



Wolf Singer

Bewußtsein, etwas „Neues, bis dahin Unerhörtes“

(Vortrag auf der Festveranstaltung anlässlich des 100. Todestages von Emil du Bois-Reymond (1818-1896) am 14. Dezember 1996 in Berlin)

In: Berichte und Abhandlungen / Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (vormals Preußische Akademie der Wissenschaften) ; 4.1997, S. 175-190

Persistent Identifier: [urn:nbn:de:kobv:b4-opus-29812](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:b4-opus-29812)

Die vorliegende Datei wird Ihnen von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften unter einer Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (cc by-nc-sa 4.0) Licence zur Verfügung gestellt.



Wolf Singer

Bewußtsein, etwas „Neues, bis dahin Unerhörtes“

(Vortrag auf der Festveranstaltung anlässlich des 100. Todestages von Emil du Bois-Reymond (1818–1896) am 14. Dezember 1996 in Berlin)

„Dies Neue, Unbegreifliche ist das Bewußtsein. Ich werde jetzt, wie ich glaube, in sehr zwingender Weise dartun, daß nicht alleine bei dem heutigen Stand unserer Kenntnis das Bewußtsein aus seinen materiellen Bedingungen nicht erklärbar ist, was wohl jeder zugibt, sondern auch, daß es der Natur der Dinge nach aus diesen Bedingungen nie erklärbar sein wird. [...] Welche denkbare Verbindung besteht zwischen bestimmten Bewegungen bestimmter Atome in meinem Gehirn einerseits, andererseits den für mich ursprünglichen, nicht weiter definierbaren, nicht wegzuleugnenden Tatsachen: ‘Ich fühle Schmerz, ich fühle Lust, fühle warm, fühle kalt; ich schmecke Süßes, rieche Rosenduft, höre Orgelton, sehe Rot’ und der ebenso unmittelbar daraus schließenden Gewißheit: ‘Also bin ich?’ [...] Es ist in keiner Weise einzusehen, wie aus ihrem (der Atome) Zusammenwirken Bewußtsein entstehen könnte. Sollte ihre Lagerungs- und Bewegungsweise ihnen nicht gleichgültig sein, so müßte man sie nach Art der Monaden schon einzeln mit Bewußtsein ausgestattet denken. Weder wäre damit das Bewußtsein überhaupt erklärt, noch für die Erklärung des einheitlichen Bewußtseins das Mindeste gewonnen.“ So Emil du Bois-Reymond in seinem Vortrag *Über Grenzen der Naturerkennntnis*, den er 1872 auf der Tagung der Naturforscher und Ärzte gehalten hat.

„En conséquence, les théories de l'évolution qui, en fonction des philosophies qui les inspirent, considèrent l'esprit comme émergeant des forces de la matière vivante ou comme un simple épiphénomène de cette matière sont incompatibles avec la vérité de l'homme. Elles sont d'ailleurs incapables de fonder la dignité de la personne.

Avec l'homme, nous nous trouvons donc devant une différence d'ordre ontologique, devant un saut ontologique, pourrait-on dire. Mais poser une telle discontinuité ontologique, n'est-ce pas aller à l'encontre de cette continuité physique qui semble être comme le fil conducteur des recherches sur l'évolution, et ceci dès le

plan de la physique et de la chimie? La considération de la méthode utilisée dans les divers ordres du savoir permet de mettre en accord deux points de vue qui sembleraient inconciliables. Les sciences de l'observation décrivent et mesurent avec toujours plus de précision les multiples manifestations de la vie et les inscrivent sur la ligne du temps. Le moment du passage au spirituel n'est pas objet d'une observation de ce type, qui peut néanmoins déceler, au niveau expérimental, une série de signes très précieux de la spécificité de l'être humain. Mais l'expérience du savoir métaphysique, de la conscience de soi et de sa réflexivité, celle de la conscience morale, celle de la liberté, ou encore l'expérience esthétique et religieuse, sont du ressort de l'analyse et de la réflexion philosophiques, alors que la théologie en dégage le sens ultime selon des desseins du Créateur.“ So Papst Johannes Paul II. am 22. Oktober 1996 in seiner Botschaft an die Päpstliche Akademie der Wissenschaften, in der er einräumt, daß es sich bei der Evolutionstheorie um mehr als nur eine Hypothese handelt. Konvergenz also bei der Beurteilung der Möglichkeit, den Ursprung von Leben und die Entstehung der Arten einschließlich des Menschen im Rahmen naturwissenschaftlicher Beschreibungssysteme darzustellen. Nahezu gleichlautende Zweifel jedoch im Hinblick auf die Möglichkeit einer reduktionistischen Erklärung mentaler Phänomene wie subjektive Empfindungen, Intentionalität und die Erfahrung, ein freies autonomes Selbst zu sein, das zwar in einem biologisch begründeten Organismus residiert, von diesem aber ontologisch verschieden ist. Diese Phänomene, so die über Jahrhunderte unveränderte Position, verschlossen sich einer reduktionistischen Erklärung im Rahmen naturwissenschaftlicher Beschreibungssysteme. Je überzeugender die Beweise dafür werden, daß wir unser Dasein und Sosein einem kontinuierlichen evolutionären Prozeß verdanken, in dessen Verlauf es keinen Hinweis auf ontologische Sprünge gibt, um so zwingender wird die Notwendigkeit, sich erneut mit dem Phänomen der Emergenz mentaler Qualitäten auseinanderzusetzen. Da die Phänomene, die wir gemeinhin unter Bewußtsein subsumieren, unzweifelhaft auf kognitiven Funktionen unserer Gehirne beruhen, möchte ich das Phänomen des Bewußtseins im Lichte dessen erneut kommentieren, was wir heute über die Evolution und unsere Gehirne zu wissen glauben.

Was hat sich zugetragen? Die Evolution von Leben begann mit der Aggregation der elementaren Bausteine von Materie zu komplexen Molekülen, deren Eigenschaft es war, ihresgleichen über autokatalytische Prozesse zu replizieren. Zu Beginn wurden diese Prozesse der Selbstreproduktion wohl ausschließlich von Ribonukleinsäure-Molekülen (RNS) getragen. Durch die Synthese von enzymatisch wirkenden Proteinen ließ sich die Effektivität dieser reproduktiven Vorgänge steigern, und schließlich kam es zur Erfindung von Arbeitsteilung im Reproduktionsprozeß. Desoxyribonucleinsäure-Moleküle (DNS), die späteren Gene, übernahmen die Speicherung der zur Reproduktion notwendigen Information, die

bislang allein zuständige RNS spezialisierte sich auf die Informationsvermittlung. Ihr fiel es zu, die in den DNS-Sequenzen gespeicherte Information abzulesen und die Synthese von Makromolekülen zu veranlassen, die ihrerseits den Reproduktionsvorgang begünstigen und schließlich den Phenotyp der reproduktionsfähigen Makrostrukturen bestimmen. Irgendwann kam es dann zur Erfindung von Zellmembranen, die diese Reproduktionsmaschinerie umschlossen, die ersten autonomen einzelligen Organismen waren geboren. Schon bald statteten sich diese mit primitiven Sensoren an der Oberfläche aus, die über Kaskaden interagierender Makromoleküle an Effektoren gekoppelt wurden. Die einzelligen Organismen erlangten die Fähigkeit, auf Reize zu reagieren. Die Erfindung kontraktile Moleküle verhalf diesen frühen Organismen zur Beweglichkeit und eröffnete ihnen die Option, die zur Strukturhaltung und Reproduktion erforderlichen Energiequellen aktiv aufzusuchen und Bedingungen zu meiden, die ihre Integrität gefährden könnten. Ein erster Schritt zur Autonomie war getan. Offensichtlich erwies sich das Prinzip der Arbeitsteilung als zweckmäßig. Es führte zur Aggregation von Zellen zu vielzelligen Organismen, deren Komponenten sich spezialisierten und unterschiedliche Aufgaben übernahmen. Ein Teil der Organismen bezahlte die potentiellen Vorteile der Vielzelligkeit mit der Preisgabe ihrer Motilität. Die bis dahin verfügbaren Systeme zur Informationsweiterleitung und -verarbeitung reichten nicht aus, um die Koordinierungsprobleme zu lösen, die vielzellige Organismen bewältigen müssen, um zielgerichtete Bewegungen auszuführen. Wie der evolutionäre Erfolg der Pflanzen beweist, können jedoch die Vorteile der arbeitsteiligen Vielzelligkeit die Nachteile der Unbeweglichkeit durchaus kompensieren. Andere Organismen vermochten die Vorteile der Vielzelligkeit mit denen der Beweglichkeit zu vereinen. Sie lösten das Problem der effektiven Informationsweiterleitung und -verarbeitung durch die Entwicklung von Nervenzellen. Es war dies der entscheidende Durchbruch zur Evolution zunehmend komplexer und autonomer Organismen. Nervenzellen erschlossen die Möglichkeit, Signale aus der Umwelt in beliebiger Weise zu rekombinieren, im Kontext der Bedürfnisse des Organismus zu bewerten und durch Verhaltensmodifikation in flexibler Weise zu beantworten. Durch die Erfindung von Nervenzellen ließen sich die Vorteile von Spezialisierung und Arbeitsteilung voll ausschöpfen. Ohne ein versatiles System zur Informationsverarbeitung führt Spezialisierung in der Regel zur Verminderung von Flexibilität. Das Umgekehrte gilt, wenn es gelingt, spezialisierte Funktionen auf effektive Weise zu kombinieren und zu koordinieren. Entsprechend ging während der nun folgenden Evolution die Differenzierung von Sensoren und Effektoren mit einer ständigen Verbesserung der informationsverarbeitenden Strukturen einher. Im wesentlichen beruhten diese Verbesserungen auf der Optimierung von Strategien zur Bewältigung kombinatorischer Probleme, auf der Vermehrung von Optionen, die Ergebnisse dieser kombinatorischen Operationen

zu speichern und dieses so erworbene „Wissen“ über die Welt für die Steuerung von Verhaltensreaktionen verfügbar zu halten. Es kam zur Herausbildung von Gehirnen, zur zentralen Verwaltung von Information. Obgleich die strukturellen, biochemischen und damit auch die physiologischen Eigenschaften von Nervenzellen seit ihrem ersten Auftreten in Molusken bis hin zum menschlichen Gehirn über alle Phyla hinweg auf frappierende Weise nahezu unverändert geblieben sind, gab es bei der Entwicklung von zentralen Nervensystemen offenbar verschiedene Optionen. Die von den Wirbeltieren eingeschlagene Strategie erwies sich offenbar als die ausbaufähigste. Bei ihnen, und hier wiederum bei den warmblütigen und insbesondere bei den Säugetieren, erreichten die Gehirne ein Höchstmaß an Differenziertheit und Komplexität. Dies wiederum scheint vorwiegend auf der Entwicklung einer ganz bestimmten Hirnstruktur zu beruhen, der Großhirnrinde. Sie ist die letzte große Erfindung der Evolution. Seit ihrem ersten Auftreten bei niederen Wirbeltieren, wie etwa der Schildkröte, wurden keine neuen Hirnstrukturen mehr entwickelt. Die hochdifferenzierten Gehirne von Primaten und Menschen unterscheiden sich von den weniger komplexen Wirbeltiergehirnen im wesentlichen nur durch die dramatische Zunahme des Volumens der Großhirnrinde. Folglich müssen all jene Leistungen, die uns von Primaten, und diese wiederum von Tieren mit einfacher strukturierten Gehirnen unterscheiden, der Großhirnrinde zugeschrieben werden.

Die Frage nach der biologischen Bedingt- und Besonderheit des Menschseins ist somit eng verbunden mit der Frage nach den Funktionen der Großhirnrinde. Wie zu zeigen sein wird, ist diese Struktur in ganz besonderem Maße geeignet, kombinatorische Probleme zu lösen, die Ergebnisse in universellen Datenformaten zu kodieren und zu speichern und dieses Wissen in flexibler Weise zur Steuerung von Verhalten umzusetzen. Wie sehr die Entwicklung von Großhirnrindenfunktionen mit der Emergenz mentaler, spezifisch menschlicher Qualitäten verbunden ist, läßt sich nicht nur aus der Evolution unserer Gehirne ableiten, sondern auch aus der Individualentwicklung. Die Entwicklung des menschlichen Gehirns ist zum Zeitpunkt der Geburt nicht abgeschlossen, sondern zieht sich bis zur Pubertät hin, wobei die meisten dieser späten Entwicklungsschritte auf der Ausreifung von Großhirnrindenfunktionen beruhen. Von besonderem Interesse ist im gegenwärtigen Kontext, daß zwischen diesen protrahierten Entwicklungsprozessen und der Expression mentaler Leistungen eine faszinierend enge Korrelation besteht. So ist zum Beispiel die Fähigkeit, Reaktionen auf Reize zurückzustellen und erst nach Durchspielen von Modellen möglicher Folgen zuzulassen, unmittelbar von der Ausreifung gewisser präfrontaler Rindenregionen abhängig. Ein ähnlich enger Zusammenhang besteht zwischen dem Erwerb der Fähigkeit, invertierte Frage-sätze zu bilden, und der Ausreifung sprachkompetenter Rindenareale.

Bereits auf der Basis des heutigen Wissens läßt sich nahezu lückenlos nachvollziehen, wie Umweltreize in neuronale Aktivität umgesetzt und zu invarianten Repräsentationen, den Grundlagen aller kognitiven Leistungen, verarbeitet werden. Auch ist nachvollziehbar, wie Entscheidungsprozesse organisiert und Handlungsabfolgen programmiert werden. Eine Fülle von Teilfunktionen sind inzwischen durch neuronale Wechselwirkungen vollständig erklärbar. Zwar gibt es noch zahlreiche ungelöste Probleme hinsichtlich der dynamischen Koordination und Bindung dieser Teilfunktionen. Im Prinzip aber, so scheint es, sollte es möglich sein, alle Hirnleistungen, einschließlich der höchsten mentalen und psychischen Funktionen, auf neuronale Wechselwirkungen zurückzuführen, die den bisher bekannten Gesetzmäßigkeiten folgen.

So dies zutrifft, muß gelten, daß alleine die Vermehrung der Großhirnrinde dafür verantwortlich gemacht werden muß, daß wir nicht nur Signale aus der Umwelt und aus unserem Körper verarbeiten, wahrnehmen, erinnern und in Aktionen umsetzen können, sondern daß wir zudem fähig sind, uns dieser Vorgänge gewahr zu werden, ja mehr noch, daß wir die Gabe haben, mentale Modelle von Vorgängen in je anderen Gehirnen zu erstellen, daß wir in Diskurse eintreten können der Art: „ich weiß, daß Du weißt, daß ich fühle“ oder „ich weiß, daß Du weißt, daß ich meiner bewußt bin“. Und dennoch legt unsere Intuition nahe, daß zwischen den einfachen Hirnleistungen, die zu angepaßten Reaktionen befähigen, und diesen mentalen Prozessen qualitative Unterschiede bestehen, die durch eine lediglich quantitative Vermehrung von Hirnrinde alleine nicht zu erklären sind, daß die mentalen Phänomene, die du Bois-Reymond unter dem Begriff Bewußtsein subsumiert, einen anderen ontologischen Status beanspruchen als all jene Hirnfunktionen, für deren reduktionistische Erklärung wir keine Schwierigkeiten antizipieren.

Ich werde im folgenden die Position verteidigen, daß die mentalen Phänomene, die du Bois-Reymond mit Bewußtsein umreißt, in der Tat einer anderen ontologischen Kategorie zugeschrieben werden müssen als die unproblematisch erscheinenden Hirnleistungen wie Reizverarbeitung, Speicherung, Wahrnehmung und Verhaltenssteuerung, daß Bewußtsein aber dennoch als Phänomen verstanden werden kann, das auf der Basis von Hirnfunktionen entsteht, die im Rahmen neurobiologischer Beschreibungssysteme erklärt werden können. Ich werde versuchen zu zeigen, daß es möglich ist, mentale Phänomene als Konsequenz kontinuierlicher evolutionärer und ontogenetischer Prozesse zu verstehen, und daß das Auftreten qualitativer Sprünge alleine noch kein Grund ist, der Versuchung nachzugeben, einen dualistischen Standpunkt einzunehmen.

Am Beispiel der Evolution der Großhirnrinde läßt sich nachvollziehen, wie durch Iteration der immer gleichen Prozesse neue Qualitäten entstehen können. Die während der Evolution von Primaten- und Menschengehirnen hinzugekommenen

neuen Areale der Großhirnrinde scheinen mit den bereits vorhandenen so verbunden zu sein wie letztere mit den Sinnesorganen. Da sich die „alten“ und „neuen“ Rindenareale strukturell gleichen und somit davon ausgegangen werden kann, daß sie die gleichen Basisoperationen ausführen, muß gelten, daß die neu hinzugekommenen Areale die Verarbeitungsergebnisse der bereits vorhandenen in genau der gleichen Weise behandeln wie diese die Signale der Sinnesorgane. Die neu hinzugekommenen Areale nehmen gewissermaßen die Funktion eines inneren Auges wahr. Sie können dies, ohne weiterer eigener Sinnesorgane zu bedürfen, weil die zu verarbeitenden Signale bereits in der Sprache der Großhirnrinde kodiert sind. Die neu hinzugekommenen Areale brauchen lediglich mit den bereits vorhandenen verbunden zu werden, um deren Verarbeitungsergebnisse erneut zum Gegenstand eines kognitiven Prozesses zu machen. Die hirnternen Prozesse, die zu primären Wahrnehmungsleistungen befähigen, werden auf diese Weise selbst zum Gegenstand weiterer kognitiver Prozesse. Die Iteration von im Prinzip gleichartigen Verarbeitungs- und Repräsentationsprozessen genügt, um kognitive Leistungen höherer Ordnung hervorzubringen, Leistungen, die zur reflektiven Analyse und Repräsentation hirnterner Prozesse befähigen. Gehirne, die diese Organisationsstufe aufweisen, sind in der Lage, über die in ihnen ablaufenden Verarbeitungsprozesse Protokoll zu führen. Wenn nun, was der Fall ist, diese kognitiven Strukturen höherer Ordnung ihrerseits Zugang zu Effektor-systemen haben, können sich Gehirne über Aktionen des sie beherbergenden Organismus, also Gesten, Taten, und bei Menschen schließlich durch Sprache, darüber austauschen, was in ihnen vorgeht. Sie können dem je anderen Gehirn mitteilen, welche Wahrnehmungen sie haben, wie sie diese emotional bewerten und in welcher Verhaltensdisposition sie sich befinden. Mein Vorschlag ist nun, daß durch, und erst durch diesen reziproken Abbildungsprozeß, durch diesen Dialog zwischen Gehirnen, die zusätzliche Erfahrung vermittelt wird, Individualität zu besitzen, ein mit Intentionalität ausgestatteter Agent zu sein; ein Wesen, das zu subjektiven Empfindungen fähig ist, entscheiden kann, Bewußtsein hat: Bewußtsein als Ergebnis der Reflexion im je anderen.

Bewußtsein in dem Sinne, in dem wir Menschen es verstehen und in dem es du Bois-Reymond zum Problem wurde, wäre somit ein Phänomen, das nicht mehr als emergente Qualität eines einzelnen Gehirns anzusehen ist, sondern als Phänomen, das Eigenschaften hat, die nur durch die Wechselwirkung mit anderen Gehirnen entstehen können. Damit aber erlangt Bewußtsein den ontologischen Status einer sozialen Realität, es erhält eine interpersonelle Konnotation. Und mehr noch, weil die am Dialog mit dem werdenden Gehirn partizipierenden Bezugspersonen ihrerseits hinsichtlich ihrer kognitiven Strukturen stark von kulturellen Einflüssen geprägt sind, erhält Bewußtsein eine zusätzliche historische Dimension. Bewußtsein, das Sichgewahrsein seiner selbst, wird in dieser Be-

trachungsweise zu einem Produkt nicht nur der biologischen, sondern auch der kulturellen Evolution. Daraus folgt, daß unsere spezifische Art, uns zu erfahren, uns unseres Selbst bewußt zu sein, kulturspezifische Merkmale aufweisen muß. Unsere Icherfahrung ist deshalb mit hoher Wahrscheinlichkeit verschieden von der unserer Vorfahren oder Angehöriger anderer Kulturkreise.

Diese Sichtweise macht deutlich, warum wir so große Schwierigkeiten haben. „Bewußtsein“, die Erfahrung von Qualia, von subjektiven Empfindungen, innerhalb neurobiologischer Beschreibungssysteme einer reduktionistischen Erklärung zuzuführen, wie uns dies ohne Mühe für primäre sensorische Prozesse oder für die Koordination von Verhaltensreaktionen gelingt. Der Grund ist, daß Phänomene, die erst durch interzerebralen Diskurs entstehen, eine interpersonelle und damit soziale Dimension haben und sich somit einer Erklärung innerhalb von Beschreibungssystemen entziehen, die sich, wie die Neurobiologie, definitionsgemäß ausschließlich mit Prozessen innerhalb eines einzelnen Gehirns befassen. Dies, so mein Vorschlag, ist auch einer der Gründe, warum wir bestimmte Aspekte des Bewußtseins als immaterielle, mentale oder geistige Phänomene erleben, welche außerhalb der Klasse jener Phänomene zu liegen scheinen, die mit naturwissenschaftlichen Verfahren analysiert und erklärt werden können.

Ein weiterer und vielleicht der wichtigste Grund für die scheinbar unerklärliche, unfaßbare Qualität von bewußtem Erleben seiner selbst – der Empfindung, ein immaterieller Beobachter seiner selbst zu sein – ist der Umstand, daß der Dialog, durch welchen sich die Erfahrung seiner selbst vollzieht, durch den sich das Selbst konstituiert und Bewußtsein entsteht – daß dieser Dialog sich im dunkeln nicht erinnerbarer früher Kindheit vollzieht. Wir fallen einem Zirkel anheim, weil bewußte Erinnerung offensichtlich erst dann einsetzt, wenn sich das Bewußtsein seiner selbst bereits konstituiert hat. Dadurch entbehrt Bewußtsein jeder Kausation, es ist immer schon, weil die Erinnerung an sein Werden fehlt. In dieser kindlichen Amnesie, so mein Vorschlag, liegt einer der bedeutendsten Gründe für die als geheimnisvoll oder transzendental erfahrenen Qualitäten von Bewußtsein und damit für die Attraktion dualistischer Positionen. Ähnliche Qualitäten kommen auch dem impliziten, in der biologischen Evolution erworbenen Wissen zu, das in der genetisch vorgegebenen Architektur unserer Gehirne residiert, und dem Wissen, das über kollektive Erfahrung während der kulturellen Evolution erworben wurde und über Erziehung vermittelt wird. An den Ursprung dieses Wissens haben wir keine Erinnerung, da sein Erwerb nicht von bewußter Reflexion begleitet wurde. Vielleicht liegt hier der Grund, warum wir auch die Quellen dieses Wissens transzendieren, als nicht von dieser Welt verstehen, und Götter und Mythen bemühen.

Doch damit genug der Spekulationen. Ich hoffe, es ist mir gelungen aufzuzeigen, wo die Schwierigkeiten liegen und warum die Neurobiologie alleine überfordert

ist bei der Erklärung von Bewußtsein. Ich hoffe aber auch, daß es mir gelungen ist zu zeigen, daß keine dualistischen oder mystischen Positionen bemüht werden müssen, um dem Phänomen Bewußtsein gerechtzuwerden. Was Not tut, ist eine Weitung des wissenschaftlichen Ansatzes, der Versuch, die Grenzen bisheriger Beschreibungssysteme zu überschreiten und diese ineinander überzuführen. Es gibt keinen einsichtigen Grund, warum Beschreibungssysteme, die sich mit der Erklärung von Hirnleistungen, und solche, die sich mit den Produkten kollektiver Hirnleistungen befassen, nicht ineinander übergeführt werden können. Schließlich sind die Forschungsgegenstände der traditionellen Geisteswissenschaften, aber auch die der kulturanthropologischen, kulturhistorischen und psychologischen Forschung ausschließlich Erzeugnisse menschlicher Gehirne. Die von diesen Disziplinen bearbeiteten Phänomene sind nichts anderes als die Produkte jener kollektiven Hirnleistungen, die der kulturellen Evolution zugrunde liegen. Somit muß es möglich sein, die Beschreibungssysteme, die Hirnfunktionen auf Wechselwirkungen materieller Komponenten zurückführen, an Beschreibungssysteme anzunähern, die sich mit den Produkten eben jener Hirnfunktionen befassen, Produkten, die aus der Wechselwirkung interagierender Gehirne entstehen. Es werden dann die Begriffe aus der einen Sprache auf die aus der je anderen verweisen. Wenn dies geleistet ist, wird es eine Veränderung unserer Wahrnehmung von Wirklichkeit bewirkt haben. Es wird dann auch keine emotionalen Zwänge zur Verteidigung dualistischer Positionen mehr geben. Das Leib-Seele-Problem wird dann anderen, neuen Problemen weichen. Voraussetzung dafür ist aber, daß die Kulturwissenschaften ihre Zielsetzung erweitern und dem bisherigen Diskurs einen kulturanthropologischen Ansatz hinzufügen. So steht zu erwarten, daß sich in absehbarer Zeit neue kulturwissenschaftliche Disziplinen herausbilden, die Kultur als emergentes Phänomen mit evolutionärer Dynamik verstehen und sich bei der Erforschung kultureller Aktivitäten und ihrer Erzeugnisse auf das Wissen stützen, das inzwischen über die biologischen und kulturellen Bedingtheiten mentaler Prozesse erarbeitet wurde. Sollten die traditionellen geisteswissenschaftlichen Disziplinen sich als unfähig erweisen, diesen Paradigmenwechsel zu vollziehen, dann muß damit gerechnet werden, daß dieses attraktive Forschungsfeld „von unten herauf“ besetzt wird. Anzeichen dafür, daß Neuro- und Kognitionswissenschaften in traditionell von Geisteswissenschaften verwaltete Gebiete eindringen, mehren sich. Da, wer sich anschickt, Grenzen zu überschreiten, in den neuen Territorien gemeinhin zunächst zu dilettieren pflegt, sollte Sorge getragen werden, die Neuankömmlinge dennoch wohlwollend aufzunehmen und die Gastgeschenke anzunehmen.

Doch lassen Sie mich nun einige Fakten anführen, um meine Hypothese zu stützen. Dies erfordert einige detailliertere Ausführungen über die Organisation der Großhirnrinde, jener Struktur, die für alle höheren kognitiven Leistungen verantwort-

lich ist, also für die Fähigkeit wahrzunehmen, zu erinnern, zu empfinden und zu bewerten, für die Fähigkeit, Handlungen zu beschließen und zu programmieren, sich dieser Leistungen gewahrzuwerden und anderen darüber zu berichten. Wie verhält es sich also mit dem Postulat, die Großhirnrinde führte immer die gleichen Operationen aus, um diese vielfältigen Funktionen zu erschließen? Untersuchungen der Feinstruktur der Großhirnrinde haben gezeigt, daß sie nach immer gleichen Organisationsprinzipien aufgebaut ist, gleichgültig, ob es sich um Rindenbezirke handelt, die mit der Verarbeitung sensorischer Signale oder der Ausarbeitung motorischer Programme befaßt sind. Die numerische Verteilung der verschiedenen Zelltypen, deren topologische Anordnung in distinkten Schichten, und die Architektur der Verbindungen zwischen den Nervenzellen sind über die verschiedenen Areale hinweg nahezu identisch. Da das Programm für Hirnfunktionen durch die funktionelle Architektur der Verknüpfungen zwischen Nervenzellen festgelegt wird, folgt aus dieser anatomischen Gleichförmigkeit, daß die Großhirnrinde mit großer Wahrscheinlichkeit immer die gleichen Rechenoperationen durchführt. Auch das zweite Postulat, daß die höheren kognitiven Leistungen durch Iteration immer gleicher Verarbeitungsschritte realisiert werden, scheint zuzutreffen. Die Analyse der Eingangsverbindungen phylogenetisch alter und neu hinzugekommener Großhirnrindenareale zeigt, daß letztere mit ersteren so verbunden sind wie diese mit den Sinnesorganen. Die neu hinzugekommenen Areale erhalten ihre Eingangsaktivität hauptsächlich von den stammesgeschichtlich älteren Hirnrindenarealen; sie schauen auf die alten wie diese auf die Welt. Trotz ihrer indirekten Verbindung mit dem Sensorium haben sich diese neu hinzugekommenen Hirnrindenareale aber fast ausnahmslos direkten Zugriff auf motorische Effektorsysteme erschlossen.

Unausweichlich wird nun die Frage nach den besonderen Verarbeitungsleistungen, die in der Hirnrinde erbracht werden, die Frage, warum diese Struktur so außerordentlich erfolgreich war und zum Hauptträger der rezenten Evolution wurde. Es ist hier nicht der Ort, in eine ausführliche Diskussion unseres Wissens über die Funktion der Hirnrinde einzutreten. Ich möchte jedoch einige grundlegende Organisationsprinzipien vorstellen und dabei auch auf bislang ungelöste Probleme verweisen. Ich werde dies am Beispiel von Hirnrindenarealen versuchen, die sich mit der Bearbeitung visueller Information befassen, weil im Bereich visueller Funktionen die umfassendsten Meßergebnisse vorliegen und die Theoriebildung am weitesten fortgeschritten ist. Ich möchte jedoch betonen, daß die dort gefundenen Organisationsprinzipien auf die anderen Hirnrindenbereiche generalisiert werden können.

Eine der zentralen Fragen ist, wie in der Großhirnrinde die Vielzahl der sich ständig wandelnden Sinnessignale mit erinnertem Vorwissen verbunden werden. Unserer Intuition folgend neigen wir zu der Annahme, daß es im Gehirn ein

Zentrum geben müsse, in dem die Signale der verschiedenen Sinnesorgane konvergieren, mit gespeicherten Inhalten verglichen und nach erfolgter Deutung in Handlungsentwürfe umgesetzt werden. Naturgemäß wäre dieses Konvergenzzentrum auch der Ort, wo Entscheidungen gefällt werden und wo das Bewußtsein residiert. Die Ergebnisse neurobiologischer Nachforschungen haben nun gezeigt, daß die plausible Annahme eines Konvergenzzentrums, eines Cartesianischen Theaters mit einem singulären Zuschauer, in dramatischer Weise falsch ist.

Eine der Hauptfunktionen der Großhirnrinde scheint darin zu bestehen, nach konsistenten Beziehungen zwischen einlaufenden Signalen zu suchen und häufig auftretende Relationen durch Aktivität von Nervenzellen zu repräsentieren, die selektiv auf ganz bestimmte Konstellationen von Eingangssignalen ansprechen. Die Annahme ist, daß eine mehrstufige Wiederholung dieses gleichen Vorgangs schließlich zu abstrakten Beschreibungen konsistenter Kombinationen von elementaren Merkmalen führt, von Konstellationen, wie sie für individuelle perzeptuelle Objekte charakteristisch sind. Weil die Zahl der möglichen Merkmalskonstellationen astronomisch hoch ist, läßt sich voraussagen, daß die in der Hirnrinde realisierten Verarbeitungsalgorithmen darauf spezialisiert sein müssen, kombinatorische Probleme zu lösen.

Im Gehirn von Primaten befassen sich mehr als 30 verschiedene Areale der Großhirnrinde mit der Verarbeitung visueller Information. Die primäre Sehrinde verteilt ihre Verarbeitungsergebnisse parallel an eine Vielzahl eng miteinander vernetzter Hirnrindenregionen, wobei jedes dieser Areale jeweils nur einen Teilaspekt der Sehwelt bearbeitet. Zu diesen zählen z. B. die Lokalisation und Bewegung von Objekten, deren räumliche Beziehung zueinander, Form- und Texturmerkmale, die Farbe und schließlich bestimmte, stereotype Kombinationen dieser Merkmale.

Beim Auftauchen eines Gegenstandes im Gesichtsfeld werden alle diese Areale nahezu gleichzeitig aktiviert, treten miteinander in Wechselwirkung, tauschen ihre Verarbeitungsergebnisse aus und senden die Resultate ihrer Ermittlungen in ebenso verteilter Weise an eine Vielzahl weiterer Hirnrindenareale, die sich mit der Analyse von Signalen anderer Sinnesmodalitäten oder mit der Vorbereitung motorischer Aktionen befassen. Das postulierte Konvergenzzentrum, in dem die Ergebnisse dieser vielfältigen, parallel ablaufenden Analyseprozesse zusammengefaßt und interpretiert werden könnten, existiert nicht.

Dies wirft die Frage auf, wie trotz dieser distributiven Organisation kohärente Repräsentationen aufgebaut und wie Entscheidungen getroffen werden können, wie eine einheitliche Interpretation der umgebenden Welt und aus ihr abgeleitete, koordinierte Verhaltensstrategien möglich werden. Diese, als „Bindungsproblem“ angesprochene Frage nach der Koordination zentralnervöser Prozesse wurde in den letzten Jahren als eine der großen Herausforderungen an die Hirnforschung

erkannt. Die Analyse von Verarbeitungsprozessen innerhalb einer Modalität zeigt, daß Bindungsprobleme mit ganz ähnlicher Struktur schon bei scheinbar einfachen sensorischen Funktionen auftreten. Es besteht also die begründete Hoffnung, daß sich die Bindungsmechanismen auf peripheren Verarbeitungsebenen aufklären und die Lösungen sich dann auf höhere Funktionen generalisieren lassen.

Kognitive Systeme müssen in der Lage sein, komplexe Anordnungen von Merkmalen zu distinkten, perzeptuellen Objekten zu gruppieren. Im visuellen System sprechen wir von Szenensegmentierung beziehungsweise perzeptuellem Gruppieren. Visuelle Objekte werden erst dann als solche identifizierbar, wenn es dem Sehsystem gelungen ist, die verschiedenen Konturen, die in einer Szene oder einem Bild enthalten sind, so zu gruppieren, daß all jene, die ein bestimmtes Objekt ausmachen, als zusammengehörig gesehen werden. Erst wenn diese Gruppierungsversuche erfolgreich beendet sind, kann damit begonnen werden, die segmentierten Objekte zu identifizieren. Die Segmentierung geht dem Erkennen voraus und muß deshalb nach Gesetzen erfolgen, die objektunabhängig sind. Was schließlich wahrgenommen wird, hängt also in kritischer Weise davon ab, wie und nach welchen Kriterien das Sehsystem die Gruppierung von Merkmalen zu kohärenten Figuren vornimmt und welche Lösungen dieser vorbewußt ablaufende Gruppierungsprozeß anbietet. Es ist dies ein Beispiel von vielen für die konstruktive Leistung unserer kognitiven Systeme.

Fragt man nach den neuronalen Prozessen, die dieser Segmentierungsleistung zugrunde liegen, wird deutlich, daß auch hier Bindungsprobleme gelöst werden müssen, die in ihrer Struktur den oben angesprochenen ähneln. Das Sehsystem muß die Antworten von Nervenzellen, die auf die Konturlinien der gleichen Figur reagieren, miteinander verbinden und so kennzeichnen, daß nachfolgende Verarbeitungsstrukturen diese gebundenen Antworten gemeinsam bearbeiten und als zusammengehörig interpretieren können. Dieser Bindungsmechanismus muß ein hohes Maß an Flexibilität aufweisen und in rascher Folge verschiedene Interpretationsweisen realisieren können; er muß dynamisch sein.

Die klassischen Vorschläge zur Lösung dieses Bindungsproblems orientieren sich an hierarchischen Verarbeitungsstrukturen, in denen Bindung durch Konvergenz erfolgt. Die Annahme ist, daß Signale, die gebunden werden sollen, über konvergierende Nervenbahnen in einzelnen, auf die Gruppierung spezifischer Signalkombinationen spezialisierten Bindungsneuronen zusammengeführt werden.

Diese Strategie zur Lösung des Bindungsproblems ist aber nur dann anwendbar, wenn wenige und stereotype Muster analysiert und repräsentiert werden müssen. Sie taugt nicht zur Bewältigung von Bindungsproblemen im allgemeinen. Der Grund ist, daß für jedes erkennbare Objekt und alle seine Erscheinungsformen jeweils mindestens ein Bindungsneuron erforderlich wäre, das selektiv mit dem

entsprechenden Satz von Merkmalsdetektoren verknüpft sein müßte. Offensichtlich erfordert diese Strategie zur Lösung des Bindungsproblems eine riesige Zahl von Bindungsneuronen. Ferner benötigte man eine beträchtliche Menge noch nicht festgelegter Bindungsneuronen, um neue Objekte repräsentieren zu können. Irgendwo im Gehirn müßte ein riesiges Areal existieren, in dem, neben einer Vielzahl hochspezialisierter, spezifische Objekte repräsentierender Neurone gleichermaßen viele, völlig unselektive Nervenzellen implementiert sind. Solche Areale wurden bislang nicht gefunden, und nachdem die Funktionen aller größeren Areale der Großhirnrinde bekannt sind, kann die Existenz solcher Regionen mit großer Verlässlichkeit ausgeschlossen werden.

Alle intuitiv plausiblen Lösungen des Bindungsproblems erweisen sich also bei genauerer Betrachtung als untauglich, und es stellt sich die Frage nach Alternativen. Die Hirnrinde scheint sich zweier komplementärer Strategien zu bedienen, um Bindungsprobleme zu lösen, und in dieser Komplementarität liegt vermutlich ihr beispielloser evolutionärer Erfolg. Einerseits werden Beziehungen zwischen Merkmalen tatsächlich durch Konvergenz auf Bindungsneuronen definiert und durch die selektiven Antworten dieser Neuronen repräsentiert. Diese Strategie beschränkt sich jedoch auf die Repräsentation relativ elementarer Merkmalskonstellationen. Komplementär dazu existiert ein dynamischer Gruppierungsmechanismus, der eine flexible Rekombination von neuronalen Antworten ermöglicht und die Voraussetzung dafür schafft, daß ganz unterschiedliche Konstellationen im gleichen Netzwerk fest verschalteter Neuronen nacheinander analysiert und repräsentiert werden können.

Zur zentralen Frage wird somit, über welchen Mechanismus Nervenzellen auf flexible Weise und temporär zu funktionell kohärenten Gruppen zusammengebunden und deren Antworten so markiert werden können, daß diese auf nachfolgenden Verarbeitungsebenen als zusammengehörig identifiziert und von Antworten anderer, gleichzeitig aktiver Gruppierungen unterschieden werden können.

Das Nervensystem hat nur eine Option, um aus vielen, gleichzeitig aktiven Neuronen wenige auszuwählen und diese als zusammengehörig auszuweisen. Die Antworten der ausgewählten Neuronen müssen gemeinsam hervorgehoben werden; die Wahrscheinlichkeit, daß diese in nachgeschalteten Strukturen wiederum zur Erregung von Neuronen führen, muß erhöht werden. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten. Die naheliegendste ist, die ausgewählten Nervenzellen stärker zu aktivieren, da dies über zeitliche Summation das Erreichen der Erregungsschwelle von Neuronen auf der nächsten Stufe begünstigen würde. Nun ist es möglich, gleichzeitig mehrere Figuren zu erkennen, also mehrere Neuronengruppierungen gleichzeitig hervorzuheben. Würde dies lediglich durch Anhebung der Entladungstätigkeit der entsprechenden Neuronengruppen bewirkt, stellte sich erneut das Problem herauszufinden, welche der gleichermaßen verstärkten Ant-

worten zu einer bestimmten Figur gehören. Es wäre unmöglich zu entscheiden, ob ein großes Ensemble entstanden ist oder ob sich mehrere kleinere Ensembles gebildet haben. Würden alle verstärkten Antworten einem Ensemble zugeordnet, entstünden falsche Konjunktionen zwischen nichtzusammengehörigen Bildelementen. Um diese Schwierigkeit zu umgehen, wurde vorgeschlagen, daß die Synchronizität der Entladungstätigkeit der Neurone diese als zusammengehörig ausweisen sollte und nicht deren erhöhte Entladungsrate. Dahinter steht die gut begründete Annahme, daß neuronale Antworten nicht nur durch Frequenzerhöhung, sondern auch durch Synchronisation hervorgehoben werden können. Der Grund ist, daß gleichzeitig eintreffende synaptische Potentiale in nachgeschalteten Zellen besonders gut summieren. Die saubere Trennung zwischen mehreren Ensembles wird dadurch möglich, daß nur die neuronalen Entladungen von der Summation profitieren, die genau synchron sind. Weil die Zeitstruktur der synchronen Eingangssignale in den Antworten nachgeschalteter Zellen erhalten bleibt, kann die Signatur der Zusammengehörigkeit über mehrere Verarbeitungsstrukturen hinweg vermittelt werden. Synchronisation erscheint somit als ideale Strategie, um die Effektivität der Antworten von ausgewählten Zellgruppen selektiv zu erhöhen und diese herausgehobenen Antworten für eine weitere, gemeinsame Verarbeitung zusammenzubinden.

Falls die Ensemblebildung in der Großhirnrinde auf diesem Prinzip beruht, müssen eine Reihe von Phänomenen beobachtbar sein. Eine kritische Voraussage ist zum Beispiel, daß räumlich verteilte Nervenzellen ihre Antworten synchronisieren müssen, wenn sie sich an der Kodierung einer kohärenten Figur beteiligen. Diese Synchronisationsphänomene müssen sich wegen der distributiven Organisation kortikaler Repräsentationen nicht nur innerhalb eines Verarbeitungsareals, sondern auch zwischen verschiedenen Arealen nachweisen lassen. Eine weitere Voraussage ist, daß die Wahrscheinlichkeit, mit der Neurone ihre Antworten synchronisieren, die Gestaltkriterien widerspiegeln muß, nach denen Konturen zu Objekten zusammengefaßt werden. Neurone sollten also ihre Antworten synchronisieren, wenn sie von kontinuierlichen Konturen erregt werden oder von Kontursegmenten, die die gleiche Orientierung oder Farbe haben oder sich mit gleicher Geschwindigkeit in die gleiche Richtung bewegen. Eine weitere wichtige Voraussage ist, daß einzelne Zellen die Partner, mit denen sie sich synchronisieren, sehr schnell wechseln können müssen, wenn sich die Gegebenheiten im Bildraum ändern. Nur so kann die Forderung erfüllt werden, daß verschiedene Merkmale oder, auf höheren Verarbeitungsstufen, verschiedene Kombinationen von Merkmalen, durch verschieden zusammengesetzte, aber bezüglich der beteiligten Neurone erheblich überlappende Ensembles repräsentiert werden.

Ferner sollte gelten, daß die Kriterien, nach denen Merkmale gruppiert werden, in der funktionellen Architektur der assoziativen Verbindungen zwischen Hirn-

rindenneuronen verankert liegen. Entsprechend sollten die Verbindungen zwischen Neuronen in der Hirnrinde, die sogenannten cortico-corticalen Verbindungen, synchronisierende Wirkung haben. Das „Vorwissen“ über die je wahrscheinlichsten Zuordnungen muß in der Netzwerkarchitektur dieser synchronisierenden Verbindungen gespeichert sein. Angeborene Merkmale dieser Architektur würden dann den Anteil genetisch vorgegebener Gruppierungskriterien widerspiegeln. Da bekannt ist, daß die Gestaltkriterien für die Gruppierung von Merkmalen durch Erfahrung modifiziert werden können, muß die funktionelle Architektur synchronisierender Verbindungen zudem durch Erfahrung veränderbar sein. Dies ist auch erforderlich, damit neue Ensembles strukturiert werden können, wenn neue Objekte zur Repräsentation kommen. Ein Großteil dieser Voraussagen konnte inzwischen experimentell überprüft und im wesentlichen bestätigt werden. Eine zusammenfassende Darstellung der Literatur zu diesen Arbeiten findet sich in Singer and Gray (1995) und Singer (1995).

Zu klären bleibt nun die Frage, inwieweit die gemessenen Synchronisationsphänomene tatsächlich vom Gehirn genutzt werden, um das Bindungsproblem zu lösen. Die bisher verfügbaren Daten sind allesamt mit dieser Annahme kompatibel. Wie so oft in der experimentellen Forschung erweist sich jedoch der Nachweis als schwierig, daß eine aufgefundene Phänomenologie der Funktion entspricht, die ihr der hypothesenbildende Experimentator zuweist. Es muß damit gerechnet werden, daß die gemessenen Phänomene Begleiterscheinungen eines Mechanismus sind, der ganz andere Funktionen erfüllt als die, die den Experimenten als Hypothese zugrundegelegt wurden. Sollte die Hypothese jedoch zutreffen, daß das Bindungsproblem über die Synchronisierung von neuronaler Aktivität gelöst wird, dann würde die Voraussage gelten, daß nur solche Aktivitätszustände zu Wahrnehmungen und Empfindungen führen und letztlich bewußt werden können, die ein hinreichendes Maß an zeitlicher Kohärenz aufweisen. Inhalte der Wahrnehmung und Empfindungen würden demnach nicht auf der Aktivierung einiger weniger spezialisierter Nervenzellen beruhen, sondern auf der temporären Synchronisation all jener im Netzwerk verteilten Nervenzellen, welche durch ihre Antworten das Vorhandensein der verschiedenen Komponenten eines Wahrnehmungsinhaltes repräsentieren. Bei unreflektierten Primärwahrnehmungen beziehungsweise -empfindungen würden diese synchronen Aktivitätsmuster entsprechend auf primäre Verarbeitungsstrukturen beschränkt bleiben. Inhalte dagegen, die einer weitergehenden Reflexion unterzogen werden und als Abbildung hirninterner Prozesse bewußt werden, müßten folglich durch synchrone Aktivierungszustände von Neuronen in kortikalen Arealen höherer Ordnung repräsentiert werden. Noch gibt es wenig direkte experimentelle Evidenz für diese Voraussagen. Erste Hinweise, daß dies tatsächlich so sein könnte, wurden in Versuchen an Katzen erhalten, von deren Sehrinde neuronale Aktivität abgeleitet wurde,

während die Tiere dem Phänomen der binokularen Rivalität ausgesetzt waren. Wenn den beiden Augen unterschiedliche, nicht zu einem einheitlichen Perzept fusionierbare Muster angeboten werden, tritt interokulare Rivalität auf, ein Phänomen, das bei Tier und Mensch gleichermaßen nachweisbar ist. Wahrgenommen werden immer nur die Signale von je einem Auge. Obgleich die dargebotenen Muster physikalisch unverändert bleiben, bewirkt ein zentraler Mechanismus, der auf Konkurrenz beruht, daß die beiden Muster alternierend wahrgenommen werden. Unter Ausnutzung dieses Phänomens läßt sich nun untersuchen, wie sich neuronale Antworten auf Muster, die wahrgenommen werden, unterscheiden von Antworten auf Muster, die nicht zur Wahrnehmung kommen. Diese Versuche haben ergeben, daß sich wahrnehmbare neuronale Aktivitäten von nicht wahrnehmbaren nicht dadurch unterscheiden, daß erstere stärker und letztere schwächer sind; die Antwortamplituden der Neuronengruppen, die auf die verschiedenen Muster ansprechen, sind ununterscheidbar. Ein signifikanter Unterschied besteht jedoch hinsichtlich des Synchronisationsverhaltens. Nervenzellen, welche wahrnehmbare Signale vermitteln, zeichnen sich dadurch aus, daß ihre Antworten zeitlich synchronisiert sind, während die Antworten von Neuronengruppen, die auf das nicht wahrnehmbare Muster reagieren, weniger gut oder gar nicht synchronisiert sind. Es ist dies ein erster Hinweis darauf, daß das Maß an Synchronizität mit der Wahrnehmbarkeit von Mustern korreliert. Diese Daten wurden in der primären Sehrinde erhoben, betreffen also Prozesse auf relativ peripherer Verarbeitungsstufe. Wenn jedoch gilt, daß die Verarbeitungsprinzipien innerhalb der verschiedenen Hirnrindenareale ähnlich sind, dann sollte dieser Befund auch auf die Substrate höherer kognitiver Phänomene generalisierbar sein. Da sich die elektrischen Signale, die durch kohärente, synchronisierte neuronale Aktivität generiert werden, besonders gut aufsummieren, scheint es nicht ausgeschlossen, daß sich kohärente Aktivitätszustände auch beim Menschen mit Hilfe nicht-invasiver Ableitungsverfahren erfassen lassen. Somit scheint es nicht utopisch, auch beim Menschen nach elektrophysiologischen Korrelaten von Wahrnehmungen und Empfindungen und deren Repräsentation in höheren Hirnrindenarealen zu suchen.

Aber selbst wenn diese Suche erfolgreich sein sollte, wären wiederum nur die Randbedingungen geklärt, die erfüllt sein müssen, damit Bewußtsein möglich wird. Jene Attribute, die den speziellen ontologischen Status der Erfahrung ausmachen, ein bewußtes, autonomes, frei agierendes Selbst zu sein, wären auch dann nicht erklärt, weil die Inhalte, die zu dieser Erfahrung führen, nicht aus dem aktuellen Reizgeschehen heraus erklärbar sind, sondern eine Geschichte haben, die ihrerseits auf dem Diskurs von Menschen beruht, die in eine gemeinsame kulturhistorische Tradition eingebunden sind.

Literatur

- Singer, W. & C. M. Gray (1995): Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis. In: *Annu. Rev. Neurosci.*, 18, S. 555-586.
- Singer, W. (1995): Development and plasticity of cortical processing architectures. In: *Science*, 270, S. 758-764.