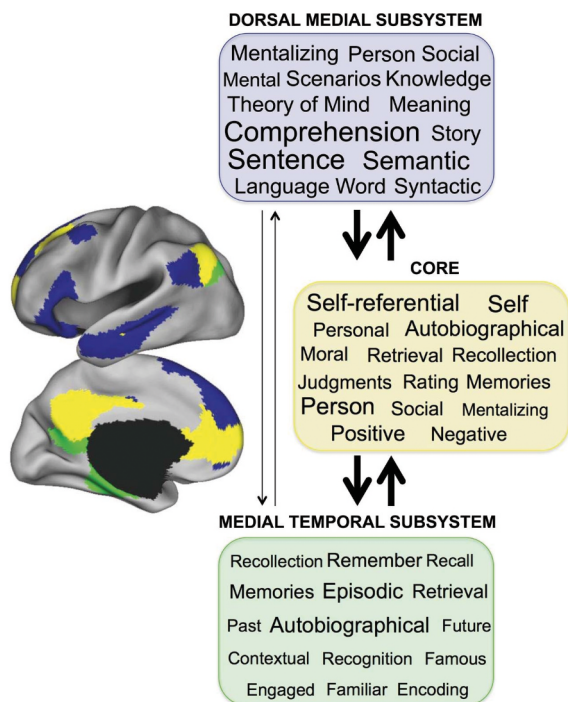




Dekodierung der Funktionen von **Standardnetzwerk-Komponenten** mithilfe automatisierter fMRI-Metaanalysen. Man hat also Hirnfunktionen bestimmten Hirnarealen zugeordnet (etwa Gedächtnis, Aufmerksamkeit, Emotion, Sinneswahrnehmung usw.). Ausgewertet wurden dafür 526 vorhandene Funktions-Kartierungen. Die Begriffe mit den besten Übereinstimmungen zu Hirnregion-Aktivitäten stehen in den entsprechend farbigen Kästen. Die Schriftgröße gibt die Größe der Korrelation wieder.

Ereignissen und lauten „aufgaben-unabhängiges Denken“ oder „anregungsunabhängiges Denken“. Andere bezeichnen eher den nach innen gerichteten Aspekt und sprechen von spontanem oder autobiografischem Denken. Ein Begriff, der sowohl ihre aktive Natur als auch ihre relative Unabhängigkeit von laufenden sensorischen Eingaben erfasst, ist „selbst erzeugtes Denken“.

Man nimmt nun an, dass ein Kern des Default Mode Networks Informationen repräsentiert, die persönlich relevant sind, das ein zeitliches Subsystem (medial temporal subsystem) es einem Individuum ermöglicht, assoziative Informationen in Erinnerung zu rufen, um kohärente mentale Szenen zu konstruieren, und ein weiteres Untersystem (dorsal medial subsystem) dafür da ist, Informationen zu reflektieren, die sich auf sich selbst und andere beziehen, wahrscheinlich unter Verwendung von gespeichertem konzeptuellem Wissen. Das alles zusammen soll einen Großteil des mentalen Inhalts ergeben, der dem selbsterzeugten Denken zugrunde liegt (s. Abb.)[andr2014].

3.10.3 Mehrere große Netzwerke

Das DMN ist zudem auch nur eins der großskaligen Netzwerke, die man mittlerweile gefunden hat, so das schon erwähnte Kontrollnetzwerk. Es sind auch eine Reihe von Netzwerken für den Ruhezustand bekannt (Resting-state-Netzwerke; RSN), die zum Teil über langstreckige Verbindungen vom Großhirnkortex zu Dienzephalon, Hirnstamm und Kleinhirn verfügen [grod2014]. Das reife menschliche Gehirn ist demnach in eine Sammlung spezialisierter funktioneller Netzwerke unterteilt, die flexibel interagieren, um verschiedene kognitive Funktionen zu unterstützen.

Forscher versuchten nun, die Organisationsprinzipien zu identifizieren, die die Reifung dieser funktionalen Netzwerke leiten. Dabei stellten sie fest, dass Gehirnregionen bei Kindern lokaler mit anderen Regionen kommunizieren, die Kommunikation über das Alter jedoch verteilter wird. Gemeinschaftlich aktive neuronale Gruppen sind also bei Kindern sind

vorwiegend nach anatomischer Nähe geordnet, während derartige Gemeinschaften bei Erwachsenen insbesondere funktionelle Beziehungen widerspiegeln.

Auch in fortgeschrittenem Alter ändert sich das Gehirn. Es versucht beispielsweise, andere Verbindungen aufzubauen, wenn bestehende aufgrund des altersbedingten Absterbens von Gehirnzellen ausfallen. Insgesamt werden Aktivitäten der hinteren Zentren vermindert, die in den vorderen Zentren verstärkt (posterior-to-anterior shift in aging; PASA (s. Abb.)). Dabei wird dem Default Mode Network eine entscheidenden Rolle zugeschrieben [jock2017].

3.10.4 DMN am besten verbunden

Es gibt auch offenbar einen Wettstreit verschiedener Netzwerke im Gehirn, die sich gegenseitig in ihrer Aktivität unterdrücken. Ist eines dieser ungefähr zwanzig Netzwerke aktiv, bleiben die anderen mehr oder minder stumm. Denkt man über den nächsten Urlaub nach, ist es demnach kaum möglich, gleichzeitig dem Inhalt eines Texts zu folgen.

Um herauszufinden, welchen Einfluss die anatomische Struktur auf die Funktion der Netzwerke im Gehirn hat, analysierten Forscher die Verbindungen zwischen insgesamt 40 000 kleineren Regionen des Gehirns. Mittels Kernspintomografie prüften sie bei 13 Probanden und sechs Probandinnen zwischen 21 und 31 Jahren insgesamt 1,6 Milliarden möglicher anatomischer Verbindungen zwischen den Hirnregionen! Dabei verglichen sie diese mit dem durch die Nervenzellen tatsächlich hervorgerufenen Informationsfluss.

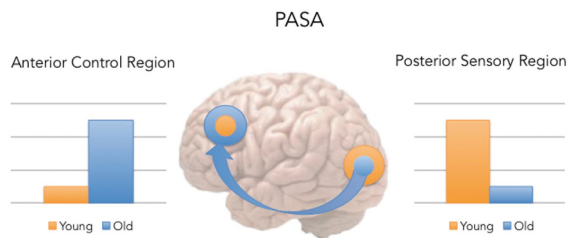
Die Ergebnisse zeigten, dass es die größten Übereinstimmungen zwischen Gehirnstruktur und Funktion beim DMN gibt [horn2013]. Es nutzt im Vergleich zu anderen Netzwerken die direktesten anatomischen Verbindungen. Dies führt dazu, dass sich die Aktivität automatisch auf dieses Netzwerk einpendelt, wenn keine äußeren Einflüsse auf das Gehirn einwirken. Die Studienergebnisse führten zu dem Schluss, dass der strukturelle Aufbau des Gehirns dafür sorgt, dass es sich automatisch in einen sinnvollen Zustand fährt, solange es nicht für andere Tätigkeiten gebraucht wird.

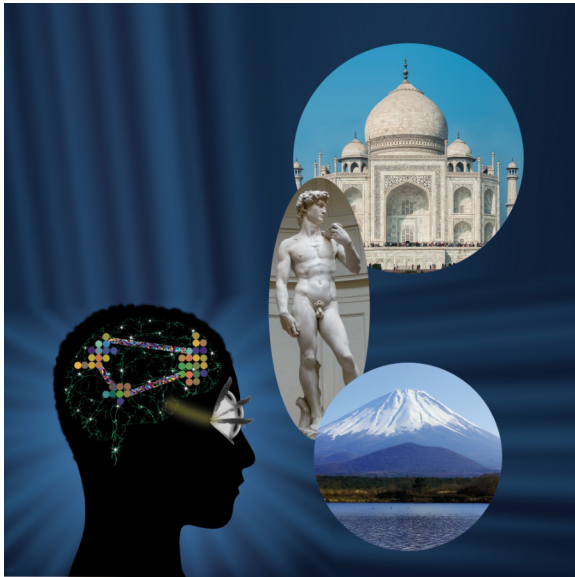
3.10.5 Das DMN

bei Drogen und Ästhetik

Man hat nun auch herausgefunden, dass die Drogen LSD und Psilocybin das DMN beeinträchtigen. Das DMN zerfällt quasi unter LSD, und dieser Zustand ermöglicht andererseits eine hervorragende Verbesserung der Kommunikation zwischen Gehirnnetzwerken, die

Posterior-to-Anterior-Verschiebung (PASA) beim Altern sagt voraus, dass mit dem Alter eine Verschiebung einhergeht, so dass ältere Teilnehmer während Gedächtnisaufgaben eine größere Aktivität im linken dorsolateralen präfrontalen Kortex (DLPFC) und eine geringere Aktivität im linken visuellen Kortex zeigen; jüngere Erwachsene zeigen das umgekehrte Muster. Bemerkenswert: Auch Zweisprachigkeit hilft, die negativen Effekte des Alterns für kognitive Leistungen zu vermindern.





Ob Kunst, Architektur oder Landschaft: Anblicke, die uns gefallen, rufen in unserem Gehirn ähnliche Muster hervor. Die ähnlichen Aktivitätsmuster deuten jedoch darauf hin, dass das DMN einen universellen **Code für ästhetische Attraktivität** enthalten könnte.

normalerweise stark voneinander getrennt sind.

Das Ruhezustandsnetzwerk hat offenbar auch Einfluss darauf, wie wir Kunst erleben bzw. optische Eindrücke nach Schönheit klassifizieren. Demnach könnte das Default Mode Network einen universellen Code enthalten, der zeigt, ob wir etwas schön finden. Wiederum mittels fMRT beobachteten Forscher die Gehirnaktivität von Studienteilnehmern, während diese Bilder von Kunst, Architektur oder Naturlandschaften betrachteten (Abbildung 8). Dabei stellte man fest, dass in den Gehirnarealen, die für visuelle Verarbeitung zuständig sind, die gezeigten Bilder sehr unterschiedliche Aktivitätsmuster aufwiesen – auch im Vergleich der Bilder, die alle Teilnehmer als ästhetisch an-

sprechend beurteilt hatten [vess2019].

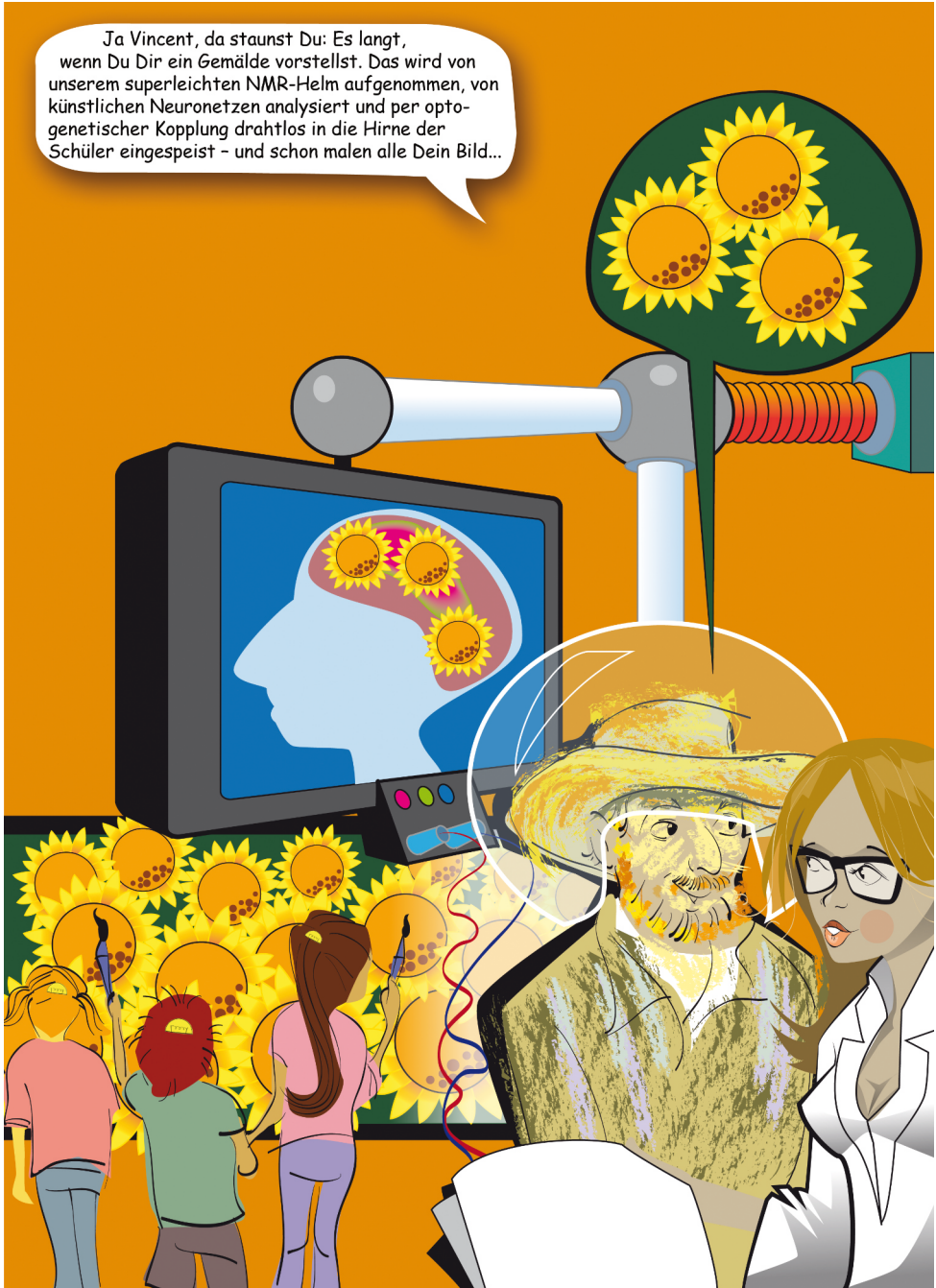
Ein ganz andere Reaktion fanden die Forscher jedoch in den Gehirnregionen, die typischerweise während der inneren Reflexion aktiv sind, im DMN. Dort führten die Bilder, die die Studienteilnehmer als schön beurteilt hatten, zu bemerkenswert ähnlichen Aktivitätsmustern, unabhängig davon, ob Kunstwerke, Gebäude oder Landschaften betrachtet wurden. Die ähnlichen Aktivitätsmuster deuten nach Interpretation der Wissenschaftler darauf hin, dass das DMN einen universellen Code für ästhetische Attraktivität enthalten könnte. Sie wissen noch nicht, ob das DMN diesen Code selbst errechnet, aber es hat eindeutig Zugang zu abstrakten Informationen darüber, ob wir eine Erfahrung visuell ansprechend finden oder nicht.

3.11 Aufklärung auf mehreren Skalen und in vielen Differenzierungen

Dieses Kapitel und das vorangegangene Kapitel zu moderner Hirnforschung geben einen Eindruck davon, dass die Funktion des Gehirns von sehr differenzierten Strukturen abhängt – die man mit verschiedensten, ausgefeilten Methoden untersucht (s. Abb.). Es ist nicht so, dass einfach 100 Milliarden Nervenzellen vorhanden sind, die über 100 Billionen Synapsen miteinander kommunizieren. Viele Strukturen, Substrukturen, Verbindungen und molekulare Einheiten machen die „Wetware“ aus; „graue Masse“ war gestern. Von daher dürfte eine Biologie-nahe Simulation eines Gehirns noch lange Stückwerk bleiben. Vielleicht ist sie in der

Vollkommenheit aber auch gar nicht notwendig. Details über Funktionen des Gehirns vermittelt der folgende Artikel.

Modernste Methoden der Gehirnforschung...



4 Bewusstsein nicht zu lokalisieren

Schon in den vorangegangenen Kapiteln sind Funktionen des Gehirns angesprochen und erläutert worden, typischerweise ausgehend von der Skala molekularer oder neuronaler Vorgänge oder Strukturen. Es gibt aber auch Teile der Hirnforschung, die noch weiter an höhere Gehirnleistungen, die den Menschen auszeichnen, herantreten, bis hin zur Frage, was das Bewusstsein ausmacht. Zunächst jedoch ein kleiner Abschnitt über den „kleinen Unterschied“: Die Hirnforschung zeigt auch immer klarer, dass sich Männer und Frauen auch in Hirnfunktionen unterscheiden.

Es ist offensichtlich, dass der Satz „All men are created equal“, den Thomas Jefferson 1776 in die US-amerikanische Unabhängigkeitserklärung schrieb, die Gleichheit der Chancen für alle Menschen herausstellt; ansonsten hätte sich Jefferson futuristisch für Klone ausgesprochen... Das deutsche Grundgesetz wird da etwas deutlicher: „Alle Menschen sind vor dem Gesetz gleich“ und „Männer und Frauen sind gleichberechtigt“.

4.1 Neuronale Unterschiede bei Mann und Frau

Damit darf jedoch keine Gleichmacherei begründet werden, und auch die Diskussion von Quotenregelungen sollte Unterschiede berücksichtigen, Unterschiede auch zwischen männlichen und weiblichen Gehirnen, was die moderne Gehirnforschung in immer mehr Details aufdeckt. Und damit ist nicht der Gewichtsunterschied gemeint: Bei gleicher Statur von Mann und Frau ist das Gehirn bei Männern durchschnittlich 100 Gramm schwerer. Je feiner man ins Gehirn schaut, desto deutlicher werden die Unterschiede.

So hat der Hippocampus bei Männern und Frauen unterschiedliche anatomische Strukturen und neurochemische Zusammensetzungen. Im Verhältnis zum Gesamthirn ist der Hippocampus bei der Frau größer. Beim Mann ist jedoch die CA1-Region (eine der vier Regionen des Ammonshorns (Cornu Ammonis), Teil des Hippocampus) größer und die Anzahl der Pyramidenzellen erhöht. Des Weiteren bestehen eine unterschiedliche Rezeptor-Affinität für verschiedene Neurotransmitter. Neuere Forschungen zeigen zudem, dass sich die Hippocampi von Frauen in Relation mit ihrem Hormonspiegel ändern. Man hat herausgefunden, dass parallel zum ansteigenden Östrogenspiegel bis zum Eisprung auch das Volumen des Hippocampus zunimmt [bart2016]. Wie sich diese Schwankung auf Hirnfunktionen und Verhalten auswirkt, ist noch ungeklärt.

Die Amygdala, der Mandelkern, u. a. zuständig für emotionale Empfindungen, hat bei Männern und Frauen hinsichtlich der Anordnung von Funktionen in den beiden Hirnhälften (auch der Mandelkern findet sich zweimal) Unterschiede. Bei Erinnerungen an emotionale Momente, Reaktionen auf glückliche Gesichter sowie bei der Verschaltungen der Amyg-

dala mit dem restlichen Gehirn ist bei Frauen die linke Gehirnhälfte einbezogen, bei Männern die rechte.

Frauen sind wohl auch großzügiger; zumindest funktionieren eine kleine Hirnstruktur entsprechend. Das Striatum, ein Bereich in der Hirnmitte, ist für die Bewertungs- und Belohnungsverarbeitung zuständig und in jeder Entscheidung aktiv. Untersuchungen zeigen: Bei den Frauen wurde das Striatum stärker aktiviert, wenn sie sich prosozial verhielten, als wenn sie egoistische Entscheidungen trafen. Bei Männern aktivierte egoistisches Verhalten das Striatum stärker. Das Belohnungssystem von Frauen reagiert also stärker auf großzügige Entscheidungen als jenes von Männern [sout2017]. In einem weiteren Experiment wurde das Belohnungssystem der Probanden durch die Einnahme von Medikamenten gestört. Unter diesen Bedingungen verhielten sich die Frauen egoistischer und Männer sozialer. Das Belohnungssystem von Frauen und Männern reagiert also auch pharmakologisch unterschiedlich. Zukünftige Studien müssen also wohl so gestaltet werden, dass auch auf Unterschiede zwischen Männern und Frauen geprüft wird.

Mindestens in einer Sex-bezogenen Hinsicht sind Frauen und Männer aber wohl sehr ähnlich: In dem neuronalen Abbild, den sie den Geschlechtsorganen entgegenbringen [lens2015]. Angesprochen wurde die Thematik ja bereits in dem vorangehenden Kapitel über Hirnstrukturen in dem Abschnitt „Der Kitzel-Mechanismus – und Sex-Stimulation“. Kurz wiederholt: Taktile Empfindungen werden im Gehirn in Form von geordneten Karten der Körperoberfläche repräsentiert. Im Gehirn der Säugetiere befindet sich die größte Karte in der somatosensorischen Hirnrinde. Bei Säugetieren zeigen die äußeren Genitalien einen ausgeprägten sexuellen Dimorphismus und können sich bei sexueller Erregung in Größe und Form verändern. Eine neue Studie zeigt, dass trotz des ausgeprägten sexuellen Dimorphismus der äußeren Genitalien die Körperkarten von Klitoris und Penis identisch sind – zumindest bei Ratten; nur bei denen hat man es untersucht. Das deutet auf eine tiefgehende Homologie der Genitalrepräsentationen von Penis und Klitoris im Gehirn hin.

4.2 Erinnerungen, Erfahrungen – und Zusammenhänge

Lernen wird von verschiedenen Hirnstrukturen ermöglicht bzw. beeinflusst; das hat bereits der vorangegangene Artikel gezeigt. Eine zentrale Rolle spielt dabei der Hippocampus. Interessant ist: Sowohl der Zellbereich, über den durch den Hippocampus Erinnerungen erzeugt werden, wie auch derjenige, von dem sie abgerufen werden, geht über die gleichen neuronalen Strukturen [naka2015].

Für diese Erkenntnis trainierte man Ratten, in eindeutiger Weise auf zuvor erlernte Gerüche zu reagieren, die in verschiedenen Futterteilen anzutreffen waren. Nach der Detektion von mRNAs von verschiedenen Aktivitätsmarkern, die eine starke Verbindung zum Gedächtnis haben, identifizierte man die entsprechenden Regionen und Zellen, deren Aktivität während der Bildung und des Abrufens der Erinnerungen mit der Gedächtnisleistung in Zusammenhang stand. Es zeigte sich, dass diese Zellen

ausschließlich im oberen Bereich des Hippocampus lagen, was bei Menschen dem hinteren Hippocampusbereich entspricht. Außerdem wurde deutlich, dass sowohl beim Bilden als auch beim Abrufen der Gedächtnisinhalte die gleichen Zellen aktiv waren.

Bekannt sind mittlerweile auch die Teile von Neuronen, an denen Erinnerungen und externe Informationen zusammenfließen. Mit einer optogenetischen Methode, die Calcium-Ionenflüsse in Neuronen als Lichtblitze darstellte, konnten die Forscher in einem einzigen Bild entsprechend präparierter Mäuse rund 100 solcher „hot spots“ der Wahrnehmung darstellen, die sich in der Hirnrinde befinden. Dann ging man einen Schritt weiter und manipulierte die Schwelle bewusster Wahrnehmung bei den Tieren, ebenfalls optogenetisch durch Bestrahlung bestimmter Neuronen mit Licht. So konnten sie den Zusammenhang von Wahrnehmungsort und Verhalten belegen [taka2016].

Hirnrinde und Hippocampus arbeiten für die Informationsspeicherung eng zusammen, und zwar auch schneller, als man erwartete. Das fand man heraus, indem man Versuchspersonen in virtuelle Labyrinth versetzte. Einige blieben bei den Versuchsreihen konstant, andere änderten sich. Ein Vergleich von fMRT-Aufnahmen zeigte dann, welche Hirnregionen bei der Bildung des räumlichen Gedächtnisses beteiligt waren.

Die Forscher waren überrascht, dass die Aktivität des Precuneus, einer Region im hinteren Neocortex, mit dem Lernen kontinuierlich anstieg, wohingegen die Aktivität im Hippocampus kontinuierlich abfiel. Auch die Kommunikation zwischen beiden Regionen hat im Laufe des Lernens abgenommen. Langfristige, neocortikale Gedächtnisspuren bilden sich also offenbar gleich nach dem Eintreffen neuer Informationen aus [brod2016]. Bislang rechnete man mit einem langsamen, wochenlangen Prozess. Im Precuneus bildet sich eine eigenständige Gedächtnisrepräsentation aus. Wenn das fMRT Aktivität im Precuneus eines Probanden anzeigte, ließ sich voraussagen, ob dieser einen gesuchten Gegenstand im Labyrinth finden würde oder nicht. Ein Fazit der Studie war auch: *Repetitio est mater studiorum*: Wiederholen eines Lernstoffes ist wichtig.

Und weiter geht die Erforschung höherer Hirnleistungen: In einer Studie maßen die Wissenschaftler die Aktivität der Spiegelneurone in der motorischen Hirnrinde von Makaken [cagg2016]. Während des Experiments wurden den Tieren auf einem Bildschirm natürliche Handbewegungen sowie abstrakte Reize in Form von bewegten Scheiben gezeigt. Der Bewegungsverlauf der Hände und Scheiben wird durch die gleichen kausalen Beziehungen beschrieben. Es zeigte sich: Die Aktivitätsmuster der Spiegelneurone waren für beide Reizarten fast identisch. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass motorische Bewegungen und bestimmte Aspekte visueller Kausalitätsurteile möglicherweise gemeinsam von den gleichen Nervenzellen verarbeitet werden. Beide Funktionen greifen scheinbar auf überlappende Gehirnbereiche zurück. Die Forscher vermuten, dass höhere Formen der Kausalitätswahrnehmung aus einfachen Mechanismen der Bewegungserkennung und Interpretation entstanden sein könnten.

Spiegelneuronen sind Nervenzellen, die beim Betrachten eines Vorgangs das gleiche Aktivitätsmuster zeigt wie bei dessen tatsächlicher, eigener Ausführung. Spiegelneuronen findet man bei Primaten und beim Menschen. Seit ihrer erstmaligen Beschreibung im Jahr 1992 wird diskutiert, ob Spiegelneuronen an Verhaltensmustern von Imitation oder möglicherweise sogar Mitgefühl bei Primaten beteiligt sind. Bislang gibt es jedoch keine gesicherten Erkenntnisse über Empathie-Spiegelneuronen. Untersuchungen am Menschen sind wegen einzubringender Elektroden nur in Ausnahmefällen möglich, und die Spiegelneuronen-Zentren, die man bei Makaken fand, dabei kaum zu erreichen.

4.3 Bewusstsein taucht auf

Die hier geschilderten neuronalen Leistungen lassen die Frage nach einem Bewusstsein aufkommen. Zweifellos ist die Frage, wie Bewusstsein entsteht, derzeit nicht abschließend zu beantworten, aber es gibt immer größere Annäherungen an eine Antwort. Eins weiß man hingegen: Es gibt keinen dezidierten Ort, an dem sich das Bewusstsein im Gehirn befindet. An einen solchen hatte man lange Zeit geglaubt. Und an dem sollte ein kleines Menschlein sitzen, das alle aktuell aufgenommenen Sinneseindrücke wahrnimmt – modern gesehen ein Operator einer Fabrik vor Bildschirmen mit Bildern von Überwachungskameras sowie Sensorwerten. Dann könnte das Menschlein im Hirn entscheiden, was zu tun wäre.

4.3.1 Homunculus und cartesianisches Theater

Das Problem von solch einem Homunculus, der zuerst als Idee eines künstlich geschaffenen Menschen im Spätmittelalter im Zusammenhang mit alchemistischen Theorien entwickelt wurde und durch seine Verwendung in Faust II von Goethe bekannt wurde: Wenn der Homunculus das innere Bild wahrnimmt, indem er selbst wieder ein inneres Bild erzeugt, so scheint man einen weiteren Homunculus in dessen Hirn postulieren zu müssen – und noch einen, und noch einen... – ein infinites Regress. Wenn er jedoch kein inneres Bild benötigt, kann man gleich auf Abbildtheorien – und den Homunculus – verzichten.

Auch heute hat man sich noch nicht ganz von dem Homunculus-Bild verabschiedet, wenn es auch anders klingt. Unbestritten haben Neurowissenschaftler herausgefunden, dass bestimmte Regionen im Hirn spezifisch auf bestimmte Reize – Formen, Farben, Bewegungen – ansprechen; ansatzweise steht dies in den vorangegangenen Artikeln. Nun sagen Bewusstseinstheoretiker, dass zur Wahrnehmung eines fliegenden, roten Balls all diese Eigenschaften zusammengeführt werden müssten, um den Ball wahrzunehmen.

Mehr und mehr gibt es Kritik zu diesem Bild, federführend formuliert von dem US-amerikanischen Philosophen Daniel Dennett (geboren 1942) und als „cartesianisches Theater“ benannt. Das Zusammenführen der Informationen sei eben nur nötig, wenn – wem oder was auch immer – ein inneres Bild präsentiert werden müsse, damit er/es alle Informationen zusammentrage. Dennett argumentiert jedoch: „Wenn eine bestimmte Be-