

Hermann Haken
Maria Haken-Krell

Gehirn und Verhalten

Unser Kopf arbeitet anders,
als wir denken

Deutsche Verlags-Anstalt
Stuttgart

Einführung

Was macht die Biologie so faszinierend und schwierig zugleich?

Alle Organismen sind äußerst komplex. Die meisten von ihnen bestehen aus einer sehr großen Zahl von Zellen, die selbst wieder höchst kompliziert aufgebaut sind. Darüber hinaus zeigen viele Organismen, insbesondere Menschen und Tiere, komplexes Verhalten. Damit diese selbst einfache Bewegungen ausführen können, müssen deren Zellen in sinnvoller Weise zusammenwirken, was sich dann als Koordination der Muskeln äußert. So prägte der berühmte Physiologe Sherrington zu Beginn des 20. Jahrhunderts den Ausdruck *Synergie von Muskeln*. Derartig hohe Koordination liegt natürlich auch dem Atmen, dem Herzschlag und der Blutzirkulation zugrunde. Auf einer noch höheren Ebene kooperieren im menschlichen Gehirn viele Zellen in sinnvoller Weise, um Wahrnehmung, wie Sehen und Hören, Denken, Sprache, Schreiben und Lesen und andere Phänomene, einschließlich der Gefühle, hervorzubringen. In all diesen Fällen entstehen völlig neue Eigenschaften des Gesamtorganismus, die auf dem mikroskopischen Niveau der einzelnen Zellen überhaupt nicht vorhanden sind. Eine einzelne Nervenzelle riecht nicht, sieht nicht, fühlt nicht. Eines der größten Rätsel der Biologie ist sicherlich dieser hohe Grad von Integration, mit dem die mikroskopisch kleinen Zellen verknüpft sind, um die makroskopisch wahrnehmbaren Fähigkeiten von Mensch und Tier hervorzubringen. Wie stark diese integrative Macht unseres Gehirns ist, läßt sich am besten mit Abbildung 1.1 belegen, die ein Gemälde des mittelalterlichen Malers Giuseppe Arcimboldo zeigt. Auf den ersten Blick erkennen wir ein Gesicht, aber wenn wir näher hinschauen, erkennen wir nichts anderes als eine Ansammlung von Früchten und Gemüse. Wir

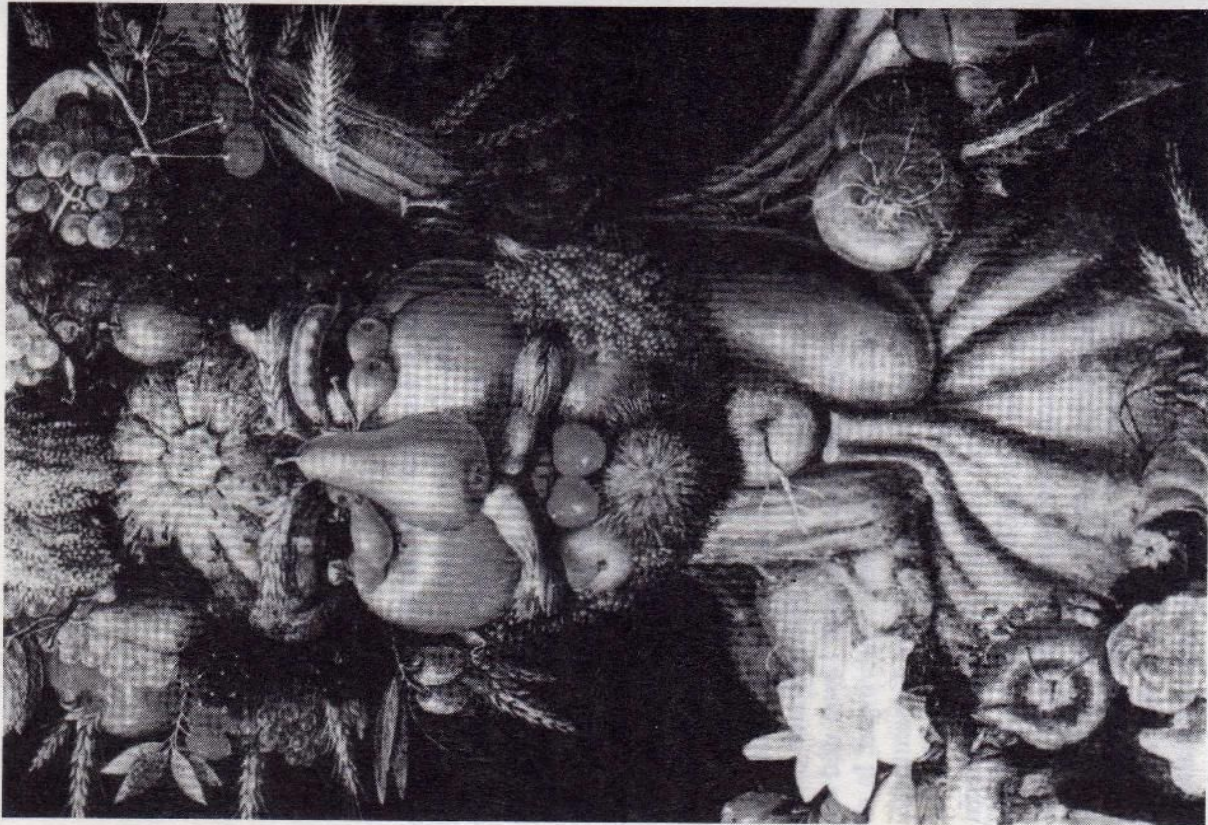


Abb. 1.1
Gemälde des Malers Giuseppe Arcimboldo (1527-1593). Ist es ein Gesicht
oder Obst und Gemüse?

erkennen dieses Gesicht nicht wegen, sondern trotz seiner einzelnen Teile. Dieses Beispiel können wir metaphorisch benutzen, wobei die einzelnen Teile im wesentlichen die Nervenzellen sind und nicht Gesamtheiten wie Früchte. Wie wird diese Integration hervorgebracht? In früheren Zeiten konnten wir Bilder sehen, bei denen im Gehirn eines Menschen wieder ein Mensch (Homunkulus) sitzt, der die Bewegungen steuert oder sieht. Natürlich muß dann in diesem Homunkulus wieder ein Homunkulus sitzen, der dieselben Tätigkeiten ausführt. So geht diese Art russischer Puppe unendlich oft weiter - offenbar ein unsinniger Denkansatz. Im 20. Jahrhundert schrieb der berühmte Neurophysiologe John Eccles gemeinsam mit dem Philosophen Karl Popper ein Buch mit dem Titel »Das Selbst und sein Gehirn« (The Self and its Brain), wo sie in gewisser Weise das Selbst oder Ich als einen Programmierer interpretierten und das Gehirn als einen Computer.

In unserem Buch werden wir eine ganz andere Auffassung vertreten. Wir werden nämlich nicht annehmen, daß die Integration der Gehirnzellen durch irgendwelche Organisationszentren, durch Programmierer oder durch eine Art von Computerprogrammen hervorgerufen wird. Wir werden vielmehr die Idee der sogenannten Selbstorganisation entwickeln, bei der die einzelnen Teile eines Systems, zum Beispiel eben die Nervenzellen des Gehirns, ihr Zusammenwirken ganz von sich aus bewerkstelligen. Hierzu werden wir das noch relativ junge Forschungsgebiet der Synergetik, auf deutsch »der Lehre vom Zusammenwirken«, heranziehen.

Die Synergetik kann als die am weitesten fortgeschrittene Theorie der Selbstorganisation betrachtet werden, und wir werden zeigen, wie diese Theorie bei einer Fülle von biologischen Phänomenen angewendet werden kann, insbesondere bei solchen, die mit Gehirnaktivitäten, wie Wahrnehmung und Verhalten, verknüpft sind. Wir werden biologische Systeme, einschließlich des menschlichen Gehirns, als gigantische Systeme betrachten, die den Gesetzen der Physik gehorchen. Dies ist natürlich Musik in den Ohren der materialistischen Schule der Philosophie. Wir werden aber auch sehen, daß die Gesetze in der Biologie nicht eindeutig von physikalischen Gesetzen hergeleitet werden können. Es gibt andere zusätzliche Gesetze, die mit dem Auftreten neuer Eigenschaften oder, gelehrter ausgedrückt,

die mit der Emergenz neuer Qualitäten verknüpft sind. In dieser Weise wird es sich zeigen, daß die Synergetik nicht in Konflikt mit der Physik ist, aber daß sie andererseits nicht mit irgendeinem Physikalismus identifiziert werden darf. Die letzten beiden Sätze hören die »Materialisten« nicht so gerne und haben schon Anlaß zur Kritik gegeben. Wie wir sehen, geraten wir so unversehens in philosophische Gefilde, und wir werden in unserem Buch noch darauf zurückkommen. Vielleicht zur Klärung der Begriffe noch eine kurze Bemerkung: Während Synergetik eine Disziplin ist, ist Selbstorganisation ein Phänomen.

Ziele der Synergetik

Komplexe Systeme - unser Gehirn ist hier nur ein Beispiel - bestehen aus vielen einzelnen Teilen, Elementen, oder Untersystemen, die sich oft gegenseitig in einer komplizierten Weise beeinflussen. Ein klassisches »Rezept«, um solche Systeme zu behandeln, geht auf den französischen Gelehrten René Descartes zurück. Gemäß ihm hat man ein komplexes System in immer elementarere Teile zu zerlegen, bis man auf einem Niveau ankommt, auf dem diese Teile verstanden werden können. Ganz offensichtlich folgt die Molekularbiologie dieser Linie. In ihr sucht man nach den Molekülen, die beim Stoffwechsel, bei der Vererbung und den anderen biologischen Vorgängen auftreten und eine Rolle spielen. Hierbei sieht man es oft als Erklärung eines biologischen Phänomens an, wenn das hieran beteiligte Molekül identifiziert wurde. Zweifellos hatte und hat die Molekularbiologie große Erfolge zu verzeichnen, und dies mag der Grund dafür sein, daß einer Reihe von Biologen der Blick auf ganz andere, aber mindestens ebenso wichtige Fragestellungen verstellt ist. Durch die wechselwirkenden Elemente eines Systems entstehen nämlich qualitativ neue Eigenschaften auf dem makroskopischen Niveau. So bleibt unzufolge eine enorme Lücke in unserem Verständnis der Beziehung zwischen der mikroskopischen und der makroskopischen Ebene. Es ist das Ziel der Synergetik, diese Lücke zu überbrücken. Gleichzeitig werden wir sehen, daß in den meisten Fällen die Strukturen nicht durch eine »organisierende Hand«, oder

wie Adam Smith es für die Wirtschaft ausdrückte, durch eine »unsichtbare Hand«, entstehen, sondern von den Systemen selbst geschaffen werden. Deshalb sprechen wir von Selbstorganisation.

Die Methode, die wir die Descartesche Methode nennen könnten, hat noch weitere Tücken. Um die einzelnen Teile, wie die riesige Zahl der Gehirnzellen, zu beschreiben, ist eine enorme Menge von Information nötig, mit der kein Mensch umgehen kann. Daher müssen wir adäquate Methoden entwickeln, um Information zu komprimieren. Ein Beispiel, wie dieses Ziel erreicht werden kann, liefert uns schon unser Temperatursinn. Wie wir wissen, besteht ein Gas, wie Luft, aus Myriaden einzelner Moleküle, aber wir nehmen ihre individuelle Bewegung nicht wahr. Statt dessen integriert unser Körper über ihre Bewegung und fühlt nur ihre mittlere Energie, oder das, was wir als Temperatur bezeichnen. Auch unsere Sprache verfährt in ähnlicher Weise. In den meisten Fällen stellen einzelne Worte ganze Klassen dar, oder Kategorien, oder Objekte, oder komplizierte Tätigkeiten. Zum Beispiel bezieht sich das Wort »Hund« auf die verschiedensten Rassen, Größen, Bewegungen usw.

Können wir eine allgemeine Theorie entwickeln, die es uns gestattet, Information ganz automatisch in angemessener Weise zu komprimieren? Wie wir sehen werden, geschieht oft eine solche Informationskompression in Situationen, wo ein System seinen makroskopischen Zustand qualitativ ändert. In der unbelebten Natur gibt es eine ganze Zahl solcher abrupten Übergänge, die Phasenübergänge genannt werden. Beispiele aus der Physik werden durch das Frrieren von Wasser zu Eis geliefert oder das Einsetzen von Magnetismus. Hierbei treten völlig neue physikalische Eigenschaften zutage, zum Beispiel mechanische. Auf Eis können wir gehen, auf Wasser nicht. Wie wir sehen werden, finden wir in der Biologie eine Fülle ähnlicher qualitativer Änderungen, die von einfachen Bewegungsänderungen bis hin zu komplizierten Wahrnehmungsänderungen reichen.

Das Gehirn als komplexes System

Untersuchen wir, aus welchen »Bausteinen« das Gehirn aufgebaut ist, so finden wir ein phantastisches Wunderwerk der Miniaturisierung. Mit einem Gewicht von etwa 1,5 Kilo enthält es die fast unvorstellbare Anzahl von rund 100 Milliarden Nervenzellen, Neuronen genannt. Dies entspricht der Anzahl der Sonnen in unserer Milchstraße.

Um die enorme Zahl der Neuronen zu illustrieren, betrachten wir ein Modell: Wir denken uns jedes von ihnen so stark aufgeblasen, daß hundert Neuronen in einen Fingerhut passen, sagen wir von einem Kubikzentimeter. Dann würden wir ein Haus von je 10 Meter Höhe, Tiefe und Breite benötigen, um all diese Fingerhüte unterzubringen. Um die Neuronen aber in dem ja viel kleineren Gehirn unterzubringen, müssen diese winzig klein sein. Die Durchmesser der Zellkörper betragen einige Tausendstel Millimeter, sind also kleiner als die Dicke eines Menschenhaares.

Faszinierend ist auch die komplexe Verschaltung der Nervenzellen. Zahlreiche Verbindungen, Telefondrähte ähnlich, laufen zwischen den Neuronen, um zwischen diesen Informationen auszutauschen. So kann ein Neuron mit bis zu zehntausend anderen verknüpft sein. Die genannten Zahlen lassen erahnen, welch komplexes Gebilde unser Gehirn ist, und wie schwierig es ist, dieses zu erforschen, geschweige denn eine Maschine mit auch nur annähernd seinen Fähigkeiten zu konstruieren. Denken wir nur daran, daß unser Gehirn in einem Bruchteil von Sekunden Informationen von der Außenwelt in lebendige Wahrnehmungen verwandelt, wie farbenfrohe Bilder, mitreißende Melodien, angenehme Düfte, um nur einige Beispiele zu nennen. Selbständig kann es Entscheidungen treffen, und es vermag im Gedächtnis eine Informationsmenge von etwa 10^{10} (eine Eins mit zehn Nullen!) Bits (Ja/Nein-Entscheidungen) zu speichern.

So hat denn auch die Forschung über das Gehirn und seine Funktionen viele Facetten und, um ehrlich zu sein, diese Facetten sind praktisch unerschöpflich. Daher müssen wir wohl fragen, welche Fragen vernünftig sind. Diese Fragen hängen umgekehrt von dem allgemeinen Stand der Wissenschaft ab, welcher selbst wieder auf

experimentellen Techniken und theoretischen Konzepten, wie auch mathematischen Verfahren und neuerdings auch Computermodellen, beruht. Auch der alte Traum der Menschen, Roboter mit menschenähnlichen Eigenschaften zu schaffen, hat nichts von seiner Attraktivität eingebüßt und dient in der neueren Forschung dazu, Einblicke in intelligentes Verhalten zu bekommen. Aber darüber hinaus hängen alle diese Fragen vom Geschmack oder unserer vorangegangenen Ausbildung, vielleicht sogar vom Zeitgeist ab. Im Hinblick auf die große Komplexität des Gehirns müssen wir nach Modellen, Paradigmen oder Metaphern Ausschau halten. Aber auf welchem Niveau und mit welcher genauen Bedeutung sollen wir diese Denkweisen verwenden? Wir werden uns diesen Fragen im folgenden zuwenden.

Traditionelle und synergetische Interpretation von Gehirnfunktionen

Um dem Leser ein Gefühl zu geben, wie unsere Auffassungen, die auf der Synergetik beruhen, sich von den traditionellen Ansichten unterscheiden, nehmen wir einige der grundlegenden Resultate dieses Buches vorweg. In der linken Spalte von Tabelle 1 haben wir die traditionellen Konzepte aufgelistet, während die entsprechenden Konzepte, die auf der Synergetik beruhen, in der rechten Spalte erscheinen.

Betrachten wir den Inhalt von Tabelle 1 im Detail, indem wir die linke und die rechte Seite Zeile für Zeile vergleichen. Das traditionelle experimentelle und theoretische Studium von Gehirnfunktionen beruht auf dem Konzept der *einzelnen* Zelle, während wir in der Synergetik unsere Aufmerksamkeit auf die Tätigkeit eines *Netzwerks* von Zellen richten. So betrachten wir statt des Individuellen das Ensemble. Dieser Unterschied zwischen den Gesichtspunkten läßt sich am besten erkennen, wenn wir die Frage der »Großmutterzelle« in der traditionellen Theorie diskutieren. Diese Bezeichnung ist natürlich spaßhaft gemeint, hat aber einen seriösen Hintergrund. Wenn wir nämlich unsere Großmutter erkennen, so soll dies durch eine

Traditionell	Synergetik
Zelle	Netzwerk von Zellen
individuell	Ensemble
Großmutterzelle	Gemeinschaft von Zellen
Steuerungszelle	Gemeinschaft von Zellen
lokalisiert	delokalisiert
Engramm	verteilte Information
programmierter Computer	selbstorganisiert
algorithmisch	selbstorganisiert
sequentiell	parallel und sequentiell
deterministisch	deterministisch und Zufallsereignisse
stabil	nahe an Instabilitätspunkten

Tabelle 1

Vergleich zwischen traditionellen und synergetischen Auslegungen von Gehirnfunktionen

einzige Zelle, eben die Großmutterzelle, erfolgen. In der synergetischen Auffassung wird die Erkennung von Mustern - das Gesicht der Großmutter - durch die Tätigkeit eines ganzen Verbandes von Zellen erreicht.

Früher wurde die Steuerung von Bewegungen auf eine Steuerzelle zurückgeführt, während sie in der Synergetik das Resultat der Tätigkeit eines Ensembles von Zellen ist. Während nach der traditionellen Auffassung Gehirntätigkeiten streng lokalisiert sind, werden sie jetzt als delokalisiert angesehen und können sich über ausgedehnte Gebiete des Gehirns erstrecken. Gemäß dieser Vorstellung müssen wir nun nicht mehr die sogenannten Engramme, also lokalisierte Gedächtnisspuren, sondern verteilte Informationen suchen. Diese Gesichtspunkte werden auch vom Konnektivismus geteilt, bei dem bestimmte Computer-Netze als Modell für psychische Vorgänge dienen, worauf wir später noch zurückkommen werden. Ein grundsätzlicher Unterschied zwischen unserem Standpunkt und dem anderer Denkschulen wird sichtbar, wenn wir die weithin vertretene Ansicht betrachten, daß das Gehirn wie ein programmierter Computer arbeitet, der auf Algorithmen, das heißt bestimmten Rechenvorschriften, beruht. Aber wer oder was wirkt hier als Programmierer?

Unserer Ansicht nach arbeitet das Gehirn nach dem Prinzip der Selbstorganisation. In der herkömmlichen Auffassung wird die herinkommende Information sequentiell, also Schritt für Schritt nacheinander, verarbeitet. In der neuen Auffassung wird Information hauptsächlich parallel, das heißt gleichzeitig von vielen einzelnen Nervenzellen, verarbeitet. Das Konzept eines programmierten Computers beinhaltet, daß das ganze System streng deterministisch arbeitet. Wie wir in unserem Buch nachweisen werden, bestimmen sowohl deterministische als auch Zufallsereignisse das biologische Geschehen. Ein weiterer grundlegender Unterschied zeigt sich im Hinblick auf Stabilität. In der herkömmlichen Auffassung wird angenommen, daß das Gehirn stets in einem stabilen Zustand ist. Dies ist die Basis für viele Experimente und auch Theorien über Gehirnfunktionen. Wir werden zeigen, daß das Gehirn nahe an Instabilitätspunkten arbeitet, wobei wir auf diese Begriffe noch näher eingehen werden.

Wir hoffen, daß die Tabelle 1 die Neugier der Leserin oder des Lesers geweckt hat, um diese neuen Gedankengänge zu verfolgen und speziell zu sehen, welchen experimentellen Nachweis wir anbieten können, der derartige grundlegende Änderungen im theoretischen Verständnis der Gehirnfunktionen nahelegt.

Wir erkunden unser Gehirn

Das Gehirn als Schwarzer Kasten

Die Methode des sogenannten *Schwarzen Kastens* (englisch *black box*) ist Ingenieuren der Nachrichtentechnik wohlbekannt. Wenn diese einen neuen Fernseher oder eine Telefonvermittlung konstruieren sollen, indem sie einzelne Bauteile zusammenfügen, so kümmert es die Ingenieure wenig, was im einzelnen in den verschiedenen Bauteilen vor sich geht. Es genügt ihnen zu wissen, wie der Zusammenhang zwischen den Signalen aussieht, die in ein Bauteil hineingeschickt werden und denen, die herauskommen, zum Beispiel wie stark die hereinkommenden Signale verstärkt oder in welcher Weise sie verändert werden. Ganz ähnlich sind Wissenschaftler bei der Erforschung des Verhaltens von Menschen oder Tieren vorgegangen, indem sie insbesondere deren Gehirn als eine *black box* ansehen, das in spezifischer Weise auf spezielle Reize von außen reagiert. Diese Methodologie, die mit dem englischen Namen *behaviorism* (oder auf deutsch: Behaviorismus) belegt wurde, geht insbesondere auf den amerikanischen Verhaltensforscher Burrhus F. Skinner zurück. Dieser konstruierte besondere Käfige, um die Reaktionen von Tieren, zum Beispiel Ratten, auf spezielle Reize, wie etwa Nahrung oder Bestrafung, zu studieren und auch, wie und was diese lernen. Diese Methode wurde in einem Cartoon karikiert, auf dem eine Ratte zu einer anderen sagt: »Haben wir den Professor nicht gut dressiert! Jedesmal, wenn wir diesen Hebel bewegen, bekommen wir Futter.«

Bei diesem Verfahren werden die inneren Zustände des Gehirns des Tieres völlig ignoriert, ja, es galt sogar als unwissenschaftlich, hierüber überhaupt Fragen zu stellen. Dies mag noch bei Tieren als plausibel erscheinen, da diese ja nicht sprechen können, aber bei

Menschen, die sich mitteilen können, ließ man einen ganz wichtigen Aspekt außer acht, nämlich die sogenannte Introspektion, das heißt unsere eigenen inneren Erfahrungen. Heutzutage scheinen sich diese Dinge sehr zu ändern, und es gibt eine ganze Reihe von Studien, die um Einblick in die geistigen Zustände von Tieren bemüht sind.

Auf jeden Fall ist der *Behaviorismus* nicht mehr im Zentrum der modernen Forschung, obgleich die Untersuchung verschiedener Arten von Verhalten noch ein wichtiges Werkzeug zur Erforschung des Gehirns ist, wie wir später sehen werden. Auf einige dieser Forschungen wollen wir schon jetzt kurz hinweisen. Die Bewegungen, wie etwa Gehen, Schwimmen von Menschen und Tieren, aber auch andere Körperbewegungen, werden in den sogenannten Bewegungs-wissenschaften, wie sie vor allen Dingen etwa in Deutschland, Holland und den USA etabliert sind, intensiv studiert. Derartige Untersuchungen sind von Interesse für die Sportwissenschaft, aber auch für die Medizin, wo es um die Rehabilitation von verletzten Menschen geht, aber auch solchen, die etwa an der Parkinsonschen Krankheit leiden.

Menschliches Verhalten im geistigen Bereich wird von der Psychologie und bei krankhaften Fällen von der Psychiatrie studiert. Wie wir noch sehen werden, sind hier gerade abrupte Wechsel von einem Verhalten zu einem anderen, wie sie zum Beispiel bei schizophrenen Schüben oder beim Umschlag von einer manischen in eine depressive Phase auftreten, von besonderem Interesse. In gewisser Weise können wir auch das Studium der Sprache durch Sprachforscher als die Methode der *black box* ansehen, denn hier ist man nicht daran interessiert was im Gehirn vorgeht, wenn Sprache produziert wird, sondern nur an der abstrakten Struktur dieses geistigen Produkts.

Aber auch ein neuer Zweig der Forschung tritt immer mehr in den Vordergrund, wo versucht wird, die Struktur der Sprache auf die Struktur des Gehirns zurückzuführen. Die psychologischen Studien der Wahrnehmung beim Hören und Sehen kann man als eine gewisse Brücke zwischen der äußeren und der inneren Welt auffassen, je nachdem wie man die entsprechenden Experimente interpretiert, bis zu welchem Grad man die Introspektion hier mit einbezieht. Wir werden in diesem Buch erkennen, daß das Studium all der hier ge-

nannten Vorgänge schon weit mehr Einblick in das Funktionieren unseres Gehirns gibt als wir vielleicht ahnen, und daß wir hier auch manche Überraschungen erleben können.

Wir öffnen den Schwarzen Kasten

Wenn wir wie ein Chirurg bei einer Gehirnoperation die Schädeldecke öffnen, so sehen wir eine weißgraue Masse, deren Form sehr stark an eine Walnuß erinnert (Abb. 2.1, 2.2). Sie hat ähnliche Furchen wie diese, eine ähnliche äußere Form und besteht sogar auch aus zwei Hälften, die durch ein Verbindungsstück, den sogenannten Balken, miteinander verbunden sind. Sieht man sich diese ziemlich einheitliche Masse unter dem Mikroskop an, so werden nicht viele Details sichtbar. Das Ganze ändert sich aber schlagartig, wenn diese Masse eingefärbt wird, was zuerst von dem Gehirnforscher Camillo Golgi getan wurde. Dann wird unter dem Mikroskop plötzlich ein ganzes Netzwerk, das viele Knoten enthält, sichtbar. Diese Knoten sind nichts anderes als die Nervenzellen oder Neuronen. Diese Nervenzellen können ganz verschiedene Formen haben, und man unterscheidet etwa zwanzig Sorten derartiger Zellen. Zum Beispiel hat das Neuron der Abbildung 2.3a die Form einer Pyramide und wird daher pyramidale Zelle genannt. Manche Gehirnregionen enthalten fast lauter solche Zellen. Andere Zellen (Abb. 2.3b) werden Purkinje-Zellen nach ihrem Entdecker Johannes Purkinje genannt. Neuronen haben viele Verzweigungen, und wir müssen später natürlich der Frage nachgehen, was die Neuronen mit der Funktion des Gehirns zu tun haben. Bleiben wir aber noch ein wenig bei der Struktur und Funktion des Gehirns auf dem makroskopischen Niveau.

Struktur und Funktion auf dem makroskopischen Niveau

Wie sich im Laufe der Forschungen, oft aber auch durch Zufallsentdeckungen, ergeben hat, führt das Gehirn spezielle Tätigkeiten in seinen verschiedenen Regionen oder, wie man auch sagt, Arealen,

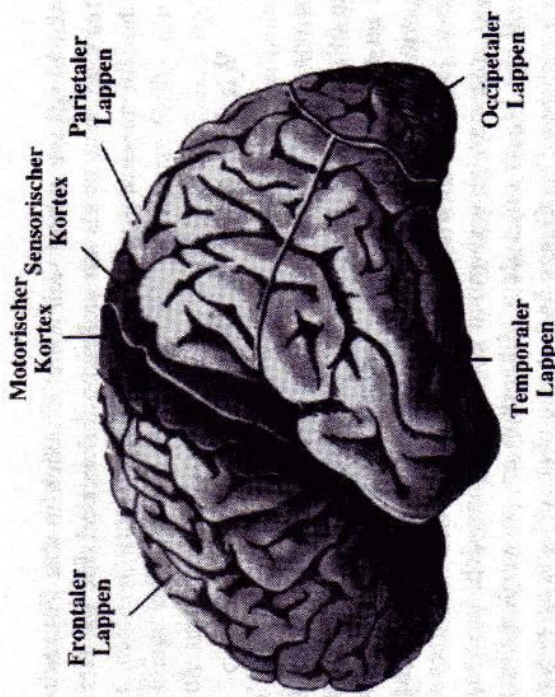


Abb. 2.1
Seitenansicht des Gehirns. Das Gesicht wäre links.

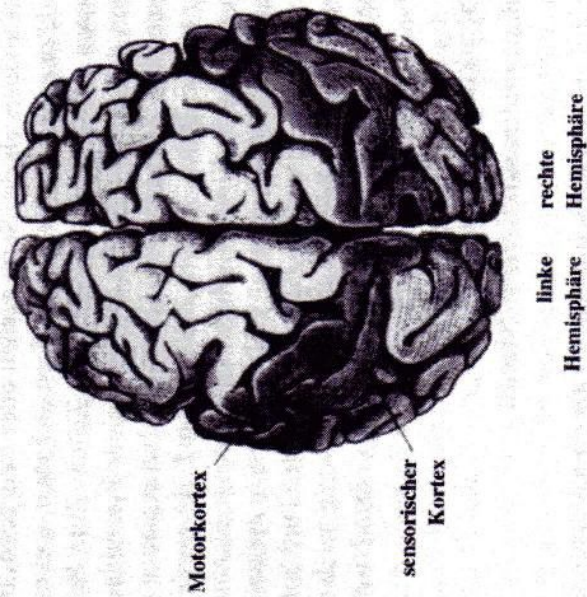


Abb. 2.2
Ansicht des Gehirns von oben.

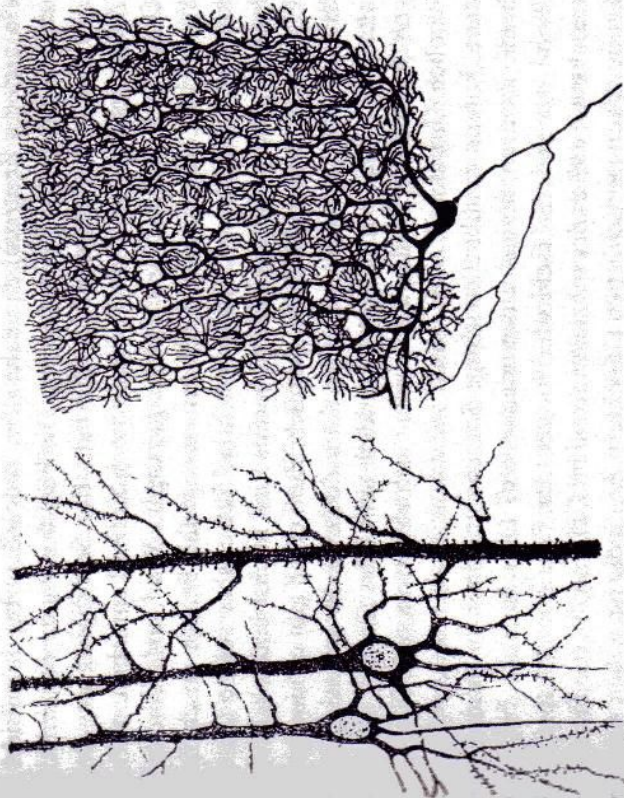


Abb. 2.3
a. Pyramidal-Zelle;
b. Purkinje-Zelle.

aus. Allerdings sollten wir gleich bemerken, daß es Verschiebungen von Funktionen zwischen verschiedenen Arealen geben kann, so daß die funktionale Landkarte des Gehirns Änderungen erleidet. Insbesondere wenn das Gehirn beschädigt worden ist, kann unter Umständen ein anderes Areal die vorher gestörte Funktion mit übernehmen. Verletzungen des Gehirns oder Schlaganfälle waren die ersten Hinweise, wo solche funktionalen Areale lokalisiert sind. Zum Beispiel kann ein Schlaganfall auf der linken Seite des Gehirns zur Lähmung der rechten Körperseite führen, zum Beispiel von einem Arm, einem Bein oder einer Hand. Entsprechend kann ein Schlaganfall in der rechten Hemisphäre eine Lähmung in Teilen der linken Körperseite hervorrufen. Gehirn und Körper sind also, wenn man so will, kreuzweise verschaltet. 1861 fand der französische Arzt Paul Broca, daß ein Schlaganfall im linken Teil des Gehirns in einem ziemlich lokalisierten Areal die Sprache beeinträchtigen kann. Einige Jahre später (1874) entdeckte der deutsche Arzt Carl Wernicke

ein anderes Zentrum, das nahe dem Broca-Zentrum lokalisiert ist, und auch mit Sprache zu tun hat. Die Funktionsweise dieser beiden Zentren ist aber verschieden. Im Falle der Schädigung des Broca-Zentrums kann die Person immer noch sinnvoll sprechen, aber die Grammatik ist praktisch verlorengegangen. Wird andererseits das Wernicke-Zentrum geschädigt, so erzeugt die Person anscheinend korrekte, also grammatikalisch richtige Sätze, aber solche die sinnlos sind. Dieses Beispiel macht bereits eine höchst bemerkenswerte Eigenschaft unseres Gehirns deutlich. Zum einen gibt es hier spezialisierte lokale Bereiche, die aber dann doch wieder intensiv zusammenwirken müssen, um etwas wirklich sinnvolles Ganzes zu erzeugen. Jedes dieser beiden Zentren hat sich auf etwas ganz Spezielles, nämlich Grammatik bzw. Inhalt spezialisiert, aber wenn wir sprechen, kommt die übliche richtige Sprache nur dann zustande, wenn beide Zentren innigst zusammenwirken. Dies ist auch bei einer Reihe von anderen Gehirnfunktionen der Fall. Zum Beispiel weiß man heute, daß es ein spezielles Areal im Gehirn gibt, das für die Erkennung von menschlichen Gesichtern zuständig ist, neben Arealen, die die übliche Umgebung um uns erkennen. Trotzdem erscheinen natürlich die Gesichter als Teil der ganzen von uns wahrgenommenen Umgebung. Auch Farben und Formen werden in verschiedenen Teilen des Gehirns wahrgenommen, trotzdem erscheinen uns diese als ein einheitliches Ganzes.

Gehen wir aber in der Entdeckungsgeschichte von Gehirnfunktionen weiter. Eine weitere wichtige Entdeckung wurde im Russisch-japanischen Krieg von 1904/05 von dem japanischen Mediziner Inoue gemacht. Die Russen hatten ein neues Gewehr entwickelt, das die Kugeln eine größere Durchschlagskraft verlieh. Solche Kugeln trafen japanische Soldaten und durchdrangen deren Köpfe. Aber obwohl in einer Reihe von Fällen die Augen dieser Soldaten nicht getroffen worden waren, wurden sie trotzdem blind. Dies führte Inoue zu dem Schluß, daß der hintere Teil des Gehirns für die Schwärzung verantwortlich ist.

Betrachten wir auch noch kurz die Rolle der beiden Hälften des Gehirns, deren Funktionsweisen erstaunlich verschieden sind. Wie fand man dieses heraus? Die beiden Hälften des Gehirns sind durch ein Bündel von Nervensträngen, dem Balken, verbunden. Nun hat-

ten Mediziner gefunden, daß epileptische Anfälle positiv beeinflusst werden können, wenn der Balken teilweise oder ganz durchgeschnitten wurde. Leider hatten aber solche Operationen auch beträchtliche Nebenwirkungen. Der amerikanische Forscher R. W. Sperry studierte das Verhalten von derartigen Patienten mit einem zertrennten Gehirn und machte dabei sensationelle Entdeckungen. Um sie zu verstehen, müssen wir den Leser daran erinnern, daß das, was der Mensch auf der rechten Seite seines Gesichtsfeldes sieht, durch Nervenbahnen in die linke Gehirnhälfte geleitet wird und umgekehrt, daß das, was er in dem linken Gesichtsfeld sieht, in die rechte Gehirnhälfte geleitet wird. Durch eine entsprechende Lage verschiedener Objekte kann man also so die linke oder die rechte Gehirnhälfte aktivieren. Wenn nun Objekte im linken Gesichtsfeld gelagert wurden, konnte der Patient sie nicht bewußt wahrnehmen und sie auch nicht benennen, aber der Patient konnte durchaus die verschiedenen Objekte manipulieren, zum Beispiel Besteck auf einen Teller legen. Wenn umgekehrt die Objekte im rechten Gesichtsfeld zu erkennen waren, so konnten sie vom Patienten korrekt benannt werden. Grob gesprochen kann man sagen, daß die linke Seite des Gehirns für Sprache verantwortlich ist, wie auch für Vorgänge, die der Reihe nach erfolgen, wohingegen die rechte Gehirnhälfte sich mit komplexen Szenen, mit Musik, mit der inneren Vorstellung von Bildern, usw. befaßt. Allerdings muß man hier ein Vorsichtszeichen aufstellen, da diese Unterscheidungen nicht ganz streng sind, und die Hirnfunktionen auch von einem Areal auf ein anderes, zumindest unter Umständen, verschoben werden können.

Zerstörungsfreie Methoden

Schon in der unbelebten Natur gibt es bei der Untersuchung von Werkstücken sogenannte zerstörungsfreie Methoden, bei denen das Werkstück also in keiner Weise bei der Untersuchung beschädigt wird. Solche Methoden sind natürlich auch ideal für das Gehirn, sei es von Menschen, sei es von Tieren. Eine solche Methode ist uns allen bekannt, nämlich wie man zerstörungsfrei in den Menschen hineinschauen kann, etwa wo seine Knochen und inneren Organe liegen,

oder auch krankhafte Veränderungen, wie Tumore, vorhanden sind. Das ist natürlich das Röntgenverfahren. In der modernen Gehirnformschung verwendet man darüber hinaus aber noch weitere Verfahren, die üblicherweise nur dem Fachmann bekannt sind. Wir wollen deshalb ein wenig auf sie eingehen, weil mit diesen Verfahren höchst interessante Aufschlüsse über Gehirnfunktionen möglich werden.

Das Messen elektrischer Felder im Gehirn

In Zukunftsromanen konnte man - und kann man auch heute noch - lesen, daß Menschen elektromagnetische Wellen, etwa wie Radiowellen, aussenden, und damit andere Menschen hypnotisieren und so diesen ihren Willen aufzwingen können. Um sich vor solchen Manipulationen zu schützen, trugen dann die Akteure in diesen Zukunftsromanen ein Drahtgeflecht auf dem Kopf. Dafür, daß sich Menschen auf diese Weise gegenseitig beeinflussen können, fehlt wohl jeder Nachweis, aber, wann immer wir denken, oder selbst im Ruhezustand, werden im Gehirn elektromagnetische Felder erzeugt, die dann auch nach außen dringen können. Untersuchungen derartiger elektromagnetischer Felder gestatten Einblicke in Gehirnfunktionen, wie wir noch sehr ausführlich in diesem Buch sehen werden. Bereits 1875 stellte der Arzt Caton fest: »Bringt man Elektroden an zwei Punkten der Oberfläche des Gehirns... an, so fließen schwache Ströme wechselnder Polarität durch den Verstärker.« Aber erst 1929 führte der Arzt Hans Berger das Studium dieser sogenannten Elektrozephalogramme von Menschen ein. Das Wort Elektrozephalogramm (abgekürzt EEG) bedeutet die Aufzeichnung der elektrischen Aktivität des Gehirns. Um ein solches EEG aufzunehmen, werden eine oder mehrere Elektroden auf der Schädeldecke befestigt, womit elektrische Spannungen gemessen werden können (Abb. 2.4). Um eindeutige Ergebnisse zu erzielen, wird der Unterschied der Spannung zwischen einer solchen Elektrode und einer Referenzelektrode gemessen. Zum Beispiel kann die Referenzelektrode, die immer die gleiche ist, auf der Schädeldecke befestigt sein. Diese Spannungsunterschiede schwanken nun im Laufe der Zeit mehr oder minder regelmäßig auf und ab, wobei in Abhängigkeit von der geistigen Tätigkeit ganz verschiedene Typen von solchen

Elektrozephalogramm (EEG)

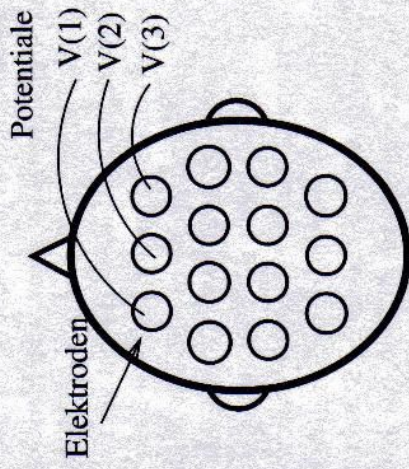


Abb. 2.4

Schema der Messung des Elektrozephalogramms (EEG). Auf der Schädeldecke (hier von oben gesehen, die Nase zeigt im Bild nach oben) werden Elektroden aufgebracht, die die elektrische Spannung über eine Referenzelektrode messen. Damit werden die sogenannten elektrischen Potentiale V bestimmt.

Zeitkurven gefunden werden. Derartige Kurven können sehr unregelmäßig aussehen, und ihre Interpretation ist oft schwierig. Daher haben die Mediziner eine Anleihe bei der Nachrichtentechnik genommen und verwenden sogenannte Frequenzfilter. Dies bedeutet, daß sehr rasche Schwingungen durch einen solchen Filter nicht durchgelassen werden, sondern nur langsamere, oder umgekehrt, daß nur solche Schwingungen weggefiltert werden, die zu langsam sind. Damit gelingt es den Mediziner, bestimmte Frequenzbänder zu definieren, so das Alpha-Band, das Schwingungen umfaßt, die etwa zehnmal in der Sekunde erfolgen. Wenn eine Versuchsperson im Ruhezustand ist und die Augen geschlossen hält, so treten derartige Alpha-Wellen auf, brechen aber zusammen, wenn die Person die Augen öffnet oder eine Tätigkeit beginnt. Im Schlaf können verschiedene Phasen in den entsprechenden Frequenzbändern beobachtet werden. Eine von ihnen ist die sogenannte REM-Phase. Dieses Wort stammt aus dem Englischen und bedeutet *rapid eye movements*, schnelle Augenbewegungen. In dieser Phase tritt bei den Versuchs-

personen also eine schnelle Augenbewegung auf, zugleich träumt diese Person auch heftig.

Nun könnte man meinen, daß jede Stelle im Gehirn ihre eigene elektrische Aktivität entfaltet und so, wenn verschiedene Elektroden auf der Schädeldecke aufgebracht werden, die verschiedensten Zeitkurven registriert werden. Dies ist aber oft nicht der Fall, wie wir in unserem Buch darlegen wollen. Das was an einer Stelle an elektrischen Feldern erzeugt wird, hängt engstens mit den Feldern zusammen, die an einer anderen Stelle produziert werden. Man spricht daher auch von kohärentem, das heißt zusammenhängendem Verhalten. Um derartige Vorgänge zu studieren, um also solche raum-zeitlichen Vorgänge zu untersuchen, muß man mehrere Elektroden auf der Schädeldecke befestigen und die jeweiligen Spannungsunterschiede gegenüber einer Referenzelektrode im Laufe der Zeit messen. Abbildung 2.5 zeigt derartige Zeitserien, die den einzelnen Elektroden entsprechen, wobei die Anordnung der Kästen dieser Abbildung der der Elektroden auf der Schädeldecke entspricht. Auf den ersten

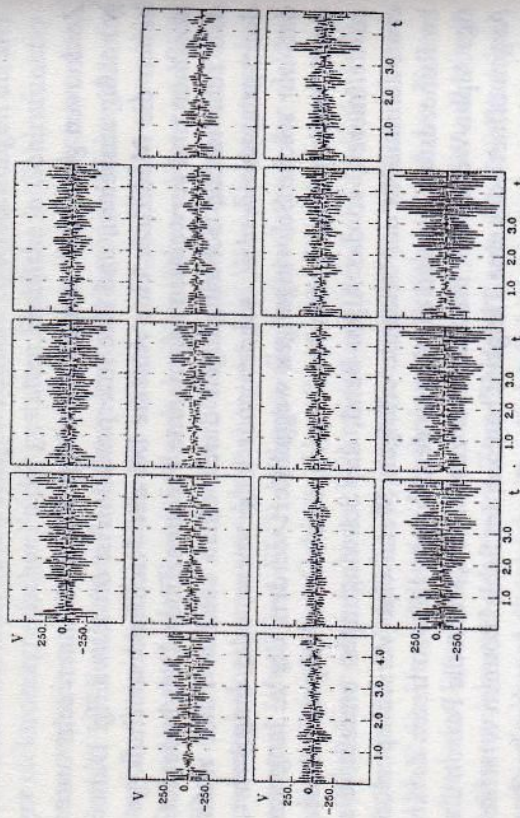


Abb. 2.5

Zu jeder Elektrode von Abbildung 2.4 gehört ein entsprechendes Kästchen, in dem nach rechts die Zeit und nach oben die gemessenen Potentiale aufgetragen sind.

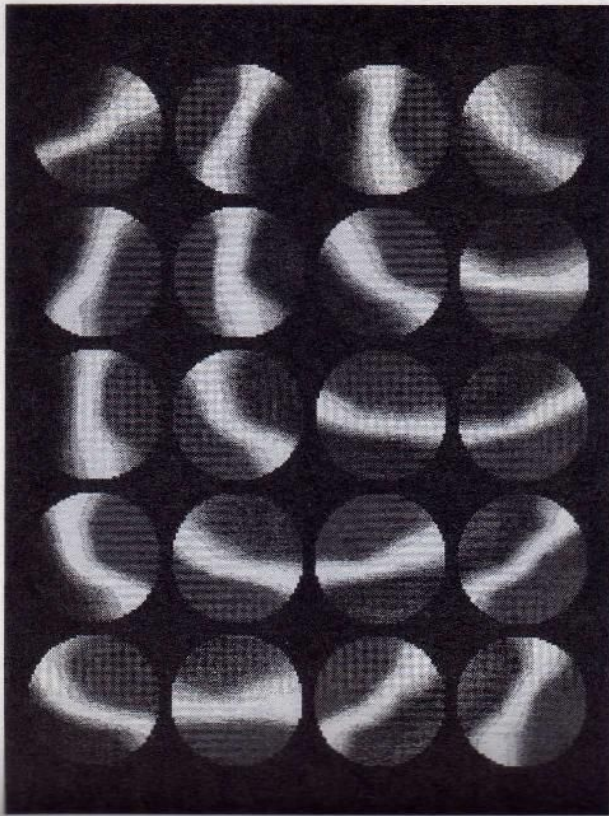


Abb. 2.6

Die einzelnen Kreise entsprechen jeweils einem Zeitpunkt und sind jeweils in jeder Zeile von links nach rechts zu betrachten. In jedem Kreis ist die räumliche Verteilung der Potentiale aufgetragen, wobei hellgrau hohes, mittelgrau mittleres und dunkelgrau niedriges Potential bedeutet. Wie das raum-zeitliche Muster zeigt, scheinen sich hier Wellen zu bewegen.

Blick mag es erscheinen, als würde hier nur wenig Verbindung im Verhalten zwischen den einzelnen Kästen zutage treten. Dies ändert sich aber, wenn wir aus den gemessenen Zeitreihen der Abbildung 2.5 ein raum-zeitliches Muster konstruieren. Zu jedem Zeitpunkt gibt es ja in jedem Kästchen der Abbildung 2.5 eine spezielle Erregung. Nun können wir eine Umordnung vornehmen, indem wir einen ganz speziellen Zeitpunkt herausgreifen und die herrschende Aktivität gemäß den einzelnen Kästchen auf der Gehirnschale aufmalen. So ergibt sich dann ein Intensitätsmuster, etwa wie in der Abbildung 2.6 oben links. Hierbei bedeutet hell eine hohe und dunkel eine niedrige elektrische Spannung. Trägt man nun für aufeinanderfolgende Zeitpunkte jedesmal alle diese Intensitäten auf der Schädeldecke auf, so ergibt sich eine Folge von raum-zeitlichen Mustern, wie

sie in Abbildung 2.6 dargestellt ist, wobei die Zeitfolge von oben links nach oben rechts, dann in der zweiten Zeile von links nach rechts usw. erfolgt. Was als unzusammenhängendes Gewirr von Kurven in Abbildung 2.5 erschien, nimmt nun eine höchst deutliche Struktur an. Wir sehen hier keineswegs einen wirren Fleckentepich vor uns, sondern ausgeprägte großflächige Muster, die zeigen, daß selbst ausgedehnte Gehirnregionen in gleicher Weise elektrisch aktiv sind. Aber, und das ist der zweite Punkt der Erkenntnis, diese Muster sind keineswegs statisch, sondern sie laufen im vorliegenden Beispiel um wie eine Art rotierende Welle.

Eine Reihe von Forschern, wie D. Lehmann in Zürich und Hellmuth Petsche in Wien haben den Zusammenhang zwischen geistigen Tätigkeiten und der Lokalisierung von erhöhter elektrischer Aktivität im Gehirn studiert. Hierbei stand weniger die Bewegung von diesen raumzeitlichen Mustern im Vordergrund, sondern eher die Frage nach der Lokalisierung von Gehirnaktivitäten. Zum Beispiel soll es nach Lehmann verschiedene Zentren geben, die aktiv werden in Abhängigkeit davon, ob eine Person an ein abstraktes oder ein konkretes Objekt denkt. Hier werden zugleich verschiedene Forschungsrichtungen deutlich; die eine Richtung sucht nach streng lokalisierten Vorgängen im Gehirn, während die andere nach kohärenten Mustern sucht. Beide Forschungsrichtungen haben ihre eigene Bedeutung, und wir werden sie in dem Buch immer wieder neu beleuchten. Besonders werden wir erkennen, daß es im Gehirn sogenannte chaotische Prozesse gibt, aber wen wundert das schon.

Magnetfelder im Gehirn

Das Gehirn erzeugt nicht nur elektrische Felder, sondern auch magnetische, allerdings äußerst schwache, deren Stärke ein winziger Bruchteil derjenigen des erdmagnetischen Feldes ist. Daher müssen die Versuchspersonen sehr sorgfältig vor solchen Störeinflüssen abgeschirmt werden. Solche schwachen Magnetfelder können durch einen physikalischen Apparat gemessen werden, der die Abkürzung *Squid* trägt, was zugleich den skurrilen Humor von Wissenschaftlern beleuchtet. *Squid* bedeutet nämlich im Englischen Tintenfisch, und wenn man einen Menschen mit seinem Kopf unter einer Apparatur

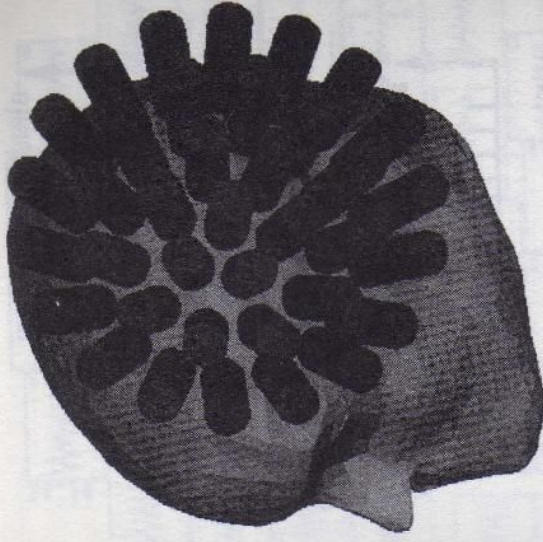


Abb. 2.7
Anordnung von *Squids* (Magnetfelddektoren) auf der Schädeldecke im Kelso-Experiment.

aus *Squids* sitzen sieht, so könnte man daran erinnert sein, daß der Tintenfisch seine Tentakeln mit den Saugnäpfen auf das Haupt der Versuchsperson gelegt hat. In Wirklichkeit ist aber *Squid* ein Kunstwort, das aus den Anfangsbuchstaben von *super conducting quantum interference device*, also supraleitender Quanteninterferenz-Apparat, zusammengesetzt ist. Die Funktion der *Squids* beruht auf einem speziellen - in der Supraleitung entdeckten - Effekt, nämlich dem Josephson-Effekt. Das soll uns aber hier nicht weiter kümmern.

Betrachten wir lieber ein Beispiel einer kürzlichen Untersuchung mit Hilfe solcher *Squids*. Hier wurde eine Anordnung von 37 *Squids* auf der Schädeldecke der Versuchsperson befestigt, und zwar in einer Region, die Teile des sogenannten motorischen und sensorischen Kortex umfaßt, also Gehirnareale, die für die Bewegung und Empfindungen zuständig sind (Abb. 2.7). In diesen von J. A. S. Kelso und Mitarbeitern durchgeführten Experimenten hörte die Versuchsperson ein periodisches Signal in Form regelmäßig ausgesandter Pleptöne. Die Versuchsperson sollte dann mit einem Finger einen

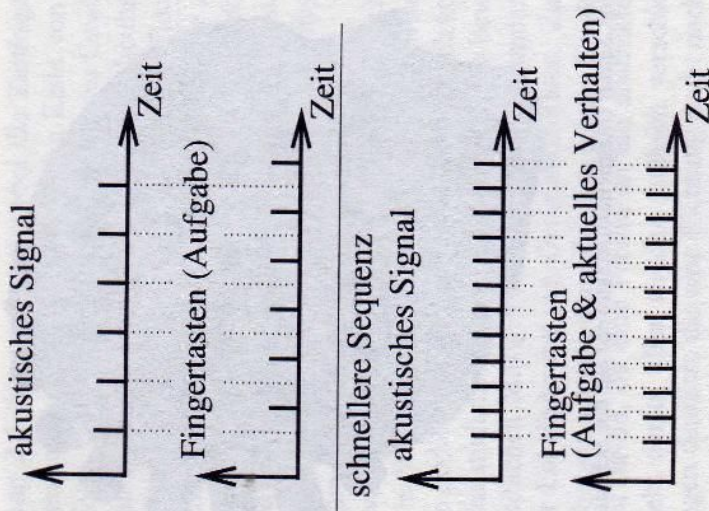


Abb. 2.8

Schematische Darstellung der Resultate des Kelso-Experiments. 1. Das akustische Signal ist gegenüber der Zeit aufgetragen. 2. Das Tasten des Fingers soll zwischen den akustischen Signalen erfolgen und wird auch so ausgeführt. 3. Schnellere Sequenz des akustischen Signals. 4. Die Testperson kann der Aufgabe beim Fingertasten nicht mehr folgen, sondern drückt die Taste praktisch gleichzeitig mit dem akustischen Signal.

Knopf *zwischen* den einzelnen aufeinanderfolgenden Signalen drücken. Das gelang ihr auch, wenn der zeitliche Abstand zwischen diesen Signalen genügend groß war. Wurde aber der Abstand verringert, so konnte unterhalb eines bestimmten Zeitabstandes die Versuchsperson nicht mehr diesen sogenannten synkopierenden Zustand aufrechterhalten, sondern schaltete auf ein neues Verhalten um, indem sie genau mit den Piepsignalen den Knopf drückte. Diese Resultate sind schematisch in Abbildung 2.8 dargestellt. Dieser Übergang ist natürlich schon an sich bemerkenswert, weil hier die Versuchsperson entgegen der Anordnung, also ganz unwillkürlich,

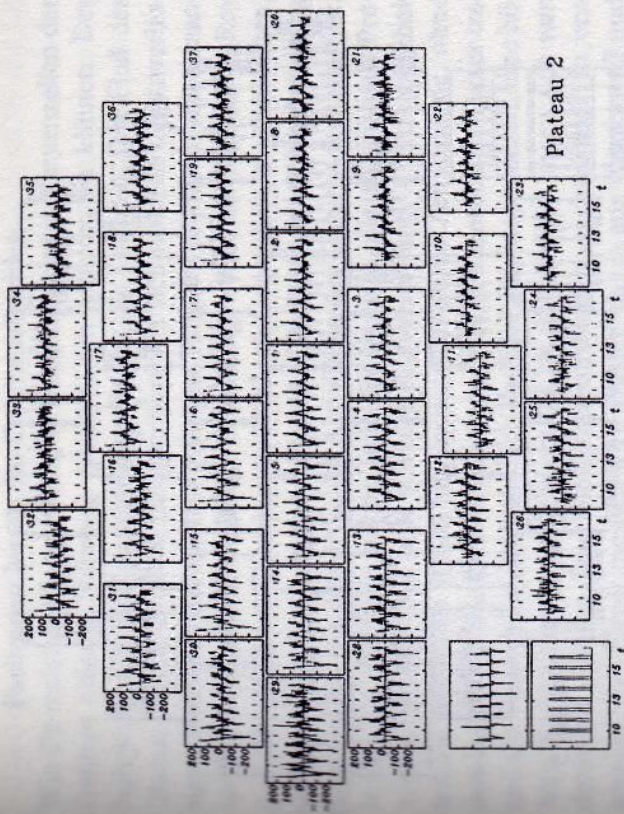


Abb. 2.9

Zu jedem *Squid* auf der Schädeldecke gehört jeweils ein Kästchen, in dem gegenüber der Zeit das lokal gemessene magnetische Feld aufgetragen ist. Der Kästchen links unten zeigt Referenzsignale, die hier nicht weiter diskutiert werden. Die Signale wurden aufgenommen, bevor der Übergang von der Synchronisation zur Synchronisation erfolgte.

von einer Verhaltensweise auf eine andere umschaltet. Derartige Umschaltvorgänge werden wir bei verschiedenen Gehirntätigkeiten feststellen können und sehen, wie sich hier unser Hirn gewissermaßen willentlichen Akten entzieht. In Zusammenhang mit der Erkundung unseres Gehirns ist natürlich die Frage von besonderem Interesse, ob sich dieser Übergang von der einen Verhaltensweise zur anderen auch im sogenannten Magnetoenzephalogramm (MEG) widerspiegelt (Abb. 2.9, 2.10). Obwohl auf den ersten Blick die entsprechenden Zeitreihen und auch die daraus hergeleiteten räumlichen Muster sehr kompliziert aussehen, lassen sich diese Daten dennoch sehr schön analysieren, wobei insbesondere das Charakteristikum des Übergangs deutlich in Erscheinung tritt. Hierauf werden wir in Kapitel 10 näher eingehen. Gegenüber den EEG-Messun-

Positronen lassen das Gehirn erstrahlen

Wie die meisten Körperzellen, so müssen auch die Nervenzellen des Gehirns ständig Nahrung erhalten, um arbeiten zu können. Der Nährstoff, der ihnen zugeführt wird, ist die Glukose. Der Fluß des Blutes, der die Glukose transportiert, hat sich wohl als der zuverlässigste Nachweis der lokalen geistigen Tätigkeit erwiesen. Interessanterweise wurde eine derartige Beziehung bereits von Charles S. Roy und Charles Scott Sherrington 1890 vorausgesehen, die feststellten, daß durch einen automatischen Mechanismus die Blutversorgung zum Gehirn mit den örtlichen Aktivitäten des Gehirns verknüpft ist. In der Tat erfordern solche Teile des Gehirns, die an geistigen Prozessen beteiligt sind, eine stärkere Blutversorgung. Allerdings arbeiten die Neuronen selbst, zumindest über kurze Zeitabstände, ohne den Sauerstoff oder, wie der Fachmann sagt, anaerobisch. Daher tragen die Venen, die ja bekanntlich das Blut abtransportieren, eine höhere Konzentration von Sauerstoff als üblich. Wie lassen sich nun derartige erhöhte Sauerstoffkonzentrationen nachweisen? In entsprechenden Experimenten wird Wasser, das ja aus Wasserstoff und Sauerstoff besteht, in die Armvene injiziert. Aber, und das ist der Knackpunkt des ganzen Experiments, im Wasser (H_2O) wird ein radioaktives Isotop verwendet. Dieses Isotop sendet eine spezielle Art von Teilchen aus, das Positron. Dieses Teilchen ist erst kürzlich in die Schlagzeilen geraten, weil es, gemeinsam mit dem Antiproton, Bestandteil des Antiwasserstoffs ist, des einfachsten Bausteins der Antimaterie. Schon früher hatten Science-fiction-Autoren darüber spekuliert, was denn passiert, wenn ein Mensch einem Wesen aus einer derartigen Antiwelt begegnet. Sobald sie sich die Hand reichen, lösen sie sich in Nichts auf, wobei nur Strahlung übrig bleibt. Das ist genau das, was passiert, wenn ein Positron im menschlichen Gehirn ausgesandt wird. Nach sehr kurzer Zeit trifft es auf ein Elektron, das ja überall vorhanden ist, und vereinigt sich mit diesem sozusagen zu Nichts. Aber übrig bleibt eine höchst energiereiche Strahlung, die sogenannte γ -Strahlung, die nichts anderes ist als eine Art Röntgenstrahlung, nur mit sehr viel höheren Energien. Bei der Vereinigung von Positron und Elektron besteht diese γ -Strahlung aus zwei Teilchen, den sogenannten γ -Quanten, die in genau entgegengesetzter Richtung davonfliegen. Stellt man nun um den Kopf der Versuchs-

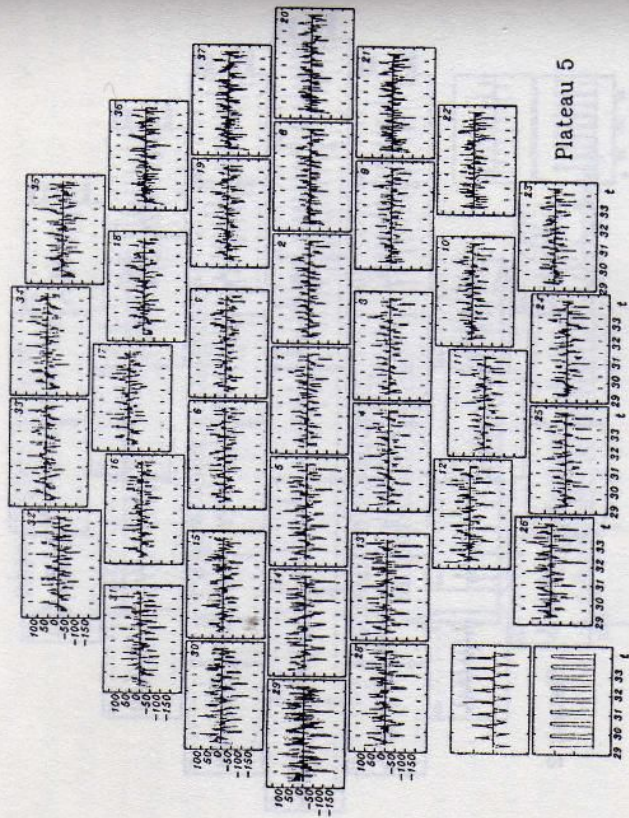


Abb. 2.10

Das Gleiche wie Abbildung 2.9, aber nachdem der Übergang zur synchronen fingerbewegung erfolgt ist.

gen bieten die MEG-Messungen wichtige Vorteile. Während nämlich durch die Gehirnschale elektrische Felder verzerrt werden, dringen die magnetischen Felder ungehindert hindurch und können so direkt gemessen werden. Auch müssen bei den EEG Messungen immer Spannungsdifferenzen gegenüber einer Referenzelektrode gemessen werden, während die magnetischen Messungen absolute Werte liefern.

Sehen wir uns im nächsten Abschnitt eine weitere wichtige physikalische Methode an, wie wir die Aktivitäten des Gehirns gewissenmaßen sichtbar machen können. Es handelt sich hier um die Erforschung des Gehirns mit radioaktiven Substanzen, die Positronen aussenden.

person Zähler auf, die diese davonfliegenden Teilchen registrieren, sobald sie auftreffen, so kann man feststellen, wann zwei entgegengesetzt aufgestellte Zähler zur gleichen Zeit ein Teilchen empfangen. Daraus kann man dann die Richtung bestimmen, woher die γ -Teilchen gekommen sind. Stellt man eine Reihe solcher Zähler auf, kann man den Ursprung der γ -Quanten millimetergenau lokalisieren und so feststellen, wo sich der radioaktive Sauerstoff des Wassers im Gehirn befunden hatte. Man könnte vermuten, daß nun auf diese Weise direkt sichtbar wird, wo höhere Blutkonzentrationen vorhanden sind und wo das Denken jeweils stattfindet. Allerdings hat diese Methode eine Tücke, da auch bereits das inaktive Gehirn gewissermaßen leuchtet, so daß zwischen den Bildern, die von einem inaktiven Gehirn und einem aktiven Gehirn aufgenommen werden, kein großer Unterschied zu bestehen scheint. Indessen werden höchst ausgeprägte Unterschiede sichtbar, wenn die beiden Bilder voneinander abgezogen werden. Dieses Abziehen muß man sich folgendermaßen vorstellen: Man teile die Bilder in einzelne kleine Quadrate ein, wobei jedes Quadrat einen bestimmten Helligkeitswert besitzt. Dieser Helligkeitswert ist also größtmäßig angebar, und nun muß man bei diesem Verfahren jeweils die Helligkeitswerte des einen Bildes von denen des anderen Bildes abziehen. Das kann natürlich sehr leicht mit Hilfe von Computern geschehen. Aber auch dann zeigen diese Differenzbilder noch keine klaren Strukturen. Zu diesem Zwecke müssen diese Experimente mehrfach wiederholt werden, entweder bei der gleichen Versuchsperson oder mit verschiedenen, und dann die einzelnen Versuchsergebnisse gemittelt werden.

Diese Methode, die wegen der Anfangsbuchstaben Positron-Emissions-Tomographie auch mit PET bezeichnet wird, wird nun zur Analyse von vielerlei geistigen Aufgaben herangezogen. Ein Beispiel sei hier erläutert. Um zu sehen, wie die Entstehung von Sprache im Gehirn lokalisiert ist, gaben Steven E. Petersen und Mitarbeiter der Testperson ein Hauptwort vor, die dann ein zugehöriges Tätigkeitswort finden und es aussprechen sollte. Zum Beispiel wurde das Wort *Hammer* vorgegeben, und die Versuchsperson fand das Wort *schlägt*. Im einzelnen wurde das Experiment folgendermaßen ausgeführt: Die Testpersonen hatten einen Fernsehschirm zu beobachten, auf dem ein Kreuz zur Ankündigung erschien, das Hauptwort wurde

entweder auf diesem Schirm oder durch Kopfhörer der Person gegeben. Dann hatte die Testperson zu sagen, welches Hauptwort sie gehört oder gesehen hatte, und schließlic sollte sie das zugehörige Tätigkeitswort ergänzen. Wie man erwarten konnte, war die optische Wahrnehmung im hinteren Teil des Gehirns lokalisiert, während die akustische Wahrnehmung im Schläfenlappen stattfand. Die gesprochenen Hauptwörter wurden in demjenigen Teil des Gehirns hervor gebracht, die dem Bewegungsteil angehören, aber nicht in den Broca- oder Wernicke-Arealen, von denen wir sprachen. Mit anderen Worten, keinerlei Denken war in der Produktion des Hauptwortes involviert. Wenn andererseits zwei Aufgaben miteinander kombiniert werden mußten, nämlich die bewußte Wahrnehmung der Bedeutung des Wortes und die Wahl der Antwort, waren der linke frontale Stirnlappen und der Seitenlappen beteiligt. Interessanterweise änderte sich aber dieses Muster nach etwa fünfzehn Minuten des Lernens. Die Areale für die Hauptwörter wurden die gleichen, die auch die Tätigkeitswörter erzeugten. Heutzutage gibt es ganze Landkarten, die zeigen, welche Gehirnareale bei bestimmten Tätigkeiten, wie beim Schachspiel, Lesen von Texten usw., »aufleuchten«. Es ist fast so wie bei der französischen Metro, wo man mit Lämpchen gespickte Karten auf den U-Bahnhöfen findet. Sucht man einen Zielbahnhof, so leuchtet eine Kette von Lämpchen auf, die einem den Weg mit der U-Bahn dorthin zeigen. Ganz so weit ist man beim Gehirn allerdings insofern noch nicht, als zwar die einzelnen Hirnareale aufleuchten, nicht aber die detaillierten Wege von einem zum anderen. Aber anders geartete Experimente sind auf dem besten Wege auch dieses aufzuzeigen, allerdings mit Hilfe von Viren, die von einer Zelle zur anderen »krabbeln«.

Mikroskopische Magneten im Gehirn

Das Gehirn erzeugt nicht nur, wie wir in dem Abschnitt über Magnetfelder im Gehirn gesehen haben, großräumige Magnetfelder. Magnetfelder entstehen nämlich auch in kleinsten atomaren Dimensionen. Hierzu müssen wir ein klein wenig tiefer in die Physik einsteigen. Wie wir alle wissen, besteht der menschliche Körper aus Molekülen, die wiederum aus Atomen aufgebaut sind. Solch ein