

Publiziert in:

P.G. Layer (2003). Zu Evolution und Entwicklung von Hirn und Bewusstsein. Über Zellen und neuronale Netze zu Qualia. In: Der Entthronte Mensch? Anfragen der Neurowissenschaften an unser Menschenbild. J.C. Schmidt, L. Schuster (Hsg.), Menthis-Verlag, Paderborn, S. 79-97.

Paul G. Layer

Zu Evolution und Entwicklung von Hirn und Bewusstsein

Über Zellen und neuronale Netze zu Qualia

1. ÜBERBLICK

Physiologie und Struktur komplexer Gehirne lassen sich durch Betrachtung evolutions- und entwicklungsbiologischer Abläufe analysieren, was der Hirnforschung tiefe Einblicke bis zur molekularen Ebene erlaubt. In knappster Form werden grundlegende Aspekte der Stammes- und Individualentwicklung (*Phylo- und Ontogenese*) von Gehirnen im Tierreich beschrieben, bis hin zum menschlichen Gehirn, dessen Grobgliederung skizziert wird. Das Lernvermögen, insbesondere von Kleinkindern, ist aufgrund postnataler Hirnplastizität erklärbar. Systematische Unterschiede zwischen einzelnen Zellen und Neuronenverbänden sind für selbstorganisierende Bewusstseinsprozesse bedeutsam. Am Beispiel der stufenweisen visuellen Signalverarbeitung wird die mögliche Wahrnehmung von Bildern diskutiert, um danach gängige Theorien zur Bewusstseinsfrage einander gegenüber zu stellen. Schließlich wird auf das Qualia-Problem eingegangen, was vom Autor als *Unerklärbarkeit des Bewusstseinsinhalts* und als *Urfrage des Leib-Seele-Problems* verstanden wird. Sie kann wohl auch durch modernste biologische Forschung nicht beantwortet werden.¹

¹ Aus Platzgründen ist es nicht möglich, Begriffe wie Leib, Seele, Geist, Wesen, Wahrnehmung, Bewusstsein, Selbstbewusstsein, etc. zu definieren und strikt anzuwenden. Wenn ich solche Begriffe umgangssprachlich einsetze, so hat dies den Mangel wissenschaftlicher Unschärfe, aber auch den Vorzug, dass man mich – besonders hier im interdisziplinären Gespräch – hoffentlich versteht.

2. VIELE HIRNE – VIELE WELTEN

Alles, was wir sehen, hören, fühlen, was wir im Tiefsten empfinden, wie wir uns an etwas erinnern, ob und wie wir denken, wie wir uns verhalten, hoffentlich immer hoffen können und sogar an etwas glauben dürfen, hängt mit unserem Gehirn zusammen, dem komplexesten aller Organe in der belebten Natur. Wenn ein Kleinkind im Alter von knapp einem Jahr auf allen Vieren krabbelnd versucht, sich auf die Beine zu stellen, um seine Hände frei zu bekommen, so zeigt sich, dass es nun Zweibeiner, ein aufrecht gehender Mensch werden will. Dieser Schritt offenbart die Entwicklung des Kindes vom noch Animalischen hin zum Menschendasein, vergleichbar mit der stammesgeschichtlichen Entwicklung der frühen Hominiden irgendwann vor 1-10 Mio. Jahren.

Welche Gefühle treiben ein Kind um, welcher Art ist sein Bewusstsein, hat es schon Gedanken? Nein, es kann noch nicht »denken« in unserem Sinne. Ideen vielleicht? Traumhaftes, Töne, Bilder, oder nur Punkte, Konturen und Farben? Wie anders wird doch sein Weltbild sein, wenn dieses Kind erwachsen sein wird, vielleicht nach einem geistig regen Leben ein hohes Alter erreicht hat? Andererseits, wie zerbrechlich unsere Bewusstseinswelten sein können, zeigen uns psychopathologische Zustände ebenso wie neurodegenerative Erkrankungen an. Was spielt sich mit den Gedanken, Gefühlen und dem Bewusstsein eines mitten im Leben stehenden Menschen ab, der in einer Zeitspanne von 2-3 Jahren von einem aktiven Menschen zu einem debilen, dementen Alzheimer-Greis zerbricht? Man spricht dann – weil man es nicht besser greifen kann – vom Zerfall der Persönlichkeit.

Wie spannend wäre es, über die Weltbilder von Tieren mehr zu wissen. Wie bunt ist die Welt des Schmetterlings, welchen Sphärensymphonien lauscht der Blauwal auf seinen Zügen durch die Ozeane, welche Duftwelten durchstreift mein Hund im Stadtpark und welchen Höllenhorror durchleidet er während der Knallerei zum Jahreswechsel? Manches wissen wir. So wissen wir, dass Sinnesleistungen bei verschiedenen Tierarten sehr verschieden ausgeprägt sein können. Nachtaktive Tiere haben so gut wie kein Farbenssehen (z.B. Nager wie Mäuse, Ratten), Bienen sehen noch sehr gut im ultravioletten Bereich, Fledermäuse orientieren sich per Echolot im Raum. Vieles wissen wir nicht. So können wir bloß darüber spekulieren, wie diese unterschiedlichen Sinnesfähigkeiten die jeweilige Wahrnehmung, gar das Bewusstsein der Tiere prägen.

Sicherlich kann sich der Schmetterling anhand der vielen Blütenfarben und -formen orientieren, um sich so den schmackhaftesten Nektar zu suchen. Aber was bedeuten ihm die Farben? Empfindet er so etwas wie »Freude«,

»schmeckt« ihm der Nektar, so wie uns ein Stück Roquefort mit einem Schluck Bordeaux schmeckt? Viele Hirne – viele Welten.

Versetzen wir uns einmal in die Welt eines Einzellers. Was nimmt er von der Welt wahr, und wie? Das Augentierchen² besitzt als Antrieb eine lange Geißel, mit der es sich – nicht unähnlich einem Motorboot – sehr effektiv durchs Wasser bewegt. Neben Zellkern, einer äußeren Hülle und anderen Organellen besitzt es ferner einen »Augenfleck« samt Photorezeptor, welche es ihm erlauben, seine Lichtausbeute zu erhöhen, um möglichst effektiv Energie über Photosynthese zu gewinnen. Dieser »einfache« Einzeller ist also bestens für die Kommunikation mit seiner Umwelt gerüstet, um optimal zu überleben: er hat Sensorik (wovon der Augenfleck nur ein Teil ist), eine Motorik (Bewegungsapparat) und ein molekulares Integrationssystem, das diese Komponenten sinnvoll und »automatisch« miteinander verknüpft. Wahrnehmung braucht es nicht – das Augentierchen funktioniert wie ein einfacher technischer Regelkreis.³

In ähnlich solitärer und selbstgenügsamer Weise lebt ein anderer einzelliger Organismus mit dem klingenden Namen *Dictyostelium discoideum* – der zelluläre Schleimpilz, allerdings nur, solange er genügend Nahrung findet. Befinden sich zu viele von Seinesgleichen auf engem Raum und die Energiequellen werden knapp, so wird ihr Verhalten schlagartig anders. Die Zellen organisieren sich und fließen – aktiv wandernd – auf einen bestimmten Punkt zu. Dort vereinigen sie sich zu einem vielzelligen Organismus. Der anfängliche Zellklumpen durchläuft nun ganz bestimmte morphologische Gestaltungsphasen, um am Ende Geschlechtszellen zu bilden, die ihm eine geschlechtliche Vermehrung erlauben.⁴ Was nehmen die Zellen zum Zeitpunkt des Übergangs in einen völlig neuen Aggregationszustand wahr? Immer, wenn man in einem Video Tausende der wandernden *Dictyostelium*-Zellen auf einen Punkt zustreben sieht, ist man geneigt, ein übergeordnetes »Wissen« in dieses System hinein zu denken. Dabei passiert »nichts anderes«, als dass alle Zellen stetig miteinander molekular kommunizieren, und bei Bedarf durch *Selbstorganisation* in eine neue, komplexere Strukturebene übergehen. Kein heutiger Biologe wird wohl hierbei »bewusste« Reaktionen unterstellen.⁵

2 Euglena.

3 Vgl. Campbell (1998, 571).

4 Vgl. Campbell (1998, 581).

5 So etwas wurde vom Panpsychismus mit dem Postulat einer protopsychischen Qualität der einzelnen Zelle vertreten; siehe: Rensch (1968) und die Ausführungen weiter unten.

3. VON DER EINZELNEN NERVENZELLE ZU NEURONENVERBÄNDEN

Auch Hirne bestehen aus nichts anderem als aus vielen einzelnen Zellen, den Neuronen und etwa gleich vielen Begleitzellen, den Gliazellen. Neurone besitzen alle Komponenten und Organellen einer normalen tierischen Zelle. Die Zellmembran ist durch ein elektrisches Potenzial ausgezeichnet, das sich durch ein- und ausströmende Ionenflüsse kurzfristig verändern kann (Nervenimpuls). Der Zellkern befindet sich im Zellkörper. Als Fortsätze leiten Dendriten elektrische Signale zum Soma, Axone leiten sie vom Soma weg. Neurone sind also polarisierte Zellen; sie können elektrische Impulse über lange Distanzen fortleiten (normalerweise immer in einer Richtung – unipolar) und sind dafür ausgestattet, mit anderen Zellen enge Kontakte, Synapsen auszubilden. Ihre Morphologie ist vielfältig und häufig sehr ausgeprägt. Je nach Struktur, Funktion und Lage können viele Typen von Neuronen unterschieden werden. Ausgereifte Neurone sind somit hochspezialisierte Zellen. Ein Photorezeptor im Auge kann Lichtenergie in chemische Energie umwandeln, eine nachgeschaltete Ganglienzelle kann dies nicht, sondern sie leitet ein Summenpotenzial von der Netzhaut an höhere Hirnzentren weiter. Solche spezifischen Aufgaben sind zwischen verschiedenen Neuronentypen nicht austauschbar. Obwohl Neurone – ähnlich dem Augentierchen – auch als einzelne Zellen Reize aufnehmen und darauf reagieren können (was z.B. in der Zellkultur leicht nachgewiesen werden kann), so werden sie ihre eigentliche Aufgabe erst im Zellverband erfüllen können. Ähnlich wie beim Schleimpilz zu beobachten, erzielen viele Neurone, die zu einem Netzwerk verbunden sind, völlig neue Eigenschaften, die ein einzelnes Neuron nicht zeigt. Die Selbstorganisation vieler einzelner Neurone zu einem vernetzten Neuronenverband kann in der Zellkultur beobachtet werden.⁶ Solche Ordnungsprozesse spielen wohl nicht nur beim Übergang zu höheren Strukturebenen, sondern bis zur Frage nach dem Bewusstsein eine wichtige Rolle (z.B. *Emergenztheorie*).

3.1. Einfache Nervensysteme

Nervensysteme sind essentiell, um dem Tier ein adäquates, situationsgemäßes Verhalten zu erlauben und somit sein Überleben und seine Fortpflanzung sicherzustellen. Hierzu werden Sinnesindrücke von der Außenwelt wie auch vom Innenmilieu des Organismus aufgenommen (Sensorik), bewertet und in angemessene Reaktionen überführt. Dies können motorische, oder auch metabolische Reaktionen (z.B. Drüsensekretion, etc.) sein. Da Nervensignale ihrer physiologischen Natur nach »elektrisch« sind, arbeiten Nervensysteme schnell

6 Vgl. Layer et al. (2002).

im Vergleich etwa zum Verlauf molekular-hormoneller Regulationsprozesse. Es ist darauf hinzuweisen, dass die weitaus meisten Reaktionen – ähnlich wie oben beim Einzeller, gilt dies bis hin zum Menschen – nicht *willkürliche*, sondern *unwillkürliche (autonome)*, d.h. also auch *unbewusste* Reaktionen sind.⁷

Schon beim Wasserpolyphen *Hydra*, einem einfach gebauten Hohlschlauch mit einer von Tentakeln bedienten Mundöffnung, kann ein einfachstes Nervensystem nachgewiesen werden. Die Neurone sind diffus und lose netzartig verteilt, sie arbeiten zum Teil bidirektional, d.h. derselbe Fortsatz kann Signale aufnehmen und ableiten. In der Kopfregion ist das Nervennetz etwas verdichtet. Mit zunehmender Komplexität der Tiere im Stammbaum wird auch der Bau ihrer Nervensysteme verzweigter, gegliederter und geordneter. Bei den Plattwürmern⁸ finden wir eine deutlich höhere Entwicklungsstufe vor. Bei ihrem Nervennetz sind mehrere Paare von Nervensträngen entlang der Längsachse des Tieres angeordnet und über Querstränge verbunden. Im Kopf finden sich größere, kompakte Zellgruppen von Neuronen, die als Kopfganglien bezeichnet werden. Im Vergleich zum Polypen (*Hydra*) ist dieses Gehirn also durch eine beginnende *Bilateralität*, die *Zentralisation* in Nervensträngen und insbesondere einer fortgeschrittenen *Kopfbildung*⁹ ausgezeichnet. Ein Vorteil, einfache Nervensysteme zu studieren, liegt in der Überschaubarkeit der beteiligten Netzwerke. Der berühmte Fadenwurm¹⁰ hat nur etwa fünfhundert Nervenzellen, deren Entstehung, Lokalisation und Vernetzung vollkommen bekannt ist. Beim Nervensystem des Seehasens *Aplysia* konnten kleinste Netzwerke zellulär, physiologisch und pharmakologisch analysiert werden und zeigen, wie bestimmte Verhaltensreflexe reguliert werden. Immer bleiben es aber »Reflexe«, eine Wahrnehmung, gar ein Bewusstsein ist weder zu fordern noch anzunehmen.

3.2. Evolution komplexer Nervensysteme

Bei höheren Tiergruppen – sowohl bei Wirbellosen¹¹ wie bei den meisten Wirbeltieren¹² – sind die Nervensysteme aufgrund der Zellzahlen, der Vielzahl von Zelltypen und ihrer Verschaltungsmuster als komplex zu bezeichnen. Bei Ringelwürmern¹³ findet man ein Strickleiternnervensystem mit einem Zerebralganglion, zwei bauchseitig (ventral) gelegenen Längssträngen und segmentierten Querkonnektiven, welches als Grundform für die Ner-

7 Zur Diskussion, ob es überhaupt einen *freien Willen* gibt, siehe z.B. Roth (1996).

8 Plathelminthes

9 Zephalisation.

10 Gemeint ist der *Caenorhabditis elegans*.

11 Invertebraten.

12 Vertebraten.

13 Anneliden.

vensysteme höherer Gliedertiere¹⁴ und damit der meisten Wirbellosen angesehen werden kann. Dieser Grundplan wird innerhalb der Tiergruppen stark variiert und teilweise extrem zentralisiert.¹⁵ Eine stammesgeschichtliche Verwandtschaft von wirbellosen Tieren zu den Wirbeltieren bleibt auch noch weiterhin unklar.

Die Gehirne aller Wirbeltiere (zu denen systematisch der Mensch gehört) lassen sich auf einen fünfgliedrigen Entwicklungsplan mit End-, Zwischen-, Mittel-, Hinterhirn und Rückenmark zurückführen, und daher kann ihre Evolution als *gradualistisch* angesehen werden. Je nach funktionellen Anforderungen haben die einzelnen Hirnteile sehr verschiedene Ausprägungen im Laufe der Stammesgeschichte erfahren; so ist das Kleinhirn¹⁶ bei manchen Vogel- und Fischarten sehr groß. Das Großhirn – ontogenetisch geht es aus dem Endhirn hervor – wird phylogenetisch oft als eine Fortentwicklung aus einem Riechhirn betrachtet. Sofern dies zutrifft (was nicht allgemein akzeptiert ist), hat wohl gleichzeitig eine Invasion sensorischer Eingänge aus dem Thalamus in das Endhirn stattgefunden, wodurch das Endhirn zu einem höheren Integrationszentrum geworden sein dürfte.

Verschiedene Kriterien belegen, dass der Mensch das komplexeste Gehirn besitzt. Da ist zuerst die unfassbare Zahl von Nervenzellen und ihren Verschaltungen: etwa 1 Billion Neurone und etwa dieselbe Anzahl von Gliazellen. Jede dieser Zellen kann nun entlang ihrer Fortsätze bis zu zehntausend Synapsen, also bis zu 10^{15} spezifische Verschaltungen mit anderen Zellen bilden. Eine solche Komplexität ist für uns völlig unvorstellbar, ungriffbar; was heißt 10^{15} ? Wenn wir jede Sekunde eine Synapse zählen könnten, so würden wir drei Millionen Jahre zählen, um alle Synapsen in einem menschlichen Gehirn erfasst zu haben. Ein weiteres Kriterium dafür, dass mit dem menschlichen Gehirn ein Höchststand in der Hirnentwicklung unter allen Tieren erreicht ist, wird durch sein Gewicht im Verhältnis zum gesamten Körpergewicht angedeutet. Beim Menschen ist die Vergrößerung des Neokortex als Teil des Endhirns besonders auffällig und letztlich für die besonderen menschlichen Leistungen ausschlaggebend. Ob dieser Aspekt auch belegt, dass der Mensch an der Spitze einer stammesgeschichtlichen Entwicklungsleiter steht, oder nur ein Seitenzweig in einem offenen Entwicklungsbaum darstellt, kann hier nicht weiter bewertet werden. Man ist sich allerdings darüber einig, dass die Evolution von Nervensystemen im ganzen Tierreich viele Sprünge, auch Regressionen zeigt (*Punktualismus*), so dass es keine linear einheitliche, für das ganze Tierreich gültige, ansteigende Entwicklung hin zu hoher Hirnkomplexität gab. Jedenfalls ist es in vielen Fällen

schwierig, Hirngröße und Gehirnkplexität eindeutig mit Verhaltenskomplexität oder Hirnleistungen zu korrelieren.

4. MECHANISMEN DER HIRNENTWICKLUNG

4.1. Neuroentwicklungsbiologie

Die Neuroentwicklungsbiologie wird heute oft als selbständiges Fach gesehen, denn die Aufklärung embryonaler Entwicklungsabläufe hat wesentlich zum Verständnis von Nervensystemen beigetragen. Die 15 Trillionen Synapsen im menschlichen Hirn sind nicht zufällig, gar chaotisch im Hirn verteilt, sondern es herrscht eine räumliche Zuordnung der sendenden und empfangenden Neuronen (siehe z.B. Projektionskarten, unten). Wenn eine hohe neuronale Zuordnung offenbar gegeben ist, stellt sich die Frage, wie diese während der Entwicklung erreicht wird. Das übergeordnete Thema dieses Faches ist somit die neuronale Spezifität und ihre entwicklungsbiologische Spezifizierung.

Um die Hirnentwicklung von Wirbeltieren aufzuklären, sind der Zebrafisch, der Frosch, das Hühnchen und die Maus beliebte Modellsysteme. Jedes »System« hat seine Vor- und Nachteile und muss entsprechend der Fragestellung eingesetzt werden. Ausgehend von der frühen Anlage und Differenzierung der Neuralröhre wird versucht, die weitere Differenzierung des peripheren und des zentralen Nervensystems Schritt für Schritt und in einzelnen molekularen Prozessen zu verstehen. Die Maus als wichtigster Vertreter der Säugetiere kann genetisch gut manipuliert werden, was uns hilft, definierte Wirkungen einzelner Gene bei der Entwicklung, aber auch bei Krankheitsprozessen zu entschlüsseln. Will man die Bildungsprozesse zuerst allgemein einordnen, so taucht immer wieder die Frage auf, ob ein bestimmter Schritt in der Hirnentwicklung von seiner Umgebung unabhängig (autonom) ist, oder ob die betroffenen Zellen von ihr abhängig sind. Bei einer autonomen Differenzierung sollte allein das zelleigene Genom entscheidend sein (was aber strikt betrachtet nie der Fall ist), bei der umgebungsabhängigen Differenzierung spielen Zell-Zell-Wechselwirkungen über kurze oder auch längere Distanzen (*Diffusion*) eine wichtige Rolle. Den Wechselwirkungen kommt größte Bedeutung zu, denn die Zahl der gesamten Gene in allen Tieren – egal ob Wurm oder Mensch – ist sehr klein im Vergleich zur schier unendlich großen Neuronen- oder gar Synapsenzahl, und damit der Anzahl der notwendigen Spezifizierungsschritte. Selbstorganisierende Prinzipien zwischen den Zellen, man könnte sie auch als *epigenetische* Phänomene bezeichnen, müssen daher weitgehend die Hirnbildung

14 Articulata.

15 Vgl.: Dudel et al. (1996, Kap. 1).

16 Zerebellum.

erklären. Dies zeigt sich etwa in der Zellkultur, wenn Zellen, die aus einer Netzhaut des Hühnerembryos isoliert werden, wieder einen korrekt geschichteten und vernetzten Zellverband nachbilden.¹⁷ Die vielen molekularen Instruktionen, die den komplexen Prozess der Hirnbildung steuern, unterliegen häufig dem Prinzip der *Redundanz*¹⁸. Millionen von Nervenfortsätzen müssen ihr richtiges Ziel finden – wie ist dies möglich? Bei der *axonalen Weg- und Zielfindung* scheinen schwache, aber weit reichende hemmende Einflüsse insgesamt wichtiger zu sein als lokal-punktuell Aktivierung so genannter *Wegweiserzellen* (um einen Vergleich zu gebrauchen: Sie wollen mit dem Auto zu einem Ort genau auf der gegenüberliegenden Flußseite; dazu wird es trotz eines langen Umweges günstiger sein, den Weg über die nächste Brücke zu nehmen, als direkt durch das Wasser zu wollen). Im Einzelnen lassen sich bei Wirbeltieren die frühen Prozesse der Hirnentstehung wie folgt zusammenfassen: der rückenseitige¹⁹ Bereich der äußeren Körperschicht²⁰ bildet die Neuralplatte; sie wird sofort mit molekularen Koordinaten gekennzeichnet, so dass die daraus sich entwickelnde Neuralröhre schon »weiß«, wo vorne, hinten, rechts, links, oben und unten liegt. Die Röhre schließt sich wie ein Reißverschluss. Alle Zellen vermehren sich zu dieser Zeit vielfach (*Proliferationsphase*). Die Röhre wird schnell in fünf Längsabschnitte unterteilt, aus denen dann *Hirnbläschen* und Rückenmark entstehen. Die Genetik dieser Prozesse ist faszinierend und in groben Zügen verstanden. Zellen, die sich nicht mehr weiter teilen, besiedeln die äußere *Mantelzone* des Rohrs und beginnen nun, in verschiedene Zelltypen zu differenzieren. Durch weitere Zellvermehrung wird die Wand des Neuralrohrs dicker, wobei jede neu entstandene Zelle durch gezielte Wanderung (*Migration*) ihren Platz in einer zugehörigen Zellschicht findet. Das *periphere Nervensystem* entsteht aus Zellen, die aus dem Neuralrohr auswandern und sich in weit entfernten Regionen ansiedeln. Neu gebildete Neurone senden lange Fortsätze (Axone, Dendriten) aus, die ihre entfernten Zielgebiete ansteuern. Die erst losen Kontakte zwischen Fortsatz und Zielzelle werden zu Synapsen »verdichtet«. So entstehen zuerst einfache, später komplexere Nervenetze. Spontan aufkommende Nervenaktivität trägt zur weiteren strukturellen Feinvernetzung in den Netzwerken bei. Dieser Selektionsprozess dauert auch noch bei aktiver Nutzung lange fort: viel benutzte Bahnen werden verstärkt, wenig aktive Verbindungen werden abgebaut.

17 Siehe: Layer et al. (2002).

18 D.h. man mache von allem zuerst zuviel, z.B. mehr Zellen, mehr Synapsen als notwendig, etc.; der Überschuss wird später abgebaut.

19 Der dorsale Bereich.

20 Ektoderm.

4.2. Das kindliche Hirn – ein unbeschriebenes Blatt

Das menschliche Gehirn hat bei der Geburt mit 350 g noch lange nicht sein Wachstum abgeschlossen. Bis zum dritten Jahr verdreifacht sich das Gewicht, bis zur Pubertät erreicht es sein Endgewicht von 1350 (f.) bzw. 1450 (m.) Gramm. In dieser Zeit erfolgt zu einem großen Teil auch die Myelinisierung, d.h. die isolierende Ummantelung langer Nervenfortsätze mit Gliazellen. Noch bedeutender in den ersten beiden Lebensjahren ist die starke Feinverästelung der dendritischen Fortsätze, einhergehend mit vermehrten axonalen Kontakten und einem massiven Zuwachs an Synapsen. So kommt es im visuellen Kortex des Kleinkindes zwischen dem 2. und 4. Monat zu einem wahren »Synapsen-Spurt«. Mit knapp 1 Jahr ist mit annähernd einer Milliarde Synapsen pro Kubikmillimeter die höchste Synapsendichte in diesem Areal erreicht. Diese Zahl – und dies ist besonders wichtig – wird sich bis zur Pubertät wieder auf weniger als die Hälfte verringern. Somit bleibt das kindliche Gehirn bis zur Pubertät sehr »plastisch«, es ist strukturell formbar und dem Informationsgehalt nach leer wie ein unbeschriebenes Blatt Papier. Das Prinzip heißt Überschussproduktion von neuronalen Strukturen, um nicht genutzte Synapsen später wieder abzubauen. Darauf beruht die hervorragende Lernfähigkeit des jungen Gehirns, ebenso wie die Erkenntnis »was Hänschen nicht lernt, lernt Hans nicht mehr«. Ganz hoffnungslos ist die Situation für uns Erwachsene jedoch nicht, denn Synapsen können bis ins hohe Alter neu- bzw. umgebildet werden, allerdings bei stark abnehmender Rate. Auch hat das erwachsene Gehirn eine gewisse funktionelle regenerative Kapazität. Bei Schädigung eines bestimmten Hirnareals (z.B. visuell) kann die beeinträchtigte Funktion von einem benachbarten Hirnareal, das bisher eine andere (z.B. auditorische) Funktion ausübte, zum Teil übernommen werden.

4.3 Räumliche Ordnung im Hirn

So ist die Herstellung räumlich geordneter Hirnstrukturen das Resultat seiner embryonalen Entwicklung. Räumliche Ordnung lässt sich auf verschiedenen Organisationsebenen wiedererkennen. Die vielen Milliarden von Zellen eines Hirns lassen sich weniger als hundert Hauptzelltypen zuordnen; Zellen eines Zelltyps üben gleiche Funktionen aus. Die morphologische Einheitlichkeit bestimmter Zelltypen – die Kenner mögen hier etwa an silberpräparierte Purkinje-Zellen des Zerebellums denken – ist immer wieder beeindruckend; die Klassifizierung von Zelltypen setzt heute auch oft schon auf der physiologisch-metabolischen Ebene an. Häufig findet man bestimmte Zelltypen in ganz bestimmten Zellschichten wieder; Zellschichtung oder die Ansammlung gleichartiger Zellen in Ganglien ist also ein wichtiges Ord-

nungsprinzip auf dem Gewebeniveau. Solche Zellgruppen haben oft gemeinsame Projektionsgebiete, Areale oder Schichten, wo sie gleichartige Synapsen in großer Zahl ausbilden. So lässt sich leicht vorstellen, wie ähnliche Zellgruppen untereinander verwandte neuronale Subnetzwerke anlegen werden.

Der folgende Abschnitt bietet eine sehr vereinfachte Gliederung des fertigen Wirbeltiergehirns.²¹ Auf der Ebene des ganzen Organs ist die auffälligste anatomische wie auch funktionelle Ordnung die regionale Unterteilung des Zentralnervensystems (ZNS). Legen wir zum einfachen Verständnis gedanklich das ursprüngliche Neuralrohr zugrunde, so gilt in transversaler Richtung (also in Querrichtung des Rohrs) ganz allgemein, dass rückenseitig (*dorsal*) die sensorischen, bauchseits (*ventral*) die motorischen Anteile überwiegen. In der Längsrichtung können vom hinteren Teil (*caudal*) des Rohres hin zu seinem vorderen Ende (*rostral*) schrittweise »höhere« Integrationsstufen in den Hirnleistungen beobachtet werden. Zäumen wir das Pferd also von hinten her auf, so folgt vom Rückenmark ausgehend in rostraler Richtung (nach vorne) im Hinterhirn die *Medulla oblongata*, wo die Hirnnerven V bis XII in das Gehirn Eingang finden. Die *retikuläre Formation* als Teil der Medulla hat grundlegende Bedeutung für Prozesse wie Atmung, Kreislauf oder Wachheit. Die *Brücke (Pons)* ist bei Vögeln und Säugern zu finden und verbindet das *Kleinhirn*²² mit dem *Kortex*. Das Kleinhirn ist eine Bildung des rostro-dorsalen Hinterhirns und regelt vor allem die Feinmotorik. Das *Mittelhirn* besteht aus *Tectum*, *Colliculus superior* und *Tegmentum*. Während das Tectum sensorische Aufgaben erfüllt, ist das Tegmentum als ventraler Teil des Mittelhirns weitgehend motorisch aktiv. Das *Zwischenhirn* wird in *Epithalamus* mit *Pinealorgan* (nach Descartes der Ort der Umsetzung von Materie in Geist), *Thalamus* (dorsal, ventral) und *Hypothalamus* unterteilt, wobei die dorsalen Anteile wieder sensorischer Natur sind und viele Projektionen in das Endhirn senden. Der Hypothalamus mit anhängender Hypophyse steuert die hormonelle Regulation. Als *Hirnstamm* bezeichnet man die ventralen Teile von Hinterhirn und des Mittelhirns, bei Säugern mitsamt dem ganzen Mittelhirn. Das *Endhirn* schließlich ist in *Pallium* auf dorsaler, und *Subpallium* mit den *basalen Kernen* auf ventraler Seite gegliedert. Beim Pallium wird ein *lateral*, *medial* und *dorsaler Kortex* unterschieden. Bei Säugern entsprechen diese dem *piriformen* (primär olfaktorischen) Kortex, dem *Hippocampus* und dem *Neokortex*. Der Neokortex ist bei manchen Säugern, insbesondere den Primaten, massiv vergrößert, so dass er den Rest des gesamten Gehirns von vorn nach hinten überlagert. Beim Menschen ist die Volu-

21 Der etwas technisch und detailliert gehaltene Abschnitt ist zum Verständnis des Restes entbehrlich.

22 Zerebellum.

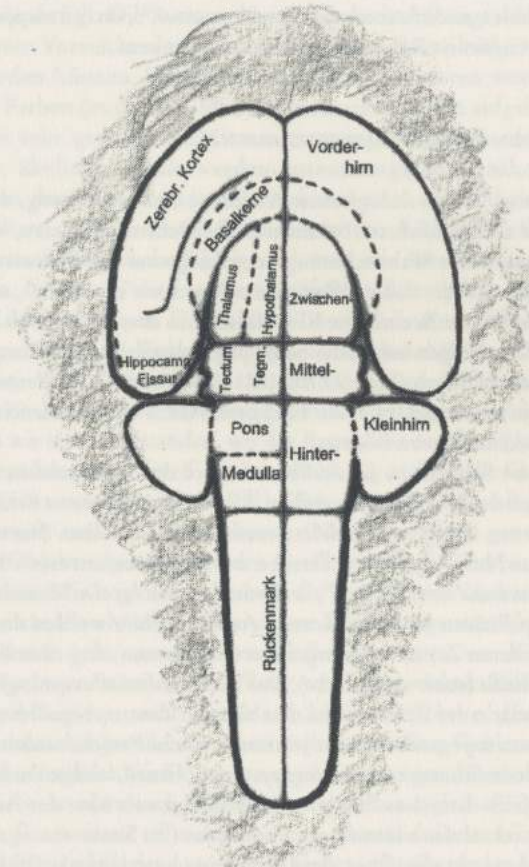


Abb. 1: Schematische Gliederung des Gehirns der Ratte, mittig aufgeklappt und von oben betrachtet. Von der ventralen (bauchseitigen) Mittellinie sind seitlich angrenzende Bezirke in ventral-dorsaler (rückenseitig) Richtung eingezeichnet; so liegt z.B. das Tectum »oberhalb« vom Tegmentum.

menzunahme des Neokortex am größten, so dass Furchen (*Sulci*) und Falten (*Gyri*) am stärksten ausgebildet sind. Physiologisch bedeutsam sind *funktionale Felder* auf der Großhirnrinde. Relativ genau abgrenzbare Areale sind mit bestimmten Aufgaben befaßt. Im hinteren Lappen bis in den Scheitellappen herauf liegt das *visuelle Feld*, seitlich daneben das *auditorische* (Hörzentrum

und Hörfeld), seitlich-oben der *somatosensorische* Bereich, direkt davor *motorische* Felder, seitlich vorne das *Sprechzentrum*²³, im Stirnlappen und im *präfrontalen Gebiet* ist Raum für assoziatives Denken.

5. WIE WERDEN BILDER WAHNGENOMMEN?

Die Aufklärung der physiologischen Prozesse beim Sehvorgang, wie sie sich vom Auge bis zu den höchsten Sehzentren des Gehirns abspielen, war immer Hauptgegenstand der Wahrnehmungsforschung und der Bewusstseinsdeutung. Wie sehen wir die äußere Welt, wie nehmen wir sie »wahr«, wie deuten wir Bilder, erkennen z.B. eine rote Rose, lassen uns aber auch durch Illusionen verleiten? Solche Fragen haben die neurophysiologische Forschung seit dem 19. Jahrhundert beflügelt (Helmholtz, 1821-1894) und das moderne Fach der Neurobiologie begründet. Hier ein knappster Abriss unseres derzeitigen Wissens zur Dekodierung von Bildern.

Das Bild des Sehfelds in der Außenwelt wird durch Hornhaut, Linse und Glaskörper auf der Netzhaut abgebildet. Über die so genannte Sehbahn werden Signale vom Auge in räumlich geordneter Weise über Nervenbahnen (z.B. optischer Nerv) an höhere Zentren weitergeleitet; ein erstes Relaiszentrum ist der seitliche Kniehöcker²⁴, und von dort erfolgt die Weiterleitung zur Area 17 des primären visuellen Kortex. Auch von hier werden die visuellen Signale zu weiteren Zentren weitergeführt (siehe unten). In »räumlich-geordneter Weise« heißt (stark vereinfacht), dass Punkte, die im ursprünglichen Bild benachbart sind, in der Retina bis zu den höheren Zentren benachbart bleiben. Man spricht von topografischen Projektionen; solche Projektionskarten gibt es für verschiedene Sinnesverarbeitungssysteme (visuell, auditorisch, olfaktorisch, etc.). Heißt dies, dass Bilder von der Außenwelt über das Auge bis zu höheren Zentren einfach immer nur abgebildet (im Sinne von »gespiegelt«) werden? Bald wurde einsichtig, dass dies keine hinreichende Erklärung der Lokalisation und Repräsentation von Bildwahrnehmung liefern könnte, denn egal, wie viele Spiegelebenen auch zwischengeschaltet wären, führt dies immer zum sogenannten »unendlichen Regress«, der Frage nach dem Betrachter des Betrachters, d.h. *wer – wo – was* nimmt das Bild schlussendlich »wahr«?

Immense Fortschritte der neurophysiologischen Forschung weisen uns hier einen ganz anderen Weg. Das Bild wird in unteren Ebenen – also von der Retina bis etwa Area 17 – Schritt für Schritt zerlegt (*divergente Verarbeitung*), um dann wieder *hierarchisch konvergent* in übergeordneten Zentren zusam-

23 Brocasches Zentrum.

24 Geniculatum laterale.

mengesetzt zu werden. Schon auf der Ebene der Netzhaut im Auge wird das Bild in Teile zerlegt. Die Retina ist im Dunkeln dauererregt und arbeitet mit umgekehrten Vorzeichen, so dass kleinste Lichtschwankungen extrem verstärkt werden können. Subklassen von Photorezeptoren werden von bestimmten Farben (mehr als 1 Mio. Farbnuancen können aufgelöst werden), andere bei sehr geringer Lichtintensität erregt. Dabei werden Kontraste verschärft, ähnliche Signale werden zusammengefasst, unähnliche weiter getrennt. In der *Retina* und im *Geniculatum* wird das Bild also mehr und mehr gefiltert, analysiert und dabei dissoziiert. *Einfache Zellen* reagieren besonders stark auf einfache Bildeigenschaften, wie etwa Punkte, Ecken, Kanten, Linien. In Area 17 sind es dann *einfache* und *komplexe* Zellen, die z.B. bewegte Linien erkennen. Die Felder 17 und 18 sind mit Bildeigenschaften wie Farben, Bewegung, Richtung, Disparität, etc. beschäftigt. Diese Teileigenschaften eines Bildes scheinen nun in noch höher liegenden Verschaltungsebenen (Area 19-20) auf *hyperkomplexe* Neuronen weitergeleitet zu werden.

Haben wir damit verstanden, wo der Betrachter-des-Betrachters, der kleine Homunculus sitzt? Diese Frage wurde häufig auch als die Suche nach den *Großmutterneuronen* betrachtet (soll heißen: gibt es für jedes mögliche Objekt der Außenwelt am Ende ein bestimmtes Neuron, welches genau dieses und nur dieses Objekt erkennt, z.B. deine Großmutter?). So überraschend es sein mag: es scheint sie wirklich zu geben, die *gnostischen Neurone*. Allerdings gibt es sie nicht allzu häufig, so dass sie zur Erklärung ganzer Bilder nicht ausreichen. Derzeit geht man eher von der Repräsentation von Bildern in sehr großen *Neuronen-Ensembles* aus,²⁵ die wohl über viele kortikale und auch subkortikale Regionen weit verteilt sein können. Nicht so sehr sequentiell-linear, sondern eher parallel-distributiv scheinen unsere Gehirne zu arbeiten. Oft wird der Vergleich mit Hologrammen herangezogen. Hierbei spielen nicht nur räumliche, sondern auch zeitliche Korrelationen zwischen Signalkaskaden eine Rolle. Ein weiterer offener Bereich im Verständnis der Hirnfunktionen betrifft die Neutralität des neuronalen Codes, d.h. übertragene Information und ihre Bedeutung sind streng zu unterscheiden. Denn alle neuronalen Signale, egal ob sie visuelle, auditorische oder andere Informationen vermitteln bzw. bearbeiten (Modalität des Reizes), sind immer von der gleichen elektrischen Natur. Übertragen werden also immer nur elektrische Signale. Bedeutung erhalten sie durch den Rezipienten, insbesondere das jeweilige Hirnareal mit seinen spezifischen Rezeptormolekülen und nachgeschalteter Molekularkaskaden. Dies hat J. Müller (1801-1858) als *Gesetz der spezifischen Sinnesenergien* formuliert, wobei seine Umschreibung des *semantischen Kontextes* für uns immer noch dubios bleibt wie zu seiner Zeit.

25 Engramme; Populationskodierung.

6. HIRN UND BEWUSSTSEIN

Können wir aus dem bisher Gesagten, aus der Kenntnis der Neuroentwicklungsbiologie, der Betrachtung von einfachen und komplexeren Nervensystemen sowie der Gehirnphysiologie Einsichten in das Thema des vorliegenden Buches gewinnen, können wir etwas zum Stand der Leib-Seele-Diskussion beitragen? Zumindest wurde anhand biologischer Forschung vielfach belegt, dass es einen engen Zusammenhang zwischen geistigen Tätigkeiten und Gehirnzuständen gibt. Man spricht in diesem Zusammenhang von der *mental-neuralen Parallelität*, soll heißen: einem bestimmten Gehirnzustand (elekt. oder auch physiol. Aktivität) entspricht ein ganz bestimmter mentaler Zustand. Mit modernen nicht-invasiven Bildgebungsverfahren kann eine erhöhte Hirnaktivität in ganz bestimmten Hirnarealen gemessen werden, wenn der Proband z.B. Rechenaufgaben löst, in anderen, wenn er sich mit einem Kreuzworträtsel beschäftigt, wieder in anderen, wenn er sich mit religiösen Themen befasst, etc..

Wo steht damit das Leib-Seele-Problem, das so alt ist wie der Mensch selbst? Es gibt wohl kaum ein anderes Thema aus dem Grenzbereich Naturwissenschaften-Philosophie, das wie dieses in den letzten Jahren Beachtung gefunden hat. Es geht dabei um das Verhältnis zwischen Geist und Gehirn, oder auch zwischen Körper und Geist (Leib-Seele), also letzten Endes um die Frage nach einer naturwissenschaftlichen Erklärung des Phänomens »Bewusstsein«. Hier sollen drei wesentliche Denkrichtungen, die diese Diskussion bestimmen, in aller Kürze gegeneinander abgegrenzt werden.²⁶

Traditionell am bedeutendsten war der Dualismus. Dualistische Weltbilder haben in vielerlei Spielarten die Ideengeschichte der Menschheit geprägt und getragen. Beim Dualismus geht man immer von einer Trennung von Leib und Seele aus, oft auch als *wesensmäßige Verschiedenheit* von Materie und Geist bezeichnet. Die meisten modernen, hauptsächlich von Naturwissenschaftlern propagierten Bewusstseins-Theorien lehnen den Dualismus strikt ab. Spätestens seit Mitte des 19. Jahrhunderts mit dem Siegeszug der Physik und nach der Entwicklung der Wissenschaften vom Leben, der Biologie, zu einer exakten Wissenschaft haben materialistische Ideen das gängige Weltbild nachhaltig verändert. So bieten fast alle derzeitigen Beiträge zur Bewusstseins-Diskussion materialistische Ansätze. Oft auch als Reduktionismus bezeichnet, findet man sie unter Namen wie Monismus, Identismus, Parallelismus; sie meinen aber immer wieder Ähnliches, nämlich dass der Geist ein Epiphänomen der Hirnaktivität sei. Demnach sind Hirn und

Geist nur zwei verschiedene Aspekte ein und derselben Sache, also der Materie. Viel Anklang finden derzeit die *Emergenztheorien* (emergere – auftauchen, erscheinen). Die Kernannahme ist dabei, dass der »Geist«, das »Bewusstsein« ein synergistisches Produkt der Aktivität von komplexen neuronalen Netzwerken ist. Die »Wahrnehmung« einer roten Rose erfolgt demnach auf dem langen Weg der Dekodierung und Neukomposition des Bildes über ausgedehnte, verteilte Netzwerke. Unser Bewusstsein der roten Rose wäre demnach ein *Epiphänomen*, das bei Aktivierung des »Rote-Rosen-Engramms« emergiert.

Zweifellos hat der immense Wissenszuwachs in den Neurowissenschaften wichtige neue Einblicke zu dieser ewigen Menschheitsfrage geliefert. Dennoch, wäre nur eine dieser Theorien zufriedenstellend, wäre das Thema »Bewusstsein« längst ad acta gelegt, so wie viele wissenschaftliche Fragen eben gelöst sind, ein für allemal. Offenbar haben viele Denker immer wieder ein ungutes Gefühl mit rein reduktionistischen Ansätzen, und deshalb bleibt das Thema aktuell. Mir geht es ebenso. Der Neurophysiologe J. Eccles war wohl der letzte renommierte Naturwissenschaftler, der mit seinem *interaktionistischen Dualismus* den Dualismus hochhalten wollte. Er ging davon aus, dass der Geist das Hirn steuert; nach ihm braucht und gebraucht der Geist das Hirn, um sich zu verwirklichen. Der Neurophysiologe und Philosoph G. Roth fasst die ablehnende Haltung gegenüber dem Dualismus wie folgt zusammen: »Ein Dualismus, sofern er von einer wesensmäßigen Verschiedenheit von Hirn und Geist ausgeht (und nur dann handelt es sich um einen echten Dualismus), ist nicht mit dem modernen naturwissenschaftlichen Denken vereinbar.«²⁷ R. Penrose versucht, das Bewusstseins-Problem durch Quantenprozesse in zellinternen Polymerstrukturen (*Mikrotubuli*) zu lösen. Allerdings sind seine Vorstellungen besonders schwer nachzuvollziehen, weil die Quantenmechanik für die Zellbiologie diffus bleibt.²⁸ Auch G. Roth will sich mit rein reduktionistischen Ansätzen nicht zufrieden geben. Er vertritt einen *nicht-reduktionistischen Physikalismus* und geht davon aus, dass das Bewusstsein (bzw. der Geist) eine Art physikalischen Zustand widerspiegelt, vergleichbar mit anderen physikalischen Erscheinungen, seien es elektromagnetische Wellen, Wärme, Schwerkraft, Mechanik, etc., denen ganz bestimmte Eigenschaften anhängen und durch diese charakterisiert sind. Mit *Physikalismus* meint er, dass alles in der Natur, und damit auch das Phänomen Bewusstsein, rein physikalischen Gesetzen unterliegt. Dass wir das Bewusstsein bisher nicht befriedigend fassen können, liegt nach ihm daran, dass wir die Physik möglicherweise noch nicht vollständig kennen, sie bleibt uns also epistemisch (nach bisherigen Erkennt-

26 Vgl. Roth (1994), Vollmer (1995).

27 Roth (1994).

28 Vgl. Penrose (1989).

nissen) verschlossen.²⁹ J. Eccles und K. Popper haben eine solche Haltung als *Schuldscheintheorie* bezeichnet. Und in der Tat, obwohl epistemische und ontologische Thesen (Materialismus vs. Dualismus) nicht vermischt werden sollten, bleibt mein derzeitiges Weltverständnis dennoch gleichermaßen unvollständig, wenn ich sage »einen Teil der Physik verstehe ich noch nicht« oder »den Seele-Anteil des Leib-Seele-Problems verstehe ich nicht«.

7. ... DOCH »QUALIA« QUÄLEN WEITER

Es mag zutreffen, dass alle genannten Theorien etwas für sich haben. So halte ich die Idee von der (physiologischen) Emergenz für grundlegend und wertvoll. Bedenkenswert erscheinen mir auch Vorstellungen des *Panpsychismus*³⁰, wonach jede einzelne Zelle in einem neuronalen Netz einen *protopsychischen* Kleinstbeitrag zum gesamten emergierenden Geist leistet (siehe oben: Einzelzelle – Mehrzelligkeit – Hirn). Für mich sind damit die Fragen nach dem Bewusstsein, nach dem Geist oder der Seele jedoch noch nicht beantwortet, und dies hat wohl mit einem Aspekt zu tun, den ich gerne als die »*Unerklärbarkeit des Bedeutungsinhalts*« anspreche (wobei der *qualitative* und nicht etwa der *semantische* Gehalt einer Sache gemeint ist), was von anderen Autoren wohl als *Qualia-Problem* bezeichnet wird.

Welche Art Antwort erhalten wir denn am Ende – nach all den ausführlichen Erläuterungen von der Sinnesphysiologie (siehe oben) – zur Frage: »Was ist das *Wesen* der Farbe Rot?« Oder noch allgemeiner ausgedrückt: Wie ist es *überhaupt möglich*, dass ich bewusste Erfahrungen, Wahrnehmungen haben kann? Muss ich sie denn haben, um biologisch funktionieren zu können? Oben wurde angedeutet, dass die meisten unserer Reaktionen eh' ohne unser Bewusstsein ablaufen. *Euglena* sieht die Welt und nimmt sie dennoch nicht wahr, warum muss ich als Mensch all das Elend dieser Welt sehen? Die Erfahrung, der Bedeutungsinhalt einer »roten Rose« ist nun mal ein anderer als der von »Mozarts Nachtmusik«, einer Migräne, oder von »Roquefort mit Rotwein«. Ist es aber nicht dies, was uns am Thema »Bewusstsein« am Ende wirklich interessiert? Diese Problematik kann mit einem Gedankenexperiment aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz (AI) vertieft werden: Sie bauen einen perfekten Roboter, dem Sie Augen, Ohren, Tastrezeptoren, rundum also Sensorik und Motorik perfekt einbauen. Sie programmieren ihn mit bester Software so, dass er Ihnen Rede und Antwort stehen kann. Dann versetzen Sie ihm einen heftigen Schlag. Er wird diesen natürlich registrieren und sofort

29 Die Physik ist offen; siehe auch: Gierer (1985, 225ff).

30 Vgl. Rensch (1968).

unter Protest sich melden: »Sie ungehobelter Flegel, hören Sie auf, mich zu prügeln, das tut mir nämlich verdammt weh!«, denn er ist ja bestens verdrahtet und programmiert. Nun, was glauben Sie, hat diese Maschine wirklich einen Schmerz verspürt? Es gibt AI-Leute, die dies prinzipiell für möglich halten. Mir erscheint dies als völlig ausgeschlossen. Warum? Weil dem Roboter der *Bedeutungsinhalt des Schmerzes* fehlt, es fehlen ihm die Qualia, oder, mit ganz banalen Worten: die Maschine ist und bleibt *leblos*. Wer sollte ihr denn das Leben einhauchen? Woher soll denn »Leben emergieren«? Es geht eben letztlich doch um das Wesen der Dinge, genau dieses ist die Sinnfrage, und sie bleibt nach ein paar Tausend Jahren Kulturgeschichte weiter offen.

8. AUSBLICK

Eine vertiefte Kenntnis der Evolution und der embryonalen Entwicklung von einfachen und komplexen Nervensystemen sowie der Struktur, insbesondere des menschlichen Gehirns ist notwendige Voraussetzung, um Hirnfunktionen bis hin zum Bewusstsein zu verstehen. Die Forschungen zur Physiologie des visuellen Systems haben uns um Quantensprünge in unserem Verständnis der Gehirnfunktionen weitergebracht; die Jahrhundertwissenschaft Neurobiologie wird weitere beeindruckende Fortschritte bringen. So ist abzusehen, dass man mit modernen zellbiologischen Methoden wohl bald auch komplexere Netzwerke (viele Tausend Zellen) vollständig markieren und ihre Entstehung verfolgen können. Die Bioinformatik kann uns helfen, molekulare wie auch neurophysiologische Netzwerke zu simulieren und ihre Regulation zu verstehen. Bildgebungsverfahren am lebenden Tier und Menschen werden viel Neues zum Verhältnis von Physiologie, Verhalten und Bewusstsein zutage fördern. Das Qualia-Problem wird jedoch bleiben. Es wird – mir unverständlich – von vielen schlicht übersehen. Diejenigen, die es sehen, meinen häufig, dass es ein Scheinproblem bzw. kein naturwissenschaftliches Problem sei. Sie wollen mit dem Begriff *wesensmäßig verschieden* nicht umgehen, um etwa die Farbe Rot von der Farbe Blau, Farben von Tönen, oder Geist vom Gehirn zu scheiden. Es mag tatsächlich sein, dass wir keine naturwissenschaftlichen Methoden haben, um solche Fragen anzugehen; in diesem Sinne kann man sie als *unwissenschaftlich* verwerfen. Das macht sie aber nicht weniger spannend, um sie dreht sich meiner Auffassung nach die *Urfrage* der Bewusstseinsdiskussion. Die Farbe Rot hat nun mal ein anderes Wesen, im Sinne von Bedeutungsinhalt, als die Farbe Blau. So, wie wir die Frage nach »Was ist Leben?« zwar immer besser beschreiben, aber wohl nie endgültig beantworten können, kommen wir auch mit der Teilfrage »Was ist Bewusstsein?« niemals zu einem befriedigenden Ende. Spätestens

an dieser Stelle sollte man sich wissenschaftlich begnügen und der Dinge harren, die vielleicht von physikalischer Seite noch kommen mögen. Zum quälenden Zeitvertreib empfiehlt sich derweil, die Qualia von Roquefort mit Rotwein zu verinnerlichen und dabei – warum nicht? – klassischen dualistischen Ideen nachsinnieren.

LITERATUR

- Campbell, N.A., 1998: *Biologie*, Berlin.
- Dudel, J.; Menzel, R.; Schmidt, R.F., 1996: *Neurowissenschaft*, Berlin.
- Eccles, J.C., 1994: *Wie das Selbst sein Gehirn steuert*, München.
- Gierer, A., 1985: *Die Physik, das Leben und die Seele*, München.
- Gilbert, S.F., 2000: *Developmental Biology*. 6th Edition, Sunderland.
- Layer, P.G. et al., 2002: Of layers and spheres: the reaggregate approach. In: *Trends Neurosci.*, 25, S. 131-134.
- Penrose, R., 1989: *The Emperor's New Mind*, Oxford.
- Rensch, B., 1968: *Biophilosophie auf erkenntnistheoretischer Grundlage*, Stuttgart.
- Roth, G., 1994: *Das Gehirn und seine Wirklichkeit*, Frankfurt.
- Vollmer, G., 1995: *Biophilosophie*, Stuttgart.

