Gyrus praecentralis* ist ein Teil des Frontallappens und sitzt direkt vor dem *Sulcus centralis*. In ihm ist die primäre motorische Großhirnrinde verortet. Der *Gyrus postcentralis* ist wiederum ein Teil des Parietallappens und sitzt direkt hinter dem *Sulcus centralis*. Dort ist die primäre sensorische Großhirnrinde verortet.

Der *Gyrus postcentralis* wird gerne herangezogen, um die Verteilung nach Wichtigkeit und räumlicher Nähe im Gehirn zu demonstrieren. Man weiß mittlerweile sehr

genau, welche Zellverbände welche Körperstelle repräsentieren, und daher ist es möglich, auf dieser Grundlage den sogenannten *sensorischen Homunculus* (auch unter dem Namen »Penfields Homunculus« bekannt) zu entwerfen (Abb. 2). Wenn man dies tut, stellt man fest, dass dieses »kleine Menschlein« recht seltsam aussieht und auf dem Kopf steht. Es hat sehr große Hände und einen riesigen Mund, während die anderen Teile des Körpers wesentlich kleiner dargestellt sind. Hier werden zwei wichtige Ordnungsprinzipien unseres Gehirns deutlich:



Abb. 2: Sensorischer Homunculus
(www.turmdersinne.de)

- Für Regionen unseres Körpers, die sehr viele Informationen in Form von Reizen an das Gehirn weiterleiten, gibt es auch viele Nervenzellen, die mit ihrer Verarbeitung beschäftigt sind. Zum Beispiel haben wir sehr viele Tastrezeptoren an unseren Fingerkuppen, daher sind sie auch beim sensorischen Homunculus im Gehirn stark bzw. größer repräsentiert.
- Regionen, die an unserem Körper eng zusammenliegen, sind auch im Gehirn nebeneinander repräsentiert, z.B. Arm und Hand.

Wichtig an dieser Stelle ist es zu wissen, dass sich diese Repräsentationen im Gehirn genau unseren individuellen Gegebenheiten anpassen – zwei Beispiele:

Man weiß schon sehr lange, dass Menschen, die von Kindheit an viele Jahre Geige spielen, für die Finger der linken Hand mehr Zellen für die Repräsentation zur Verfügung haben als Menschen, die nicht Geige spielen. Hier sieht man, wie die Dinge, die wir tun (oder eben nicht tun), auch die Struktur und Funktion unseres Gehirns mitbestimmen.

Ein noch drastischeres Beispiel ist die Tatsache, dass Menschen, die z.B. ohne Arme geboren wurden (etwa die sogenannten »Contergan-Kinder«), auch keine Nervenzellen besitzen, die für die Arme zuständig sind.

Mittlerweile weiß man, dass vor allem das erwachsene Gehirn einer gewissen Spezialisierung unterliegt, d.h. die Aufgaben im Gehirn sind grob an bestimmte Strukturen verteilt. Je komplexer jedoch die Prozesse der Verarbeitung im Gehirn werden, desto mehr arbeiten ganze Netzwerke daran. Unser Gehirn funktioniert als Ganzes. Auch die oben beschriebenen Gehirnlappen unterliegen einer gewissen Arbeitsteilung, die sich grob wie folgt zusammenfassen lässt:

- *Frontallappen*: vor allem in den vorderen Bereichen (*präfrontaler Kortex*) Steuerung der höheren kognitiven Aufgaben wie Impulskontrolle, Handlungsplanung, Fehlererkennung etc., im hinteren Bereich Steuerung der Motorik;
- *Temporallappen*: Verarbeitung akustischer Reize und Sitz wichtiger Sprachzentren;
- *Parietallappen*: Verarbeitung sensorischer Reize;
- *Okzipitallappen*: Verarbeitung visueller Reize.

Ein weiteres System, das im Inneren des Gehirns zu finden ist und dessen Hauptaufgabe besonders mit der Lokalisation von Emotionen im Gehirn in Zusammenhang steht, ist das *limbische System* (Abb. 3). Über die Strukturen, die genau zum limbischen System gehören, herrscht noch Unklarheit unter den Experten. Hier die Teile, die am häufigsten unter diesem Begriff zusammengefasst werden und in beiden Hemisphären (bilateral) vorkommen:

- *Hippocampus*
- *Gyrus cinguli*
- *Gyrus parahippocampalis*
- *Amygdala* (Mandelkern)
- *Corpus mamillare*

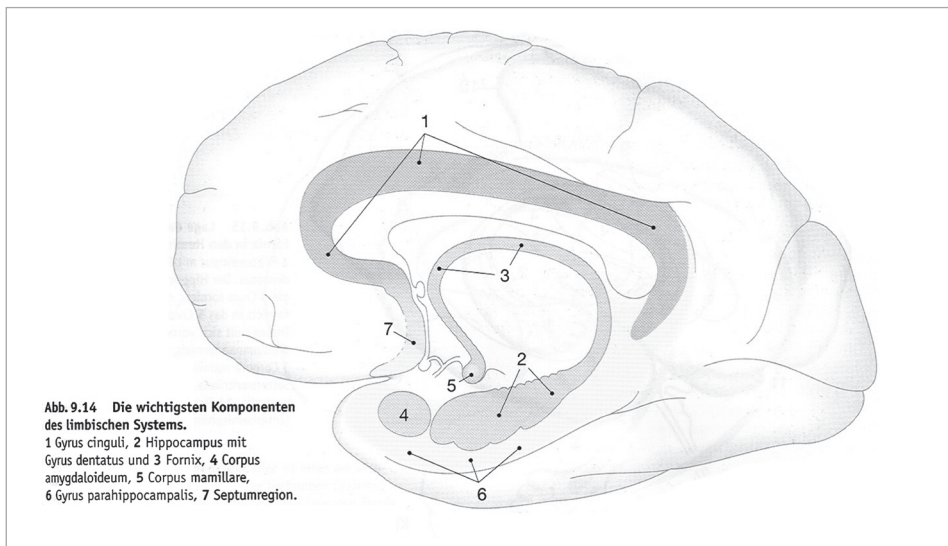


Abb. 3: Limbisches System (aus Trepel: Neuroanatomie, © Elsevier GmbH, Urban & Fischer Verlag München)

Die wohl bekanntesten Teile des limbischen Systems sind der Hippocampus und die Mandelkerne. Dem Hippocampus kommt eine entscheidende Rolle bei der Gedäch-

nisbildung zu. Denn wenn Teile des Hippocampus während der Erinnerungsphase aktiviert sind, stehen die Chancen sehr gut, dass diese Inhalte längerfristig behalten werden, wie man in vielen bildgebenden Studien herausfand (z.B. Dickerson et al. 2007). Er scheint einen Knotenpunkt für die Netzwerke darzustellen, die Inhalte von einer kurzfristigen in eine langfristige Speicherung überführen. Außerdem steht er auch mit emotionalen Prozessen und der räumlichen Orientierung in Zusammenhang (Trepel 2004).

Der Mandelkern nimmt ebenfalls einen wichtigen Part ein, wenn es um die Abspeicherung emotional betonter Gedächtnisinhalte geht. Aber er steht auch in Zusammenhang mit der Auslösung von Angst- und Fluchtreaktionen sowie anderen emotional ausgelösten motorischen Verhaltensweisen, z. B. Lachen (Trepel 2004). Bekannt ist er als zentraler Bestandteil des Angstnetzwerkes im Gehirn. Mittlerweile weiß man, dass er wesentlich mehr Aufgaben erfüllt und unter anderem bei emotionalen Reaktionen, positiv wie negativ, die einen hohen Aktivierungsanteil haben, besonders aktiv wird (Abler/Erk/Walter 2005).

Neben dem Großhirn sind auch das Kleinhirn und der Hirnstamm Teil des Gehirns und mit bloßem Auge gut zu erkennen. Das Kleinhirn hat seinen Aufgabenschwerpunkt in der Koordination und Feinabstimmung von Bewegungsabläufen und spielt damit eine entscheidende Rolle bei der Aufrechterhaltung der Balance. Mittlerweile deutet immer mehr darauf hin, dass das Kleinhirn auch an kognitiven und emotionalen Funktionen sowie bei der Orientierung im dreidimensionalen Raum beteiligt ist (Trepel 2004).

Der Hirnstamm hingegen kümmert sich schwerpunktmäßig um viele wichtige Überlebensfunktionen wie Atmung, Herzschlag und den Schlaf-Wach-Rhythmus. Er ist aber auch bei der Augenbewegungskoordination und den optischen Reflexen (z.B. Pupillenreflex) involviert (Trepel 2004).

3. Die Nervenzellen – kleinste Baueinheit unseres Gehirns

Wenn, wie oben beschrieben, ein konserviertes und somit festes Gehirn in Scheiben geschnitten wird, fällt auf, dass hellere und dunklere Schichten sich abwechseln. Die dunkleren Schichten werden als »graue Substanz« bezeichnet, die helleren Schichten als »weiße Substanz«. Die graue Substanz erscheint deshalb grau, weil sich in ihr viele Zellkerne aneinanderreihen. Die weiße Substanz erscheint weiß, weil sich darin vor allem die Fortsätze der Nervenzellen und der hauptsächlich für die Versorgung der anderen Zellen zuständige Zelltyp der Gliazellen befinden. Zellkerne finden sich in der weißen Substanz nur sehr kleine. Die weiße Farbe kommt von der die Fortsätze umhüllenden Fettschicht (*Myelin*). Da zumeist die graue Substanz an allen Seiten von weißer Substanz umgeben ist, erscheint das lebende Gehirn weißlich (Trepel 2004).

Jetzt sind wir schon mitten in der Beschreibung des Baustoffs unseres Gehirns, der Nervenzellen oder *Neuronen*. Diese würden sichtbar, wenn wir dünne Scheiben des Gehirns unter ein Mikroskop legen würden. Das Gehirn enthält circa 10^{12} Nerven-

zellen. Es gibt verschiedene Arten von Nervenzellen, ihr Grundaufbau ist jedoch sehr ähnlich. Neuronen sind die spezialisierten Zellen unseres Gehirns, die elektrische Signale, die sie über Nervenfasern aus anderen Teilen des Körpers erreichen (zumeist Aktionspotenziale), weiterleiten können. Außerdem gibt es im Gehirn noch die sogenannten *Gliazellen*, die hauptsächlich für die Versorgung der Nervenzellen zuständig sind. Die Gliazellen machen die größte Masse im Gehirn aus und stellen ca. 90 Prozent der Zellen (Trepel 2004).

Jedes Neuron besteht aus einem Zellkörper (*Soma*) mit Zellkern und Fortsätzen (vgl. Abb. 4). Bei den Fortsätzen wird zwischen *Dendriten*, die dem Erregungsempfang dienen, und *Axonen*, die Erregungen weiterleiten, unterschieden. Am Ende des Axons befindet sich das sogenannte »synaptische Endknöpfchen«. Zusammen mit der Membran der daran anschließenden Zelle und dem dazwischenliegenden Spalt bildet es die *Synapse*. Synapsen sind die Stellen, an denen die elektrischen Impulse von einem Neuron zum nächsten übertragen werden. Diese Erregungsübertragung zwischen den Neuronen findet meistens chemisch mittels sogenannter *Neurotransmitter* statt. Diese Überträgerstoffe werden am Ende der einen Nervenzelle in den synaptischen Spalt freigesetzt, docken dann an dafür vorgesehenen Rezeptoren der nächsten Zelle an und verändern damit die Durchlässigkeit der Membran dieser Zelle. Dadurch können positiv bzw. negativ geladene Ionen die Zelle verlassen oder einströmen. Es kommt also zu einer momentanen Veränderung des Membranpotenzials der betreffenden Zelle. Dieser Prozess führt letztendlich dazu, dass die Zelle erregt und der Impuls weitergeleitet wird.

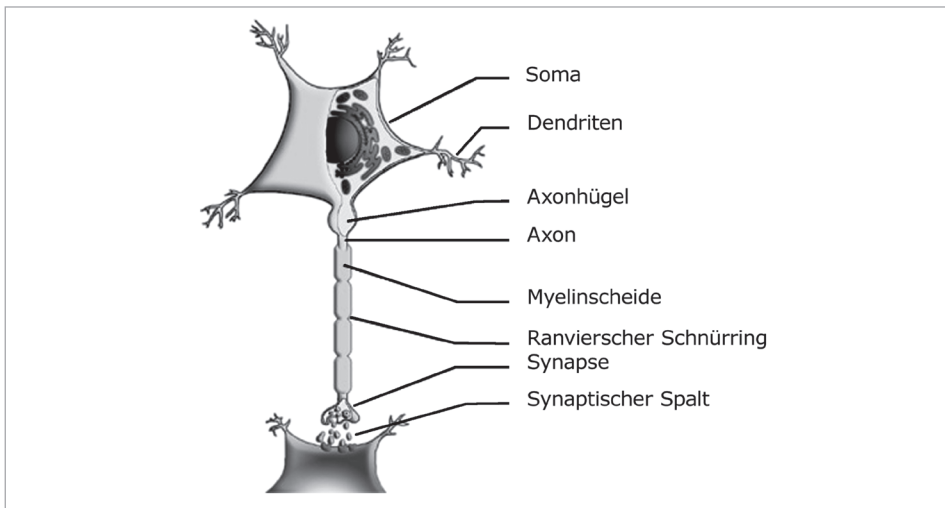


Abb. 4: Nervenzelle und Synapse mit Bezeichnungen (www.lukashensel.de)

Strom ist also eine entscheidende Komponente beim Verstehen dieser Prozesse, denn die Weiterleitung des Impulses erfolgt nach der kurzen chemischen Übertragung mit-

tels der Neurotransmitter dann wieder elektrisch. Allerdings kann auch eine Hemmung des Impulses die Folge sein, das hängt von den beteiligten Neurotransmittern ab. Diese werden nach ihrer Ausschüttung auf verschiedenste Weise deaktiviert, abgebaut oder wieder in die Zelle aufgenommen (Trepel 2004). Diese Prozesse spielen bei der Behandlung psychiatrischer Erkrankungen mit Psychopharmaka eine entscheidende Rolle. So ist z.B. das populäre Medikament Prozac zur Behandlung von Depressionen (Wirkstoff Fluoxetin) ein selektiver Serotonin-Wiederaufnahme-Hemmer, der den Abbau des Neurotransmitters Serotonin verhindert und damit Einfluss auf den Gehirnstoffwechsel nimmt.

Der wichtigste erregende Neurotransmitter ist Glutamat. Die wichtigsten hemmenden Neurotransmitter sind Gamma-Aminobuttersäure (GABA) und Glycin. Andere bekannte Überträgerstoffe sind Noradrenalin, Acetylcholin, Dopamin und Serotonin. Damit die Weiterleitung des Impulses entlang dem Axon bis zur Synapse besonders schnell verläuft, gibt es die sogenannte *Myelinschicht*. Dies ist eine Art Fettschicht, die von bestimmten Zellarten (Schwann'schen Zellen im Rückenmark und Oligodendrozyten im Gehirn) gebildet wird. Die Myelinisierung oder Markscheidenbildung beginnt beim Menschen am Ende der Schwangerschaft und hält in einigen Bereichen des Gehirns bis in das Erwachsenenalter hinein an.

Auf diese Weise ist das Neuron mit sehr vielen anderen Nervenzellen (bis zu 20.000) verbunden und bekommt gleichzeitig sowohl hemmende als auch erregende Impulse gesendet. Es »verrechnet« die hemmenden mit den erregenden Impulsen und verhält sich entsprechend: Reicht die Menge der erregenden Impulse aus, die Zelle zu erregen, wird der Impuls an eine andere Zelle weitergegeben (Trepel 2004). In der hemmenden und erregenden Wirkung und in den unzähligen Verbindungen der Nervenzellen untereinander wird auch die Komplexität dieser ganzen Prozesse spürbar.

4. Wie kommt die Welt in den Kopf und wie bleibt sie dort? Lernen im Gehirn und die Neuroplastizität

► *Nun haben wir eine Ahnung davon, wie Nervenzellen untereinander elektrische Impulse weiterleiten. Aber wie funktioniert Lernen? Und wie sind die Dinge, die wir erleben, im Gehirn verankert?*

Was passiert, wenn uns z.B. ein Mensch an der Ampel flüchtig anschaut? Für den Bruchteil einer Sekunde wird dann die Form »raum-zeitlicher Muster kohärent schwingender Neuronengruppen« kurz verändert und komplizierte Prozesse (in der Fachsprache: *Long Term Potentiation* [LTP] oder *Long Term Depression* [LTD]) werden angestoßen. Durch diese Prozesse können die Veränderungen an den Membranpotenzialen für Minuten und sogar Stunden erhalten bleiben. Es erfolgt also eine kurzfristige Veränderung an den Kontaktstellen der Zellen. Wenn nun danach keine erneute Stimulation der Zellen erfolgt bzw. die emotionale Beteiligung zu gering war, kehren diese veränderten Membranpotenziale wieder in ihr Ursprungsniveau zurück,

d.h. die Erinnerung verblasst. All die vielen unbedeutenden Eindrücke des Tages, die wir erleben, gehen auf diese Weise verloren (Braus 2004).

► *Was passiert nun, wenn erneute Impulse aus der Umwelt diese Neuronengruppe stimulieren oder aber die emotionale Beteiligung sehr hoch ist?* Geschieht dies, werden weitere hoch komplizierte Prozesse angestoßen, die in ihrer Folge dazu führen, dass sich die Interaktion zwischen den Zellen verbessert. Es bilden sich neue Kontaktstellen, sogenannte »Dornfortsätze« oder *Spines*, zwischen den betreffenden Nervenzellen. Die Synapsen verändern auf diese Weise ihre Form (Abb. 5).

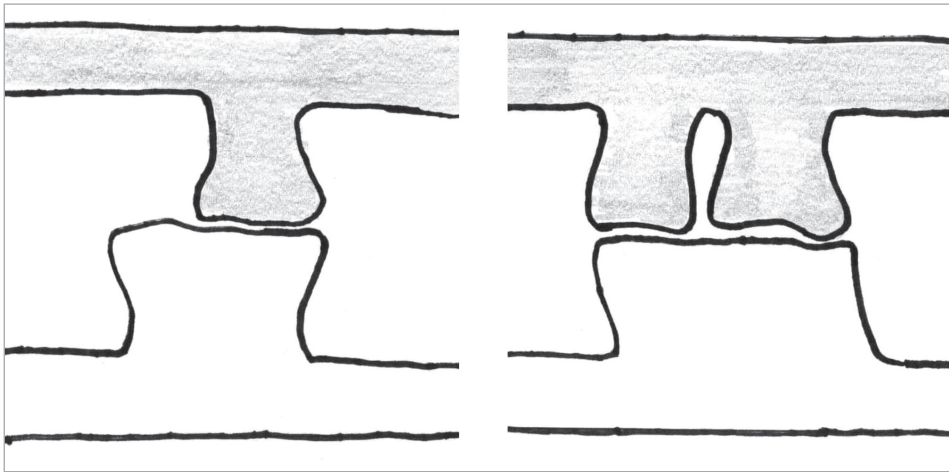


Abb. 5: Synapse vor und nach dem Lernprozess

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass für ein kurzfristiges Behalten von Erlebnissen eine Veränderung innerhalb bestehender synaptischer Verbindungen erfolgt und die langfristige Behaltensleistung auf die Veränderung der Menge der Synapsen zurückzuführen ist.

Man kann sich den Mechanismus stark vereinfacht vielleicht folgendermaßen vorstellen:

Stellen Sie sich selbst mit fünf Ihrer Freunde (→ Nervenzellen) vor. Jeder von Ihnen arbeitet in einem anderen Bereich. Nun kommt bei Ihnen eine Mehrbelastung dazu, Ihr Job verlangt plötzlich dreifachen Einsatz (→ immer wieder kommen die gleichen Impulse oder aber das Ereignis ist emotional sehr aktivierend). Das können Sie alleine nicht leisten. Können Sie sich vorstellen, dass Sie zwei Ihrer Freunde fragen, ob sie bei Ihnen mitarbeiten?

Auf Zellebene ist das möglich, und zwar deshalb, weil Zellen im Prinzip dieselbe »Ausbildung« haben und vor allem, weil sie nicht an Überlastung sterben können. Ihre zwei »Zellenfreunde« machen nun also ihre Arbeit so intensiv weiter wie bisher und

greifen zusätzlich noch Ihnen unter die Arme (→ neue Verbindungen zwischen den Zellen werden geschlossen).

Wenn die Belastung bei Ihnen nachlässt, hören die beiden Freunde wieder auf und gehen nur noch ihrer vorherigen Tätigkeit nach. Vereinfacht dargestellt ist das auf Zellebene auch so. Es kommen also keine neuen Zellen hinzu, wenn wir bestimmte Bereiche mehr beanspruchen, sondern die vorhandenen Zellen vernetzen sich intensiver und sind so in der Lage, sich den Anforderungen anzupassen. Genauso ist es, wenn Anforderungen nachlassen.

Auf diese Weise verändern Eindrücke aus der Umwelt die Struktur unseres Gehirns. Das Geschehene ist in unserem Gehirn verankert. Durch die bessere Verdrahtung der Nervenzellen reichen nun weniger Reize aus, um das gesamte Netzwerk zu aktivieren. Werden nun Verbindungen zwischen Nervenzellen lange nicht benötigt (z.B. eine in der Schule gelernte Fremdsprache, die lange nicht verwendet wurde), so lösen sich diese Verbindungen langsam wieder auf. Man nimmt an, dass dieser Prozess für das Vergessen verantwortlich ist.

Die Tatsache, dass Lernvorgänge zu einer Vergrößerung der Zellverbände führen, die nun auf entsprechende Reize aus der Umwelt reagieren, konnte man bei direkten Nervenzellableitungen bei Affen nachweisen (z.B. Jenkins/Merzenich/Recanzone 1990). Den Affen wird die Schädeldecke geöffnet, und an einzelne Bereiche des Gehirns werden Drähte angeschlossen, die es ermöglichen, den minimalen Stromfluss der Nervenzellen beim Reagieren auf den Reiz abzuleiten. In einer schmerzfreien Variante wird die Ableitung der Gehirnströme mittels Elektroenzephalogramm (EEG) auch beim Menschen sowohl für die Forschung als auch für die Diagnose von Erkrankungen genutzt.

► *Wie kann nun der Einfluss von Emotionen auf diesen Prozess beschrieben werden?* Bei emotionalen Prozessen sind sehr viele unterschiedliche Gehirnregionen beteiligt (Martin-Sölch 2004). Diese Prozesse lösen die Ausschüttung verschiedener Transmitterstoffe aus und können auf diese Weise die Verfestigung von Gedächtnisinhalten fördern. Eine solche modulierende Wirkung wird besonders Dopamin und Serotonin zugesprochen (Braus 2004). Im Vergleich zur Transmission, die für die Reizübermittlung von einem Neuron zum anderen zuständig ist, wirkt die Neuromodulation auf eine größere Anzahl von Neuronen, die auch weiter entfernt sein können. Kompliziert wird die Sache dadurch, dass Botenstoffe, die in einem Gebiet als Transmitter wirken, in einem anderen Gebiet als Neuromodulatoren wirken können. – Zurück zu unserem Beispiel mit der Person an der Ampel:

Stellen Sie sich vor, Sie meinen, in einer Person, die Sie an der Ampel treffen, Ihre große Jugendliebe wiedererkannt zu haben.

Was passiert in diesem Moment? Sie sind emotional hoch aktiviert. Sie spüren vielleicht eine aufkommende Wärme und einen schnelleren Herzschlag.

► *Was passiert jetzt in Ihrem Gehirn?* Die neuromodulatorischen Überträgerstoffe strömen aus und führen dazu, dass die oben beschriebene kurzfristige Veränderung

an den Synapsen schneller erfolgt. Manchmal kann es dann sogar durch eine starke emotionale Aktivierung sofort zu einer länger anhaltenden Veränderung an den Kontaktstellen kommen (z.B. Ausbildung von *Spines*) und die Erinnerung wie »eingebrennt« erscheinen.

Ein klassisches Beispiel für eine so starke emotionale Erinnerung ist für viele Menschen der 11. September 2001, an den sie sich sehr detailliert erinnern können.

Die geschilderten Mechanismen geben erste Erklärungsversuche auf neurowissenschaftlicher Ebene für die Bedeutung der Emotionen für den Lernprozess. Wie man mittlerweile herausgefunden hat, werden nicht nur Belohnung (positive Emotion) und Bestrafung (negative Emotion), sondern auch überraschende Ereignisse und die Begegnung mit Neuem von einer dopaminergen Stimulation begleitet. Das Gehirn scheint die Fähigkeit zu besitzen, die nächsten Millisekunden im Voraus »berechnen« zu können, und kann so einen Abgleich mit den dann tatsächlich eintretenden Ereignissen vornehmen. Tritt das Erwartete ein, muss nichts Neues gelernt werden. Tritt aber das Unerwartete ein, wird Lernen unter Einbezug des Frontalhirns und insbesondere der *Amygdala-Hippocampus*-Formation erleichtert (Braus 2004).

Es scheint dabei sowohl ein Modul für das Vermeidungslernen zu geben als auch ein Modul für positive Ereignisse, die unterschiedliche Netzwerke nutzen:

- *aversives Lernen*: »schlechter als erwartet«, z. B. Hand auf der heißen Herdplatte;
- *positive Ereignisse*: »besser als erwartet«, z. B. klappt nach langem Üben am Klavier endlich dieser verflixte Basslauf.

Eine wichtige Aufgabe im Netzwerk für das aversive Lernen scheint der *Amygdala*, dem Mandelkern, zuzukommen, während im Netzwerk für die positiven Ereignisse dem *Nucleus accumbens* eine wichtige Rolle zuteil wird. In diesen Mechanismen vermutet man die neurobiologischen Grundlagen motivationaler Prozesse: Dinge, die uns gut tun, wollen wir öfter tun, und Dinge, die uns schaden, versuchen wir zu vermeiden.

Einen kleinen Haken hat die Sache allerdings schon, der von besonderer praktischer Relevanz ist. Denn dieser besonders positive »Kick«, der durch Dopamin und die sich daran anschließende Ausschüttung körpereigener Opiate durch den *Nucleus accumbens* (Spitzer 2002) ausgelöst wird, tritt nur dann ein, wenn etwas besser ist als erwartet. Eine *vorhersagbare* Belohnung löst diesen »Kick« nicht in dieser Art aus.

Ein klassisches Beispiel aus der Schule: Über eine Eins, die man erwartet hat, freut man sich lange nicht so wie über eine Vier, wenn man mit einer Fünf gerechnet hat.

Die Grundlagen für dieses Phänomen lassen sich somit auch in unserem Gehirn finden. Dieser Mechanismus ist in evolutionärer Hinsicht äußerst praktisch, denn so sind wir angetrieben, uns ständig weiterzuentwickeln und nicht auf der Stelle zu tre-

ten. Und genau hier liegt die Krux: Wir werden zu Geiseln einer ständigen Sucht nach Besserem. »Eigentlich ist es nur ein Gier-System, das uns vorgaukelt, glücklicher zu sein, wenn wir XY hätten. Haben wir aber XY, flüstert es sofort: Du hast aber noch nicht Z. Und dann geht's wieder von vorne los. Endlos«, so Eckart von Hirschhausen im Epilog zu »Braintertainment 2.0« (Spitzer/Bertram 2010, S. 350), und weiter: »Miss Wanting ist die grausamste Geliebte unseres Gehirns, die effektivste Gegenspielerin des Glücks.«

Wie wir bereits wissen, dient Lernen nur einem einzigen Zweck, und zwar unserer Anpassung an die Umwelt und ihren Herausforderungen. Jedes Lebewesen, so auch der Mensch, besitzt von jeher diese Fähigkeit in seinem Organismus. Und im Gehirn nennt man diese einzigartige Fähigkeit *Neuroplastizität*: »Neuroplastizität ist die Fähigkeit des Gehirns, sich an die Erfordernisse der Umwelt anzupassen, zu lernen, vorhandene Funktionen zu reorganisieren und zu optimieren, sowie kleine Defizite auszugleichen« (Braus 2004, S. 217).

Plastizität ist eigentlich ein Begriff aus der Werkstoffkunde. Dort unterscheidet man zwischen plastischen und elastischen Materialien. Wenn auf ein elastisches Material eine Kraft einwirkt, verformt es sich. Wenn die Kraft nachlässt, geht das Material wieder in seine ursprüngliche Form zurück. Es sieht aus, als sei gar nichts gewesen. Anders verhält sich plastisches Material: Wird die einwirkende Kraft weggenommen, bleibt das Material verformt. Es hat sich an die Kraft angepasst. Es hat sich »gemerkt«, was passiert ist. Es hat sich in Abhängigkeit von der Umwelt – der Kraft – verändert. In diesem Sinne gebrauchen auch Neurowissenschaftler den Begriff »Plastizität« und meinen damit, dass sich das Gehirn anpasst. Übung und Erfahrung, aber auch Nichtnutzung, also die Umwelt im Allgemeinen, verändern die Strukturen des Gehirns.

5. Die Neuroplastizität im Verlauf des Lebens

Die Bildung der Nervenzellen beginnt in den ersten drei Schwangerschaftsmonaten; dabei werden sehr viel mehr Nervenzellen entwickelt, als gebraucht werden. Ungefähr die Hälfte der Nervenzellen stirbt, und es überleben nur diejenigen, die sich aktiv mit anderen Nervenzellen verbinden. Die absolute Anzahl der Nervenzellen bleibt dann über die Lebenszeit ungefähr konstant. Was sich hauptsächlich verändert, ist die Anzahl der Verbindungen zwischen ihnen. Diesen Prozess der Neubildung von Nervenzellenverbindungen nennt man *Synaptogenese*.

Während der Entwicklung durchläuft das Gehirn mehrere Phasen der Reorganisation – diese betrifft nicht die Nervenzelle selbst, sondern nur ihre Verbindungsstellen. Wenn ein Baby auf die Welt kommt, vernetzen sich die Nervenzellen massiv und die Anzahl der Verbindungen in dieser Zeit übersteigt die Anzahl der Verbindungen in einem erwachsenen Gehirn bei Weitem. Vor allem die ersten drei Lebensjahre sind hierbei entscheidend.

Aus Tierversuchen weiß man, dass es neben dem drastischen Anstieg der Verbindungen auch kritische Perioden in der Entwicklung gibt, in denen bestimmte Berei-

che des Gehirns besonders von der Umwelt geprägt werden, und dass eine reizreichere Umgebung im Vergleich zu reizärmeren Umgebungen dazu führt, dass sich mehr Verbindungen bilden. Auf den Menschen lassen sich diese Befunde nicht 1:1 übertragen. Allerdings zeigen Untersuchungen am menschlichen visuellen Kortex, dass auch dort in den ersten Lebensmonaten die Vernetzung zwischen den Nervenzellen stark zunimmt. Danach folgen eine Phase der Selektion und der Abbau einiger Verbindungen. Ab dem Alter von etwa zehn Jahren bleibt die Synapsendichte für den Rest des Lebens konstant. Das menschliche Gehirn reift allerdings sehr viel langsamer als das anderer Lebewesen, und so ist eine Selektion mit Auf- und Abbau von Verbindungen, z. B. im Frontalhirn, bis weit in die Adoleszenz hinein zu beobachten. Reorganisationsprozesse in diesem Bereich sind zumeist erst mit Ende 20 komplett abgeschlossen. Dieser Teil des Gehirns ist derjenige, der zuletzt seine volle Reifung erreicht.

Auch die Ausbildung der Myelinschicht ist ein Prozess, der in der Kindheit stark voranschreitet. Wie beschrieben sorgt diese Schicht dafür, dass Reizweiterleitung zwischen den Nervenzellen sehr viel schneller vonstattengeht. Von kritischen Entwicklungsperioden wird bei der Entwicklung des Menschen weniger gesprochen, vielmehr von sensiblen Phasen, in denen das Gehirn besonders aufnahmefähig ist für bestimmte Reize aus der Umwelt. Solche Phasen werden z. B. für die Sprachentwicklung beschrieben. Das heißt aber nicht, dass man Fähigkeiten nach diesen Phasen nicht mehr erwerben könnte. Dies ist durchaus möglich, allerdings haben diese Fähigkeiten oft eine andere Qualität und sind möglicherweise in anderen Netzwerken im Gehirn verankert, z. B. beim Erlernen einer Fremdsprache als Erwachsener im Gegensatz zur Mehrsprachigkeit von Geburt an.

Im Hinblick auf eine reizreiche Umgebung lässt sich von der Wissenschaft her vermuten, dass eine »normale« Umgebung für das Kind absolut ausreicht, eine deprivierende Umgebung aber durchaus in der Lage ist, das Gehirn eines Babys zu schädigen. Eine Reorganisationsphase des Gehirns, der besonders seit der zunehmenden neurowissenschaftlichen Forschung eine stärkere Bedeutung zukommt, ist die Pubertät. Vor allem das Frontalhirn, das als Letztes reift, erfährt hier nochmals starke Umstrukturierungsprozesse. In erster Linie nimmt die weiße Substanz in diesem Bereich zu, was besonders auf eine stärkere Myelinisierung der Axone zurückzuführen ist. Aber auch die Anzahl von Nervenzellenverbindungen nimmt zunächst in der Pubertät zu. Darauf folgen eine stärkere Selektion und ein Abbau von Verbindungen nach der Pubertät. Dieses sogenannte »Fine-Tuning« ist ein wichtiger Prozess innerhalb der Gehirnreifung und verhilft dem Gehirn, seine volle Funktionsfähigkeit zu entwickeln (Blake-more/Frith 2007).

Die Pubertät ist nicht zuletzt wegen dieser Reorganisationsprozesse eine sensible Lebensphase. Ein direkter kausaler Zusammenhang mit »typisch pubertären« Verhaltensweisen lässt sich jedoch daraus nicht ohne Weiteres ableiten, denn gesellschaftliche Einflüsse haben einen weiteren entscheidenden Einfluss auf den Verlauf der Pubertät.

Unser Gehirn hört aber keineswegs nach der Pubertät auf, sich zu entwickeln, und das ist wohl einer der spannendsten Befunde der neurowissenschaftlichen Forschung

der letzten Jahre: Unser Gehirn verändert sich ein Leben lang, und zwar gebrauchtsabhängig. »Use it or lose it!« ist hier die Devise. Fähigkeiten und Wissen, die nicht gebraucht werden, werden – anders als beim Computer – über die Jahre »gelöscht« (Blakemore/Frith 2007). Ein täglich in vielen Bereichen gefordertes Gehirn kann seine Leistungsfähigkeit bis ins hohe Alter behalten, wenn keine pathologischen Abbauprozesse beginnen (z. B. Demenz, Morbus Alzheimer).

Eine klassische Studie aus diesem Forschungsbereich ist die von Maguire und Kollegen (2006) zur Größe des Hippocampus bei Londoner Taxifahrern. Das faszinierende Ergebnis dieser Studie legt nahe: Je mehr Menschen ihr räumliches Orientierungsvermögen nutzen (z. B. beim Taxifahren), desto größer ist ein bestimmter Bereich ihres Hippocampus. Für unser tägliches Leben steckt in dieser Erkenntnis besonders viel praktische Relevanz. Denn sie fordert uns auf, unser Gehirn täglich mit komplexen Aufgaben herauszufordern und ihm die Möglichkeit zu geben, Neues zu lernen. Dabei geht es nicht darum, das hundertste Sudoku oder das tausendste Kreuzworträtsel zu lösen. Denn Lernen ist mehr als das Ausführen von Routinen. In diesem Sinne:

Wagen Sie Neues und nutzen Sie das Potenzial Ihres Gehirns, dann werden Sie wahrscheinlich auch lange Freude an ihm haben!

Literatur

- Abler, B./Erk, S./Walter, H. (2005): Das menschliche Belohnungssystem. In: *Nervenheilkunde*, H. 3, S. 167–176.
- Blakemore, S.-J./Frith, U. (2007): *The Learning Brain – Lessons for Education*. Malden/Oxford/Carlton: Blackwell Publishing.
- Braus, D.F. (2004): Neurobiologie des Lernens – Grundlagen eines Veränderungsprozesses. In: *Psychiatrische Praxis* 31, H. 2, S. 215–223.
- Dickerson, B.C./Miller, S.L./Greve, D.N./Dale, A.M./Albert, M.S./Schacter, D.L./Sperling, R.A. (2007): Prefrontal-Hippocampal-Fusiform Activity during Encoding Predicts Intraindividual Differences in Free Recall Ability. An Event-Related Functional-Anatomic MRI Study. In: *Hippocampus*, Bd. 17, Ausg. 11, S. 1060–1070.
- Jenkins, W.M./Merzenich, M.M./Recanzone, G. (1990): Neocortical Representational Dynamics in Adult Primates. Implications for Neuropsychology. In: *Neuropsychologia* 28, H. 6, S. 573–584.
- Maguire, E. A./Nannery, R./Spiers, H. J. (2006): Navigation around London by a Taxi Driver with Bilateral Hippocampal Lesions. In: *Brain* 129, S. 2894–2907.
- Martin-Sölch, C. (2004): Neurowissenschaftliche Aspekte der Emotionsregulation. In: *Psychotherapie Forum* 12, S. 71–78.
- Spitzer, M. (2002): *Lernen – Gehirnforschung und die Schule des Lebens*. Heidelberg/Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Spitzer, M./Bertram, W. (2010): *Hirnforschung für Neu(ro)gierige: Braintertainment 2.0*. Stuttgart: Schattauer.
- Trepel, M. (2004): *Neuroanatomie – Struktur und Funktion*. 3. Aufl. München/Jena: Urban & Fischer.