

2

Sensorische Signale und ihre Bewusstwerdung

2.1 Neuronale Vernetzung sensorischer Signale

Die synaptische Verschaltung von vielen Milliarden Neuronen ist einerseits durch robust machende Parallelität, andererseits durch datenreduzierende Bündelung charakterisiert. Rückwärts gerichtete, hemmende Neuronen bewirken eine zeitliche Kontrastierung, in Nebenbahnen gerichtete eine räumliche. Somit konzentriert sich die Verarbeitung des Gehirns auf Aktuelles und Bedeutungsvolles.

2.1.1 Neuronale Grundschaltungen

Die vorangegangenen Abschnitte haben die Entstehung neuronaler Erregungen durch Sensorzellen behandelt sowie die Weiterleitung der Signale über Axone und Synapsen. Nach dem beschriebenen Grundprinzip arbeiten die hundert Milliarden am Nervensystem beteiligten Neuronen. Durch eine noch weit größere Anzahl von Synapsen sind sie zu einem Netzwerk verknüpft, wobei anzunehmen ist, dass jedes Neuron mit jedem anderen letztlich in irgend-

welcher Verbindung steht. A priori ergeben sich unendlich viele Möglichkeiten der Verschaltung. Doch finden sich Schaltungsmuster, die sich in verschiedensten Ebenen wiederholen, womit wir sie als *Grundschaltungen* einstufen können. Besonders klar ausgeprägt sind sie an der Peripherie, einschließlich des Rückenmarks. Im Folgenden wird zunächst auf afferente – zum Gehirn gerichtete – Vernetzung eingegangen. Analoge Schaltmuster finden sich auch für den zur Peripherie gerichteten Rückweg, der im Kap. 3 behandelt wird.

Die Mannigfaltigkeit der Sensoren und ihre Verteilung über den gesamten Organismus bedeuten, dass er selbst im Zustand scheinbarer Ruhe von vielen sensorischen Erregungen erfüllt ist. Ihre gesamtheitliche Weiterleitung an zentrale Regionen des Gehirns würde seine Überforderung bedeuten. Zu ihrer Vermeidung hat die Evolution Mechanismen der Bündelung, Konzentrierung, Filterung und Verkopplung entwickelt. Neuronale Vernetzung führt zur *Reduktion der Datenmenge*. Dies geschieht etappenweise; zunächst in den Eingangsregionen des zentralen Nervensystems. An das sensorische Verarbeitungszentrum des Großhirns letztlich gelangen nur solche Informationen, die durch besondere Relevanz und Aktualität gekennzeichnet sind. Und für den Prozess der Bewusstwerdung gilt dies schließlich auch, jedoch bei noch viel weiter gesteigerter Selektion.

Die im Nervensystem insgesamt transportierte Datenmenge ist ungeheuerlich groß, da funktionelle Verbindungen nicht einfach geführt werden, sondern in ausgeprägter *Parallelität*. Computer verwenden serielle Abarbeitung. Als ihr Nachteil kann eine einzige Fehlstelle zur Blockade des Gesamtbetriebes führen. Die entsprechende Defektan-

fälligkeit wäre für das Nervensystem fatal. Wohl aus dieser Erfahrung schaffte die Evolution ein System, das serielle Logik mit Parallelität der Leitungsführung verbindet. Funktionell gesehen sind Neuronen zwar hintereinander geschaltet. Doch als Tendenz ist jede Verbindung vielfach ausgeführt, mit dem Vorteil, dass Zerstörung oder Degeneration von einzelnen Neuronen in gewissen Grenzen ohne Auswirkung bleibt.

Die *Grundtendenz paralleler Verschaltung* ist in Abb. 2.1 angedeutet. Skizziert ist ein Axonenbündel 1 (etwa als Teil eines Nervs), das sensorische Erregungen über die Bahn 2 in Richtung Gehirn weiterleitet. Dazwischen liegende synaptische Umschaltung ermöglicht, dass die Verhältnisse durch ein Bündel 3 mitbestimmt werden können. Typisch ist, dass sogenannte Divergenz auftritt, das heißt Kollaterale (= Verästelungen) verteilen die Aktionsimpulse eines Axons über erregende Synapsen an viele nachfolgende Neuronen. Aktionsimpulse repräsentieren *digitale* Signale. Konvergenz – das heißt parallele Signalübergabe an viele Synapsen eines nachfolgenden Neurons – hingegen führt integrativ zu einem summarischen und somit *analogen* Signalverlauf. Am Axonhügel ergeben sich Ausgleichsströme, deren Stärke – im Sinne analoger Überlagerungen – mit zunehmender Anzahl feuernder Synapsen zunimmt. Wie im Abschn. 2.4.2 diskutiert, ergibt sich Zunahme auch aus großem Querschnitt einer Synapse und auch aus geringer Entfernung zwischen Synapse und Axonhügel.

Wie eben erwähnt, führt die Summation synaptischer Erregungen zu analogem Signalcharakter entlang von Dendriten und Soma bis hin zum Axonhügel. Gegenüber den nur Millisekunden dauernden einlangenden Aktionsim-

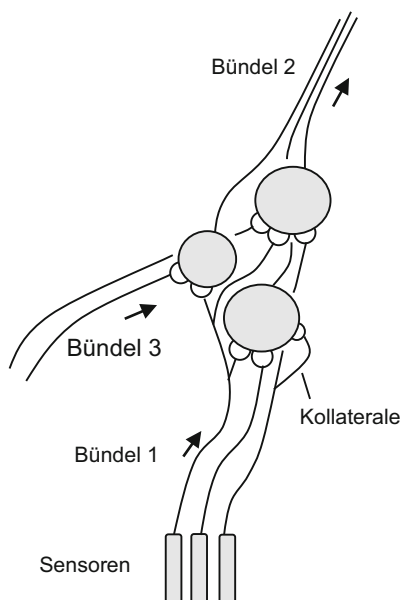


Abb. 2.1 Serielle Fortleitung sensorischer Signale in Richtung Gehirn, wobei gebündelte, parallele Ausführung der einzelnen Etappen erhöhte Betriebssicherheit erbringt. Entlang individueller Axone ist digitale Verarbeitung gegeben. Summation synaptischer Eingänge erbringt analoge Signalverläufe im Bereich von Dendriten und Soma. Die beiden Komponenten sind hier und im Weiteren zum Symbol eines Kreises zusammengefasst, wie in der Literatur allgemein üblich

pulsen können lang gezogene Ausgleichsströme resultieren, da *zeitlich verteiltes Eintreffen* der Impulse zu erwarten ist. Gewisse Streuung resultiert schon aus unterschiedlichen Längen der Sensoraxone, viel stärkere aber aus unterschiedlichen Querschnitten, wobei große Durchmesser ja hohe Signalgeschwindigkeit ergeben und umgekehrt.

2.1.2 Zeitliche und räumliche Kontrastierung

Besonders wichtig sind Grundsaltungen, an denen *inhibitorische Neuronen* beteiligt sind. Typisch ist, dass Axone von erregenden Neuronen in Umschaltregionen Kollaterale aufweisen, die hemmende Neuronen befeuern. Sie enden ihrerseits an Endknöpfen, die inhibitorische Transmitter ausschütten, für welche die postsynaptischen Neuronen rezeptorisch empfänglich sind. Im Fall der Bahn A von Abb. 2.2 wirkt das schwarz markierte inhibitorische Neuron in die eigene Bahn zurück. Diese zunächst sinnlos erscheinende Verschaltung ergibt *zeitlichen Kontrast*: Aktuell neu auftretende sensorische Erregungen werden unbeeinflusst in Richtung Gehirn weiter geleitet. Bleibt die Reizung hingegen bestehen, so kommt die hemmende Synapse in integrativer Weise zur Wirkung. Erregende Ausgleichsströme werden teilweise kompensiert. Aktionsimpulse kommen damit verzögert zustande, doch können sie auch gänzlich unterbleiben. Die Folgefrequenz von zum Gehirn laufenden Impulsen wird der Tendenz nach reduziert. Sinnhaftigkeit ist insofern gegeben, als das Gehirn von aktuell aufkommendem Geschehen Informationen erhält, von stationärem, wenig relevanten aber entlastet wird (zugunsten von Interessanterem).

Inhibitorische Synapsen arbeiten auch von einer Bahn in benachbarte andere, wie es in Abb. 2.2 für die Bahnen B bzw. C skizziert ist. Daraus resultiert *örtlicher Kontrast*. Generell gilt, dass eine stark erregte Region des Nervensystems andere Regionen hemmend beeinflusst. Dieses Prinzip gegenseitiger Rivalität begünstigt die Bearbeitung von Relevantem auf Kosten von Informationen geringerer Bedeutung. Örtlicher Kontrast findet sich auf verschiedensten

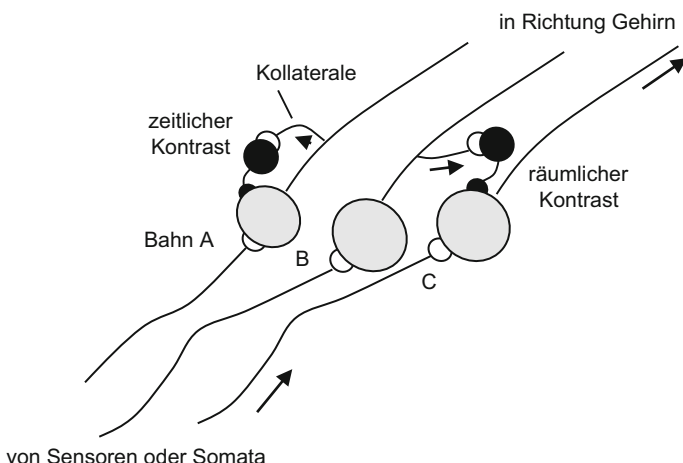


Abb. 2.2 Fortleitung sensorischer Signale in Richtung Gehirn, wobei Kollaterale auf schwarz markierte inhibitorische Neuronen einwirken. Sind diese – wie für die Bahn A gezeichnet – in die eigene Bahn gerichtet, so resultiert hemmende Wirkung, die mit Verzögerung auftritt und zeitlichen Kontrast ergibt. Sind sie – wie für B skizziert – auf eine Nachbarbahn – hier C – gerichtet, so ergibt sich räumlicher Kontrast. Typischerweise stehen benachbarte Bahnen in gegenseitiger Konkurrenz. Das heißt, dass unter anderem auch C auf B rückwirkt

Ebenen des Nervensystems, sogar zwischen einzelnen Regionen oder Feldern des Gehirns.

Nach dem global räumlichen Kontrastprinzip lässt sich beispielsweise erklären, dass eine ernste Bedrohung des Menschen stärkste Schmerzen vergessen lässt. Hypothetisch lässt sich damit auch die Erfahrung deuten, wonach sich Denken auf einen dominanten Inhalt konzentriert, der weitgehend abrupt von einem anderen übernommen werden kann. Deuten lässt sich auch, dass sich Bewusstsein

auf einen einzigen Inhalt zu beschränken scheint. Wie in späteren Abschnitten näher diskutiert, wird uns jener dominante Inhalt bewusst, der mit aktuell größter Intensität verarbeitet wird und somit mit vehementester neuronaler Erregung einhergeht.

2.2 Einlauf sensorischer Signale in das Gehirn

Wie in der Literatur der Hirnforschung eingehend beschrieben, verlaufen sensorische Signale typischer Weise vom Rückenmark kommend durch die verschiedenen Bereiche des Hirnstamms über das Zwischenhirn in die vielen spezifischen Verarbeitungsbereiche der Großhirnrinde. Die „höhere“ Verarbeitung umfasst logische Umsetzungen, Abspeicherungen, Bewegungsauslösung (im Sinne des Handelns) und schließlich auch die Bewusstmachung – als Problembereiche der nachfolgenden Abschnitte.

2.2.1 Bereiche des Gehirns

Neuronale Vernetzungsmuster, wie im vorangegangenen Abschnitt behandelt, finden sich nicht nur in der Peripherie, sondern auch in den verschiedenen Bereichen des Hirninneren. Hier soll zunächst die globale Verarbeitung sensorischer Signale zusammengefasst werden.

Von der Seite betrachtet, wie in Abb. 2.3, sind die verschiedenen *Bereiche des Gehirns* von der bis zu 5 mm dicken Großhirnrinde – dem sogenannten Kortex – verdeckt; mit

Ausnahme von Teilen des Kleinhirns und des Hirnstamms. Der im Inneren verlaufende, etwaige globale Pfad sensorischer Signale ist punktiert angedeutet. Vom Rückenmark kommende Erregungen geraten zunächst in die verschiedenen Bereiche des Hirnstamms (verlängertes Rückenmark, Brücke und Mittelhirn), der einen dem Rückenmark ähnlichen Aufbau zeigt, mit analoger sammelnd/verteilernder Funktion. Danach folgt das Zwischenhirn mit Anteilen des schon als Umschaltstelle erwähnten Thalamus.

Der weitere Signalweg ist vom Inneren kommend räumlich, radial verteilend zu denken. Er mündet letztlich in die verschiedenen Areale bzw. *Felder der Großhirnrinde*. Die Hirnforschung definiert etwa fünfzig verschiedene Felder entsprechend ihrer speziellen Zuordnung oder Funktion. In zunehmendem Maße sind detaillierte Kenntnisse gegeben.¹ Einerseits stammen sie von Ausfällen nach lokalen Verletzungen des Gehirns; andererseits aus zunehmender Auflösung von bildgebenden Analyseverfahren (Abschn. 1.6.4 bis 1.6.6) wie Kernspintomographie (NMR) und Positronenemmissions-Tomographie (PET) sowie der quasi klassischen Elektroenzephalographie (EEG) bzw. Magnetoenzephalographie (MEG). Diese guten Kenntnisse der Hirnforschung betreffen die funktionelle *Bedeutung* der einzelnen Felder. Über das eigentliche Funktionieren ist generell nur sehr wenig bekannt.

In Abb. 2.3 sind nur einige wenige Beispiele von Feldern angedeutet. Vom peripheren Körper (dem globalen Soma) kommende, sensorische Signale werden im somatosensorischen Feld verarbeitet. Es befindet sich hinter der

¹ Vgl. z. B. die breite Übersicht in Roth 2001, S. 139 ff.

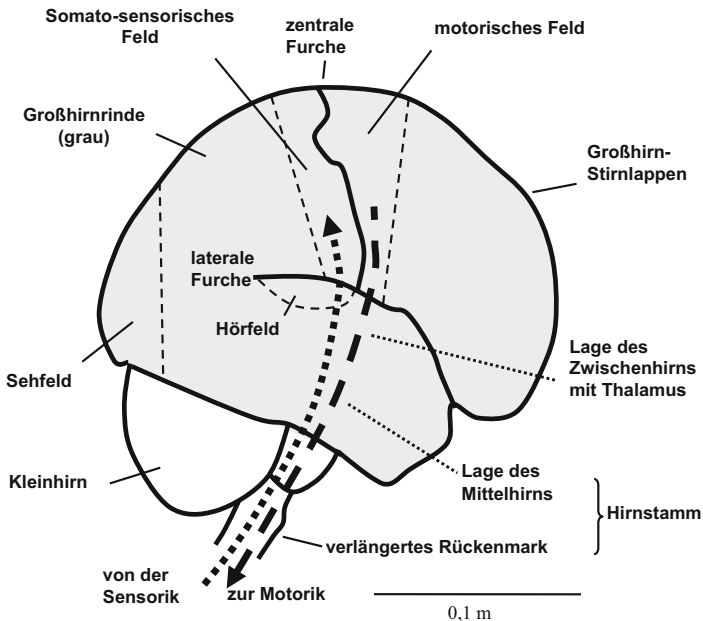


Abb. 2.3 An der Verarbeitung sensorischer Signale beteiligte Bereiche des Gehirns. Der graue Bereich zeigt die Oberfläche der Hirnrinde mit der etwaigen Lage des somato-sensorischen Verarbeitungszentrums. Ferner sind Zentren des Hör- und Sehnsinns angegeben. Punktiert angedeutet ist der – im Inneren zu denkende – Pfad von der Peripherie kommender sensorischer Signale. Vom Rückenmark einmündend verlaufen sie dem – zu ihm analog aufgebauten – Hirnstamm entlang, wo auch Signale der Sinnesorgane einmünden. Danach folgt das Zwischenhirn (mit dem Thalamus als dominantem Umschaltort). Letztlich verteilen sich die Signale – quasi aus dem Inneren heraus – an die Hirnrinde, den Kortex. Zusätzlich markiert ist der motorische Bereich und der (strichlierte) Pfad der Rückleitung an die Motorik. Die Marke verweist auf die anfallenden Strecken der Signalläufe. Als grobe Orientierungsregel können zehn Zentimeter in zehn Millisekunden durchlaufen werden. Dabei kommt es freilich darauf an, welche Neuronentypen beteiligt sind und wie viele Synapsen im Übertragungsweg passiert werden

zentralen Furche, die den Kortex in sogenannte Lappen teilt. Von den verschiedenen Sinnesorganen kommende Signale folgen sehr spezifischen Pfaden. So landen visuelle Informationen am Hinterkopf, auditorische hingegen seitlich, nahe der lateralen Furche. Auch die höhere Signalverarbeitung ist auf Felder verteilt, die deutlich getrennt liegen können. Letztlich ist die primär motorische Verarbeitung nur durch die zentrale Furche von der primär sensorischen getrennt. Wie allgemein bekannt, sind den verschiedenen Körperteilen einzelne Subregionen zugeordnet.

Die komplexe, „höhere“ *Verarbeitung* erfolgt in – im Bild nicht gekennzeichneten -ausgedehnten assoziativen Feldern. An der Generierung motorischer Signale wesentlich beteiligt sind die sogenannten Basalganglien des Großhirn-Kernbereiches sowie koordinierende Funktionen des Kleinhirns. Schließlich verlassen die generierten motorischen Erregungen das Gehirn im Wesentlichen auf dem umgekehrten Pfad der sensorischen.

2.2.2 Funktionelle Verarbeitung

Die funktionelle Verarbeitung sensorischer Signale ist in Abb. 2.4 zusammengefasst. Somato-sensorische Signale werden im Thalamus – u. a. des Zwischenhirns – oder auch schon im Hirnstamm umgeschaltet. Über sogenannte Hirnnerven münden dort auch die von Sinnesorganen kommenden Informationen ein. Die durch Umschaltungen im Hirnstamm bzw. Zwischenhirn reduzierte Datenmenge gelangt an das Großhirn, wo unterschiedlichste Aspekte höherer Verarbeitung anfallen. Aus biophysikalischer Sicht

Bewusstsein und optimierter Wille

Pfützner, H.

2014, XXIII, 280 S. 40 Abb., 7 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-642-54055-4