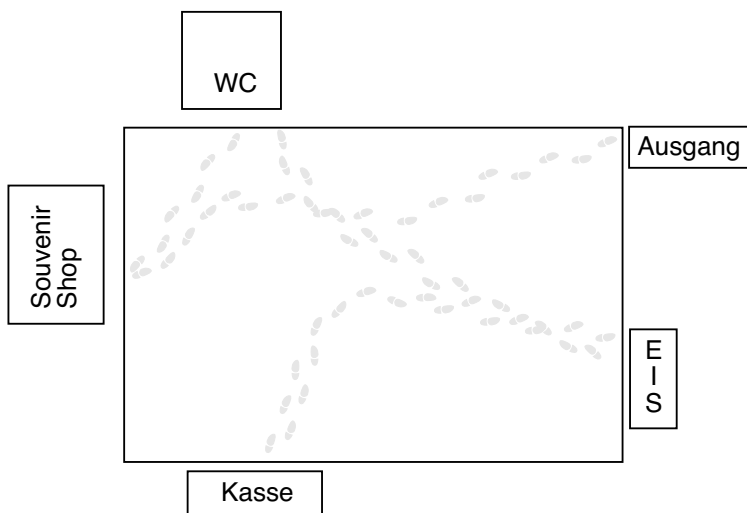


2 Spuren

Stellen Sie sich vor, Sie stehen auf einem Aussichtsturm in einem Park. Unter Ihnen liegt eine Rasenfläche, an die verschiedene Buden und Gebäude angrenzen, die Kasse für den Eintritt, eine Eisbude, ein kleiner Laden, eine Toilette und hinten der Ausgang. Sie beobachten, wie die Leute scheinbar ziellos auf dem Rasen umherlaufen. Wenn Sie wollen, stellen Sie sich vor, es ist Winter, und Sie sehen die Spuren der Leute im frischen Schnee. Der Park hat gerade geöffnet, und ein Besucher war schon da. Er lief zunächst etwas unschlüssig herum, trank an der Eisbude einen Glühwein, musste prompt auf die Toilette und nahm seinen Kindern im Laden noch eine Tüte Bonbons mit. Ein rein zufälliger Spaziergang durch den Park und eine zufällige Spur (siehe Abb. 2.1).

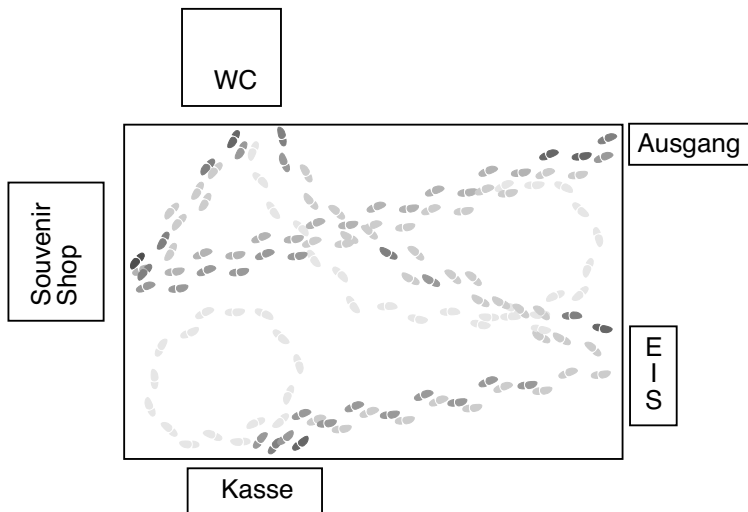
Jetzt kommen noch mehr Leute. Jeder Einzelne hat einen etwas anderen, eben seinen Weg und hinterlässt schwache Spuren im Schnee. Manche haben schlechte Schuhe, und anstatt eine neue Spur zu stapfen, nehmen sie eine bereits vorhandene. Man kann bei Betrachtung dieser Spuren ahnen, dass die an die Rasenfläche angrenzenden Gebäude geöffnet und in Funktion sind, denn die Leute laufen nicht völlig zufällig auf dem Rasen hin und her (Abb. 2.2).

Manchmal geht ein leichter Wind, und es schneit noch ein bisschen hinzu. Einzelne Spuren verschwinden daher wieder; hat sich aber ein Trampelpfad gebildet, so bleibt er erkennbar. Man kann sogar davon ausgehen, dass ein einmal ausgebildeter Pfad sich selbst erhält und die Leute auf ihm laufen, einfach, weil er da ist. Nehmen wir also an, der Eisverkäufer ist einen Tag krank. Dann werden die Leute, die im Park spazieren gehen wollen, vielleicht dennoch den Trampelpfad quer hinüber wählen, denn auf ihm läuft es sich leichter.



2.1 Spuren im frisch verschneiten Park.

Langfristig kann man also von oben keineswegs jede einzelne Spur verfolgen. Dennoch trägt jede einzelne ein kleines bisschen zu dem Muster im Schnee bei. Dieses Muster, das langfristig entsteht und sogar eine gewisse Tendenz hat, auch dann bestehen zu bleiben, wenn nichts mehr geschieht oder wenn die Ursachen, die früher zu ihm beigetragen haben, nicht mehr vorliegen, ist alles andere als zufällig. Es bildet vielmehr *die Statistik* der Benutzung des Parks ab! Die entstandenen Wege zeigen, was die Leute im Park umtreibt, sie „stimmen mit den Füßen ab“, wie man heute gerne sagt, ob ihnen das Eis schmeckt oder die Souvenirs gefallen. Die Breite der Wege sagt etwas über deren Variabilität und damit der diesen Wegen zugrunde liegenden Motive der einzelnen Parkbenutzer aus. Schmale Wege zeigen an, dass nicht jeder genau das Gleiche tut und denkt, breite Trampelpfade hingegen machen deutlich, dass es zu diesem Weg kaum eine Alternative gibt. Man könnte auch sagen, dass hinter den Spuren die Regeln der Benutzung des Parks stecken. Jeder Einzelne macht es zwar etwas anders,

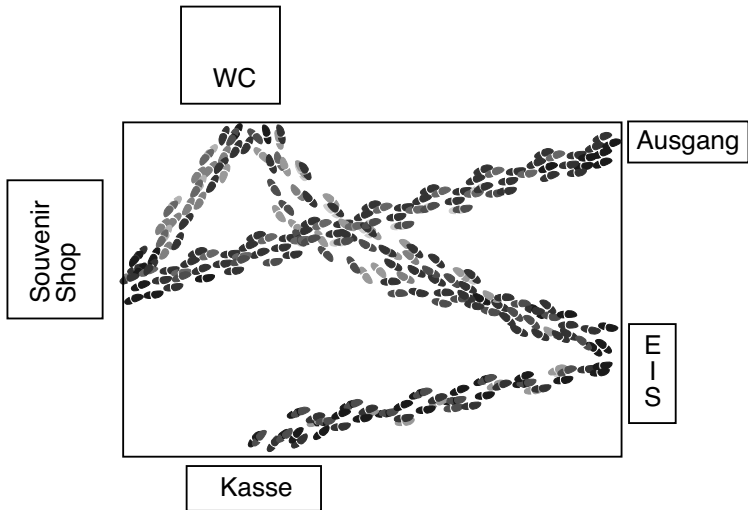


2.2 Mehr Spuren im frisch verschneiten Park.

macht hier einen Schlenker und schlägt dort einen Haken. Das ist jedoch unbedeutend für die Struktur der Benutzung des Parks, die man von oben so klar erkennen kann (Abb. 2.3).

Spuren im Gehirn

Spuren gibt es nicht nur im Park, sondern auch im Gehirn! Nicht umsonst spricht man von Gedächtnisspuren, und diese entstehen letztlich auf die gleiche Weise wie die Spuren im frisch verschneiten Park, nämlich durch den Gebrauch, d.h. durch die Benutzung von Verbindungen zwischen Nervenzellen. Jeder einzelne Gebrauch, d.h. jede einzelne Erfahrung, schlägt sich nur ganz geringfügig nieder, aber nach vielen Erfahrungen verbleiben deren Statistik und damit die Regeln, die hinter den einzelnen Erfahrungen steckten, in Form fester Spuren im Gehirn.



2.3 Langfristig zeigen die Spuren im Park die Statistik seines Gebrauchs an, d.h. die hinter den einzelnen Episoden (Begehungen) stehenden Regeln der Benutzung.

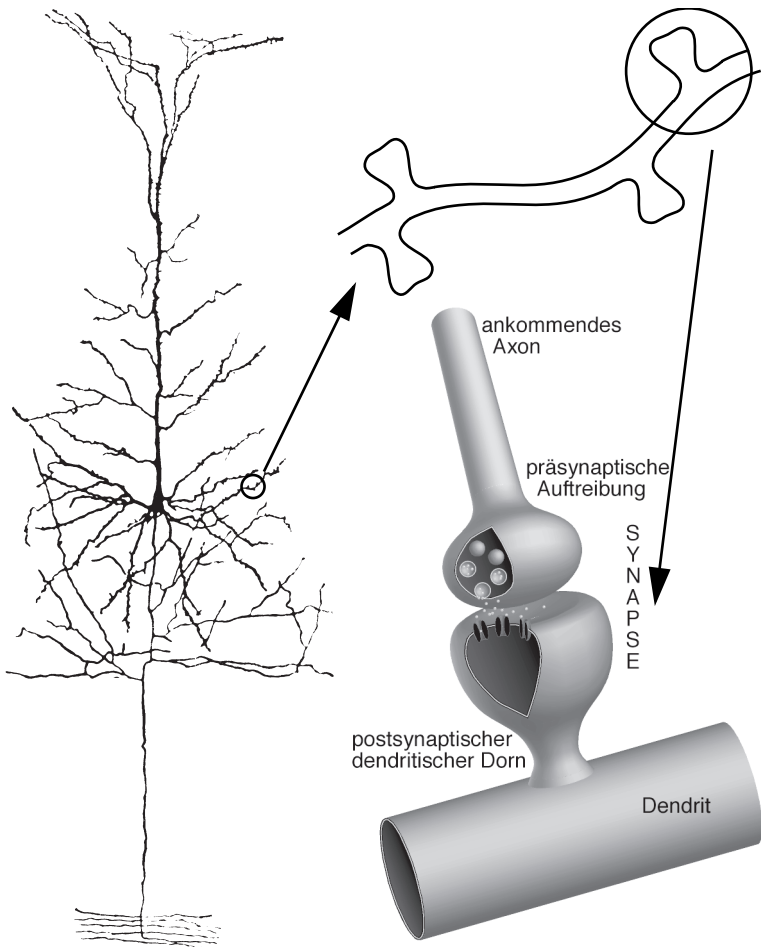
Warum gibt es diese Spuren im Gehirn? – Sie haben dort, wie auch im Schnee, eine ganz bestimmte Funktion: Sie erleichtern den Durchgang, von Leuten einerseits und von Information andererseits (vgl. hierzu auch das folgende Kapitel). Wenn es bereits Spuren gibt, muss sich nicht jeder selbst seinen Weg durch den Schnee bahnen. Und wenn es schon Spuren im Gehirn gibt, dann kann neu eingehende Information leichter verarbeitet werden. Das wiederum hat Vorteile: Kommt der Säbelzahn tiger von links, dann ist es sehr ungünstig, wenn wir ihn erst dann erkennen, wenn er groß und breit vor uns steht. Wer ihn hingegen schon früh hinter dem Gebüsch, anhand ganz weniger optischer Eindrücke, aber aufgrund von ganz viel gespeichertem Wissen über seine Umwelt (einschließlich der Tiger) entdeckt, hat bessere Chancen!

Noch einmal: Mit jeder Erfahrung, jedem Wahrnehmungs-, Denk- und Gefühlsakt gehen flüchtige, wenige Millisekunden dauernde Aktivierungsmuster im Gehirn einher. Die Verarbeitung dieser einzelnen Aktivierungsmuster (der einzelnen Erfahrungen) verändert das Gehirn, nicht viel, aber ein ganz kleines Stück. Was von den unzähligen einzelnen Erfahrungen (Musterverarbeitungsprozessen) bleibt, ist daher nicht deren Einzigartigkeit, sondern das, was sie mit anderen Erfahrungen gemeinsam haben, das, was hinter den einzelnen Erfahrungen an Gemeinsamkeit steckt. Mein Lieblingsbeispiel hier sind Tomaten (vgl. Spitzer 2002, S. 75f), von denen Ihnen wahrscheinlich schon jede Menge begegnet sind. Dennoch können Sie sich nicht an jede einzelne erinnern, und das ist auch gut so, denn Sie hätten ja sonst den Kopf voller Tomaten! Nicht die Einzelheiten sind wichtig, sondern die *allgemeine* Tomate, die in Ihrem Gehirn aus den vielen Erfahrungen mit einzelnen Tomaten entstanden ist.

Synapsen und ihre Stärken

Nervenzellen stehen miteinander durch lange Kabel, die Nervenfasern, auch *Axone* genannt, in Verbindung. Die Fasern enden jeweils an anderen Nervenzellen, wo sie nicht wie die Kabel in einem Stromnetz fest angelötet sind, sondern in kleinen Verdickungen, den so genannten *synaptischen Endknöpfchen*, enden. Diese wiederum haben engen Kontakt zu der Oberfläche der nächsten Zelle, entweder direkt an dieser Zelle oder irgendwo an deren verzweigten Fortsätzen, den *Dendriten*. An diesen Dendriten wiederum gibt es kleine Auftreibungen, *dendritische Dornen* genannt, an denen die Auftreibung der endenden Nervenfasern andockt. Das ganze Arrangement aus ankommender Faser mit Auftreibung, Zwischenraum und nachfolgendem dendritischen Dorn nennt man eine *Synapse* (Abb. 2.4).

Synapsen stellen Verbindungen zwischen Neuronen her. Diese Verbindungen sind nicht fest, sondern ändern sich durch den Gebrauch der Synapsen: Wenn zwei miteinander verbundene Neuronen zur gleichen Zeit aktiv sind, nimmt die Verbindungsstärke der Synapse



2.4 Typisches Neuron der Gehirnrinde (links; aus Ramón y Cajal 1888, S. 389) mit herausvergrößertem Teilstück des Dendritenbaums (rechts oben; schematisch); nicht zu sehen sind hier die an den dendritischen Dornen eingehenden Fasern anderer Neuronen. Rechts unten ist eine Synapse mit eingehendem (präsynaptischem) Axon, synaptischem Spalt und (postsynaptischem) dendritischem Dorn an einem kleinen Stückchen eines Dendriten schematisch dargestellt (nach Spitzer 2000). In der präsynaptischen Auftreibung sind Bläschen mit Neurotransmitter zu sehen, der bei Erregung in den synaptischen Spalt ausgeschüttet wird und postsynaptisch Rezeptoren aktiviert.

zwischen ihnen zu. Diese Fähigkeit des Nervensystems zur permanenten Anpassung seiner Verbindungen an ihren Gebrauch nennt man *Neuroplastizität*. Bereits 1949 sprach der Kanadier Donald Hebb von der Verstärkung synaptischer Verbindungen zwischen gleichzeitig aktivierten Neuronen. Im Jahr 1973 wurde schließlich die *Langzeitpotenzierung* (LTP) als Mechanismus synaptischer Plastizität erstmals nachgewiesen. Mittlerweile sind die hierbei beteiligten Prozesse sehr genau untersucht, denn sie sind letztlich die Grundlage für jede Form von Lernen und Gedächtnis. Später fand man zudem, dass auch das Gegenteil der Fall sein kann: Synapsen zwischen Neuronen, die aktivitätsmäßig nichts miteinander zu tun haben, werden schwächer.

Noch einmal: In Abhängigkeit von der Erfahrung des Organismus kommt es an den Synapsen seiner Nervenzellen sowohl zu einer Verstärkung als auch zu einer Abschwächung der Verbindungen. Diese Veränderungen geschehen bei jeder einzelnen Erfahrung, sind jedoch jeweils ganz klein. Viele einzelne Erlebnisse jedoch, die in die gleiche Richtung gehen, werden dafür sorgen, dass bestimmte Synapsen (nämlich diejenigen, über die Aktivität bei den Erlebnissen läuft) stärker werden. Damit wandelt sich das Nervensystem durch die Verarbeitung der flüchtigen Ereignisse langsam um. Viele ähnliche Aktivierungsmuster von einer Dauer im Millisekundenbereich führen zur Entstehung von zeitlich überdauernden, festen Mustern von Synapsenstärken an den beteiligten Neuronen. Hierbei ändert sich nicht nur die Biochemie der Synapsen, sondern auch deren Struktur. So kann beispielsweise ein zweiter dendritischer Dorn wachsen, wodurch sich die synaptische Kontaktfläche vergrößert (Abb. 2.5). Möglicherweise entscheidet die Größe dendritischer Dornen auch über ihre Plastizität: Kasai und Mitarbeiter (2003) postulieren, dass große dendritische Dornen stabiler seien als kleine, womit sie eher für das Langzeitgedächtnis und die kleinen eher für das rasche Lernen zuständig seien. Dies entspräche einer Unterscheidung dendritischer Dornen in solche mit Schreibschutz („write-protected“) und solche ohne („write enabled“; vgl. Kasai et al. 2003, S. 363).



2.5 Veränderung der Struktur einer Synapse aufgrund von Lernvorgängen (gezeichnet nach elektronenmikroskopischen Aufnahmen aus Toni et al. 1999; vgl. auch Engert & Bonhoeffer 1999). Wenn zwei miteinander synaptisch verbundene Neuronen zur gleichen Zeit aktiv sind, nimmt die Verbindung zwischen ihnen zu. Dies geschieht zunächst durch biochemische und danach auch durch strukturelle Veränderungen. Wie hier rechts zu sehen, ist ein zweiter dendritischer Dorn gewachsen und vergrößert die Kontaktfläche der Synapse. Dadurch kann das gleiche Aktionspotential rechts einen größeren Effekt am postsynaptischen Dendriten haben als links, wo die Kontaktfläche deutlich kleiner ist.

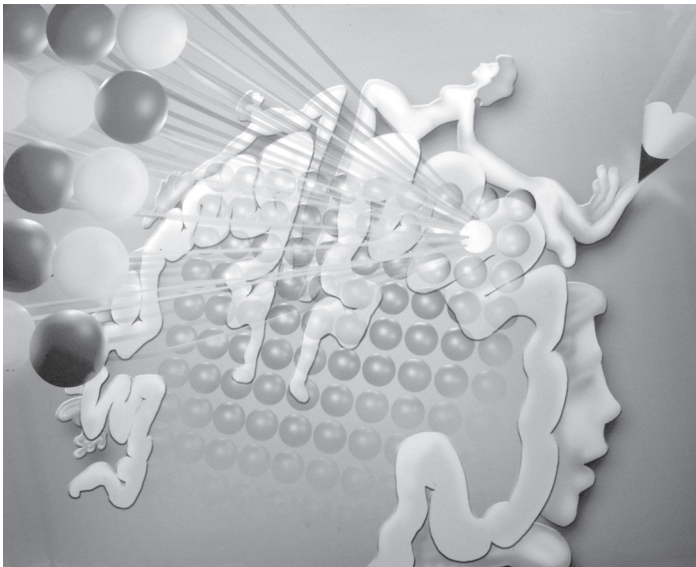
Repräsentationen

In veränderten Synapsenstärken steckt unser gesamtes Können und Wissen (hierüber mehr im nächsten Kapitel). Um dies zu verstehen, stellen Sie sich doch einmal vor, dass Sie mit Ihrem linken Zeigefinger die Spitze eines Bleistifts berühren. Dann werden elektrische Impulse im Finger produziert und über Nervenfasern bis zur Gehirnrinde der anderen Körperseite, in diesem Falle also rechts, geleitet. Dort verzweigt sich die Nervenfaser, und die Impulse erreichen mehrere tausend Nervenzellen in der Gehirnrinde.

Ein Wort zu diesen Impulsen, *Aktionspotentiale* genannt. Sie sind alle gleich, riechen nicht, schmecken nicht, haben keine Farbe, und es gibt sie nicht einmal in verschiedenen Größen. Die einzige Eigenschaft, die ein Aktionspotential hat, ist die, da zu sein oder nicht (und in manchen Fällen ist auch noch wichtig, wann genau es da ist).

Wenn nun diese Aktionspotentiale vom linken Zeigefinger in der Gehirnrinde an vielen Neuronen eingehen, haben sie dennoch nicht überall den gleichen Effekt. Dies liegt an den unterschiedlich starken

Synapsen. An manchem Neuron geschieht beim Eintreffen des Aktionspotentials an der Synapse nur wenig, und der Effekt des Aktionspotentials bleibt gering, an einem anderen Neuron hingegen geschieht viel, weil hier starke Synapsen liegen. Dies wiederum mag an genau diesem Neuron dazu führen, dass es erregt wird und selbst einen Impuls aussendet. In diesem Fall sprechen wir davon, dass dieses Neuron die Stelle des linken Zeigefingers, an welcher der Bleistift piekt, repräsentiert (vgl. Abb. 2.6).



2.6 Schematische Darstellung des Sachverhalts, dass Neuronen in der Gehirnrinde bestimmte Stellen der Körperoberfläche repräsentieren. Die Bleistiftspitze berührt meinen Finger und löst dort Impulse aus, die in das Gehirn weitergeleitet werden. Dort führen diese Impulse zur Aktivierung ganz bestimmter Neuronen, von denen man sagt, dass sie die Stelle der Berührung repräsentieren (die Abbildung wurde für das Video *Vom Neuron zur geistigen Landkarte* produziert; für ihre Überlassung danke ich Herrn Robert Knickenberg von der Firma 2KAV, Frankfurt).

Ein anderes Neuron in der näheren Umgebung dieses Neurons wird vielleicht ein Stückchen Haut des Mittelfingers repräsentieren, und wieder einige Millimeter entfernt gibt es ein Neuron, das für eine Stelle am Ringfinger zuständig ist. Die Neuronen dazwischen sind entsprechend für dazwischenliegende Stellen an der Körperoberfläche, also zwischen Zeigefinger und Ringfinger, zuständig und repräsentieren diese.

Auch beispielsweise mein Wortschatz in der Muttersprache ist von Neuronen in ganz ähnlicher Weise gespeichert. Wenn ich ein bestimmtes Wort höre, denke oder sage, dann wird das entsprechende Neuron aktiviert, und aus der gleichsam „schlafenden Repräsentation“ ist eine aktive geworden. Aktive, „feuernde“ Neuronen repräsentieren damit diejenigen Inhalte, die gerade aktuell sind und be- oder verarbeitet werden. An solchen Repräsentationen ist allerdings nicht nur ein Neuron beteiligt. Zu groß wäre das Risiko, dass gerade dieses Neuron aus irgendeinem Grunde einmal Schaden nimmt oder ganz abstirbt. Bestünden innere Repräsentationen aus einzelnen Neuronen, dann wären sie also nur wenig robust. Wir wissen jedoch, dass Repräsentationen – dem Himmel sei Dank! – sehr robust sind. Daraus folgt im Grunde schon, dass es mehrere Neuronen sein müssen, die irgendwie zu einer Repräsentation beitragen. Dies ist auch der Fall; wie wir sehen werden, auf ganz demokratische Weise (vgl. Kap. 10).

Karten im Kopf

Die räumlich klar auszumachende Zuordnung von bestimmten Regionen der Körperoberfläche zu Kortextbereichen beim Menschen wurde erstmalig von Penfield und Boldrey (1937) veröffentlicht. Weiterhin zeigte sich, dass die Körperoberfläche nicht in Relation zu ihrer Größe, sondern in Abhängigkeit von ihrer Wichtigkeit und ihrem Gebrauch repräsentiert wird. So haben z.B. die Berührungsempfindungen der Hände oder der Lippen eine weitaus größere Häufigkeit und Bedeutung als Berührungsempfindungen des Rückens. Demzufolge sind die Areale, die die Lippen und die Hände repräsentieren, weitaus größer als

diejenigen für den Rücken. Aufgrund der Tatsache, dass die Hände und Lippen prozentual mehr Oberfläche einnehmen, können Signale aus diesen Körperregionen wesentlich präziser verarbeitet werden als Signale, die vom Rücken kommen. Im Hinblick auf das Überleben des Organismus ist hierdurch eine hohe Anpassungsfähigkeit gewährleistet.

Die Entdeckung der Landkarten der Körperoberfläche im Gehirn wurde weltweit bekannt, nicht zuletzt durch die didaktisch geschickte Darstellung der unproportionierten Abbildung von Bereichen der Körperoberfläche auf die entsprechenden kortikalen Areale (Penfield & Rasmussen 1950). Penfields Zeichnungen von „Menschlein“ (Homunculi) werden in jedem neurologischen und neurowissenschaftlichen Buch abgebildet und sind weltweit derart bekannt, dass die Hauptaussage häufig übersehen wird: Es gibt kortikale Areale, auf denen Input-Signale (im vorliegenden Fall die Berührungsempfindung) in Abhängigkeit der Grundprinzipien Ähnlichkeit, Häufigkeit und Wichtigkeit repräsentiert werden.

Nicht nur der Tastsinn wird kortikal repräsentiert. Das visuelle System des Menschen besteht aus mehr als einem Dutzend von Karten der Netzhaut (man spricht von retinotopen Arealen), d.h. räumlich geordneter Bereiche der Gehirnrinde, auf denen Punkte mit Punkten auf der Netzhaut korrespondieren. Wie beim oben genannten Homunculus werden die Netzhautbilder auf die retinotopen Areale in der Weise verzerrt abgebildet, dass die Signale, die aus dem Bereich des schärfsten Sehens der Retina (der Fovea) kommen, den größten Teil der kortikalen Verarbeitungsfläche einnehmen. Ebenso gibt es im akustischen System tonotope Areale, in denen Neuronen einzelne Frequenzen repräsentieren, wobei aus der Lage eines Neurons auf die Höhe der Frequenz geschlossen werden kann (vgl. Abb. 2.7 rechts).

Man hat heute guten Grund zur Annahme, dass auch höherstufige kortikale Bereiche mit bislang nicht bekannten Repräsentationen in ähnlicher Weise strukturiert sind. Diese Hypothese stützt sich u.a. auf Modelle neuronaler Netzwerke, in denen wesentliche Merkmale der Funktion des Kortex implementiert sind (vgl. Spitzer 2000). Wie diese

Selbstbestimmen

Gehirnforschung und die Frage: Was sollen wir tun?

Spitzer, M.

2003, XII, 426 S., Softcover

ISBN: 978-3-8274-2081-7