

Neuronale Korrelate des Bewusstseins

- aktueller Forschungsstand und deren Identifizierung -

Seminararbeit am Departement für Psychologie

Universität Freiburg (CH)



Lehrstuhl: Allgemeine Psychologie
Betreuer: Macho, Siegfried

Verfasser: Pfäfflin, Tilman
Adresse: Bd. de Pérolles 91
CH-1700 Fribourg
Telefon: +41(0) 76 22 55 895
E-Mail: tilman.pfaefflin@unifr.ch
Semester: 4
Version 2
Abgabedatum: 30.06.2009

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
1. Einleitung	3
2. Hauptteil	4
2.1. Auf der Suche nach dem Bewusstsein: ein Überblick	4
2.2. Arbeitsgrundlage	6
2.3. Was sind die Neuronalen Korrelate des Bewusstseins ?	7
2.3.1. Grundvoraussetzungen: Die bewußtseinermöglichenden Neuronen (NCC _e)	7
2.3.2. Neuronen und ihre Aktivität	8
2.3.3. Spezifisches Korrelat oder ganzheitlicher Prozess?	8
2.3.4. Die Eigenschaften der NCC	10
2.4. Wie lassen sich die Neuronalen Korrelate des Bewusstseins identifizieren?	10
2.4.1. Forschungszugang	10
2.4.2. Einzel- und Vielzelleitungen	11
2.4.3. Unterschiedliche Interpretation: Necker Würfel	12
2.4.4. Binokularer Wettbewerb und Flash Supression	12
2.4.5. Bewegungswahrnehmung	14
2.4.6. Emotionale Reize	14
3. Diskussion	15
4. Literaturverzeichnis	19

Zusammenfassung

Diese vorliegende Arbeit befasst sich mit der aktuellen Forschung über die Neuronalen Korrelate des Bewusstseins und deren Identifikation. Ausgehend von Crick und Kochs Appell (1990) nach einer neurobiologischen Theorie des Bewusstseins, konzentriert sich die Arbeit auf eine materialistische Sichtweise und stellt Bewusstsein als natürliches Produkt evolutionärer und biologischer Vorgänge dar.

Zunächst wird ein kurzer Einblick in verschiedene Theorien zum Bewusstsein und deren Weiterentwicklung in den letzten 20 Jahren gegeben, sowie eine Eingrenzung des Begriffs *Neuronales Korrelat* vorgenommen. Anschließend werden die aktuellen Methoden und Erkenntnisse der Bewusstseinsforschung dargestellt.

Erst durch eine grundlegende, wissenschaftliche Erforschung der biologischen Prozesse, welche Bewusstsein ermöglichen und mit subjektiven Bewusstseinszuständen korrelieren, lässt sich das Bewusstsein Schritt für Schritt erfassen. Von daher scheint es sinnvoll, nach dem geringst möglichen Satz von Neuronen, der im Wechselspiel mit einer bewussten Wahrnehmung steht, zu suchen (Crick, 1994; Crick & Koch, 1990, 1992; Koch, 2005).

Die besten Kandidaten für die Neuronalen Korrelate des Bewusstseins scheinen die Pyramidenzellen in der Großhirnrinde zu sein, diese können mit ihren weiten Ausläufern ein neuronales Netzwerk über den gesamten Kortex spannen, welches die Fähigkeit besitzt, (a) Informationen zwischen sich nicht angrenzenden Hirnarealen auszutauschen, (b) Rückkopplungsschleifen zu bilden, damit ein Bewusstseinszustand aufrecht erhalten werden kann sowie (c) die Möglichkeit, dass Neuronenaktivität synchron und in Koalitionen auftreten kann. (Crick, 1994; Koch, 2005; Koch & Greenfield, 2008; Tononi & Koch, 2008).

Schlüsselwörter: Neuronale Korrelate; Bewusstsein; Hirn

Key words: neural correlate; consciousness; brain

1. Einleitung

Während Descartes Mitte des 17. Jahrhunderts noch über eine strenge Zweiteilung der Substanzen, Materie und Seelenstoff diskutierte, stellt die streng dualistische Position heute eine veraltete Ansicht dar. So wird der Dualismus Ende des 20. Jahrhundert, zwar noch in Ansätzen von Popper und Eccles vertreten (Koch, 2005), doch aktuellere Hypothesen, welche in dieser Arbeit erläutert werden sollen, gehen von einem Ausgangspunkt aus, der rein materialistischer Natur ist, und das Bewusstsein als ein natürliches Produkt der Evolution ansieht, welches damit auch auf neuronaler Ebene greifbar zu werden scheint.

Das Phänomen Bewusstsein lässt sich nicht verstehen, wenn man es nur als „Black Box“ betrachtet, erst durch die genaue Betrachtung der zugrunde liegenden biologischen Prozesse, der Untersuchung der Neuronen und ihrer Wechselwirkungen, kann sich empirisches Wissen sammeln, welches die Wissenschaft nach und nach dem Problem, was Bewusstsein eigentlich ist und wie es funktioniert, näher bringen kann. Mit den Fortschritten der Neurobiologie und der Kognitionswissenschaften wurde der Weg für die Suche nach einem *Neuronalen Korrelat des Bewusstseins* geebnet. (Horgan, 1994).

In diesem Sinne plädieren Crick und Koch (1990) für eine wissenschaftliche Erforschung des Bewusstseins. Für sie ist die Fähigkeit des Gewährwerdens (awareness) ein Synonym für Bewusstsein (consciousness). Damit lässt sich der Untersuchungsgegenstand von komplexeren Formen des Bewusstseins z.B. dem Selbstbewusstsein, der Subjektivität und weiteren Aspekten des Bewusstseins, die nicht aus der dritten Person fassbar zu sein scheinen, abgrenzen, diese sollen nicht Thema dieser Arbeit sein. Vielmehr wird sich die Arbeit auf die grundlegenden Mechanismen des *Gewährwerdens* im Sinne von Crick und Koch und des primären Wahrnehmungsbewusstseins (vgl. Engel, 2005), beschränken. Diese Mechanismen lassen sich wiederum mit objektiven Mitteln erforschen und bieten so einen empirischen Ansatz, anhand dessen es möglich erscheint sich Schritt für Schritt dem *Bewusstsein* zu nähern und der gleichzeitig den wissenschaftlichen Ansprüchen gerecht wird (Koch, 2005).

Im folgenden wird zuerst ein ausgewählter Einblick in die unterschiedlichen Herangehensweisen an den Bewusstseinsbegriff gegeben, hierbei soll dieser Stück für Stück auf die Neuronalen Korrelate des Bewusstseins reduziert werden, bis hin zu einer Arbeitsgrundlage angelehnt an Crick und Koch (Crick, 1994), um im Anschluss der Hauptfragestellung der Arbeit nachzugehen: *Was sind die Neuronalen Korrelate des Bewusstseins und wie lassen sich diese identifizieren?* Der erste Teil der Fragestellung erörtert, was man unter den Neuronalen Korrelaten des Bewusstseins (im folgenden NCC:

neural correlates of consciousness) versteht und wie diese beschaffen sein müssen, während sich der zweite Teil mit der Identifizierung dieser Korrelate, sowie den angewendeten Methoden und deren Resultaten befasst.

2. Hauptteil

2.1. Auf der Suche nach dem Bewusstsein: ein Überblick

Den Ausgangspunkt für die Bewusstseinsforschung bilden wissenschaftsgeschichtlich philosophische Reflexionen, in denen sich der Bewusstseinsbegriff allmählich immer mehr mit anderen wissenschaftlichen Disziplinen vermischt, bis er schließlich zu einer aktuellen Kernfrage der Neuropsychologie wird (Kiefer, 2002; Singer, 2002). Descartes (1596-1650) unterscheidet noch zwischen der *res extensa*, der physikalischen Substanz, und der *res cogitans*, der denkenden Substanz. Für ihn war die *res cogitans* verantwortlich für das Entstehen bewussten Erlebens und nur dem Menschen zugänglich (Koch, 2005). Das Bewusstsein war demnach unabhängig von den physikalischen Gegebenheiten des Körpers und somit Gegenstand der Philosophie. Popper (1902-1994) und Eccles (1903-1997), vertraten noch in den 80er Jahren die Meinung, dass der bewusste Geist zwar die Fähigkeit besitzt, das Gehirn und dessen Verhalten zu beeinflussen, die Seele aber selbst unsterblich und unabhängig vom Gehirn sei (Koch, 2005). Die Vorstellungen der beiden Autoren sind jedoch zwecks fehlendem empirischen Gehalt nicht von der Wissenschaft aufgenommen worden und mit ihrem hohen philosophische Gehalt keine Basis für die moderne Bewusstseinsforschung.

Bedeutende Vertreter der aktuellen Geisteswissenschaften sind Searle und Nagel, deren Herangehensweise an den Bewusstseinsbegriff von zwei Kernproblemen ausgeht (Nagel, 1993; Searle, 2005; zitiert nach Kandel, 2007). Erstens müssen die unterschiedlichen Sinneseindrücke in eine einzige bewusste Erfahrung zusammen geschmolzen werden, obgleich bei der Informationsaufnahme ganz verschiedene Organe und Nervenbahnen benutzt werden. Hierbei handelt es sich um das sogenannte *Bindungsproblem* (vgl. Koch, 2005; Kandel, 2007). Das zweite Problem befasst sich mit der Frage von Subjektivität und Einzigartigkeit von Empfindungen. Dabei geht es um die Bedeutung, die ein bestimmter Sinneseindruck (z.B. die Farbe Rot) für jeden Einzelnen hat. Allein durch die Einzigartigkeit jedes Individuums ist keine objektive Definition dieses Bewusstseinsprozesses möglich. Dies macht die Schwierigkeiten deutlich, mit denen sich die Bewusstseinsforschung zu beschäftigen hat. Das Vorhandensein dieser Probleme soll jedoch nicht daran hindern, nach bewusstseinskorrelierenden Systemen zu suchen, denn diese können später beim Verständnis

von subjektiven Phänomenen weiterhelfen (Nagel, 1993; zitiert nach Kandel, 2007).

Churchland (1997) schlägt vor, Bewusstsein erst einmal auf sieben wichtige Eigenschaften zu begrenzen, um ihm eine provisorische Struktur zu geben. So ist Bewusstsein erstens stets mit einer Gedächtnisform verbunden, da wir den eigenen physischen und psychischen Zustand mit einem Gefühl für Zeit wahrnehmen, welches zumindest ein Kurzzeitgedächtnis benötigt. Zweitens muss Bewusstsein unabhängig von sensorischer Wahrnehmung sein, denn auch ohne irgendwelche Sinneseindrücke haben wir zumindest kurzzeitig Bewusstsein. Drittens lässt sich Bewusstsein aktiv durch Aufmerksamkeit und Konzentration steuern. Viertens beinhaltet es die Fähigkeit zur komplexen Interpretation uneindeutiger Fakten. Fünftens verschwindet Bewusstsein im Tiefschlaf und taucht sechstens beim Träumen wieder auf. Als siebten und letzten Punkt nennt Churchland die Eigenschaft mehrere sensorische Modalitäten als einen Bewusstseinszustand wahrnehmen zu können.

Die oben genannten Probleme von Searle und Nagel, dienen zwar einer theoretischen Erörterung, führen jedoch erst einmal zu weit weg von den NCC, während die Einteilung von Churchland schon eine viel höhere Relevanz aufbringt, da es nun möglich wird die einzelnen erwähnten Eigenschaften zu betrachten, zum Beispiel ihren Bezug zueinander und wie sie miteinander agieren.

Roth (2002, 2007) differenziert weiter zwischen Hintergrundbewusstsein und Aktualbewusstsein. Unter Hintergrundbewusstsein versteht er andauernde Gefühls-erfahrungen wie das Gefühl eines eigenen Körpers, einer eigenen Identität und der Kontrolle über die körperlichen und geistigen Handlungen, sowie das Wissen, wo man sich im Bezug auf Raum und Zeit befindet. Das Aktualbewusstsein baut auf diesen Zuständen auf. Es handelt sich hierbei um schnell wechselnde Zustände wie geistige Tätigkeiten, Emotionen, Affekte, Bedürfnisse, Wünsche, Absichten, Willensakte, bewusste Sinneswahrnehmungen und Aufmerksamkeit. Hauptsächlich die beiden letzteren Bereiche sind für die Bewusstseinsforschung der NCC relevant, da diese beiden Bereiche einen geeigneten Zugang für eine empirischen Untersuchung bieten. Die *Aufmerksamkeit* stellt für Roth eine herausragende Funktion des Aktualbewusstseins dar, ihm zufolge ist *Aufmerksamkeit* ohne ein bewusstes Erleben nicht möglich (Roth, 2007). Dies ist jedoch kritisch zu betrachten, da Experimente zur *Aufmerksamkeit* (z.B. mittels Maskierungstechniken) zeigen, dass es Bedingungen gibt, in denen man trotz *Aufmerksamkeit* Reize *unbewusst* (subliminal) verarbeitet (vgl. Kiefer, 2002).

Aus neurobiologischer Betrachtungsweise basieren mentale Prozesse auf biologischen Wurzeln (Engel 2005). Bewusstsein kann damit als ein Prozess betrachtet werden, der aus der

biologischen Evolution entstanden ist und eine Funktion für das Lebewesen besitzt.

Während sich klassische Bewusstseinstheorien vorrangig mit komplexeren Erscheinungsformen des phänomenologischen Erlebens befassen, wie dem Selbstbewusstsein, wird im Gegensatz dazu in der neurobiologischen Forschung das Gewicht auf elementare Bewusstseinsprozesse gelegt, wie z.B. das primäre Wahrnehmungsbewusstsein (Engel, 2005). Auch neurobiologische Befunde und Erkenntnisse der Entwicklungspsychologie zeigen auf beeindruckende Weise, dass mentale Funktionen stark mit der Funktion der Nervennetze in Verbindung stehen (Singer, 2002).

Aufgrund der vielen verschiedenen Perspektiven, aus denen der Bewusstseinsbegriff allgemein betrachtet werden kann, ist es sinnvoll sich auf eine Arbeitsgrundlage zu beschränken, mit der es möglich wird dem Bewusstsein auf wissenschaftliche Weise zu begegnen. Die Herangehensweise, die Crick und Koch (Crick, 1994) vorschlagen, um sich auf die Suche nach den Neuronalen Korrelate zu begeben, scheint sinnvolle zu sein, hierfür machen sie eine Reihe von Grundannahmen, die im folgen Abschnitt dargestellt werden.

2.2. Arbeitsgrundlage

Crick und Koch gehen von zwei Grundannahmen aus (Crick, 1994). Erstens herrscht allgemeine Übereinstimmung, dass nicht alle Vorgänge, welche sich im Gehirn abspielen, dem bewussten Erleben zugänglich sind. Dennoch scheinen zu jeder Zeit neuronale Prozesse in Beziehung zum Bewusstsein zu stehen. Zweitens nehmen sie vorläufig an, dass jedem Aspekt von Bewusstsein, wie zum Beispiel Schmerz oder Denken, ein gemeinsamer fundamentaler Mechanismus zu Grunde liegt. Versteht man also ein spezifisches Phänomen, wie zum Beispiel das der visuellen Wahrnehmung, so lässt sich daraus auf weitere Aspekte schließen.

Crick und Koch schlagen als weitere Arbeitsgrundlage deshalb Folgendes vor: Jeder kann sich etwas unter dem Phänomen Bewusstsein vorstellen (a). Darum sollte auf eine präzise Definition von Bewusstsein verzichtet werden, da diese eventuell irreführen könnte. Fragen nach der Funktion des Bewusstseins sollen nicht behandelt werden (b). Die Annahme, dass auch einige Tierarten eine Art von Bewusstsein besitzen, scheint plausibel zu sein (c). Daraus lässt sich ableiten, dass die Sprache, welche in dieser Form nur dem Menschen eigen ist, kein geeigneter Gegenstand der Forschung zum Bewusstsein ist. Abgesehen von der Sprache kann man also davon ausgehen, dass man von Experimenten an Tieren auch auf den Menschen schließen kann (vgl. Logothetis, 1998). Die Frage, ob auch „niedere“ Tiere, wie zum Beispiel Tintenfische und Fruchtfliegen, ein Bewusstsein besitzen, ist verfrüht (d). Jedoch ist es sehr

wahrscheinlich, dass mit der Komplexität des Nervensystems auch die Form des Bewusstseins zunimmt. Der selbstbezügliche Aspekt von Bewusstsein (Selbstbewusstsein) scheint eine Sonderform darzustellen und sollte zunächst nicht beachtet werden (e).

Crick (1994) und Koch (2005) legen auf der Basis der bisherigen Bewusstseinsforschung nahe, sich auf den kleinsten Baustein dessen zu beziehen, was bis jetzt unter wissenschaftlichen Bedingungen über Bewusstsein ausgesagt werden kann, um sich dann Schritt für Schritt einer Definition des Bewusstseins zu nähern. Die Autoren vermuten, dass dem Bewusstsein zu jeder Zeit ein ganz bestimmter Aktivitätstyp von Neuronen entspricht; das NCC. Zeigt sich keine neuronale Aktivität, entsteht bei der entsprechenden Person auch kein Bewusstsein. Bewusstsein bedarf also in einem gewissen Ausmaß der Aktivität von Neuronen (Crick, 1994). Aus diesen Vermutungen ergaben sich verschiedene Fragen. Z.B.: Wo sind diese Neuronen im Hirn lokalisiert, und handelt es sich um einen besonderen neuronalen Typ? Was sind die allgemeinen Verhaltenscharakteristika dieser Neuronen? Haben sie irgendwelche Besonderheiten und wenn ja, welche? Im folgenden Abschnitt soll näher auf diese Fragen eingegangen werden.

2.3. Was sind die Neuronalen Korrelate des Bewusstseins ?

2.3.1. Grundvoraussetzungen: Die bewußtseinermöglichenden Neuronen (NCC_e)

Die Hirnaktivität als Ganzes geht mit Bewusstsein einher und korreliert mit diesem. Das ganze Hirn als Korrelat des Bewusstseins zu betrachten ist jedoch kein aufschlussreicher Ansatz. Viele unserer Hirnregionen sind zum Beispiel nicht notwendig für eine phänomenale Wahrnehmung. Lässt man diese Aktivitäten außer Acht, reduziert sich das Korrelat auf nur diejenigen Aktivitäten, welche auch wirklich im Bezug zum Bewusstsein stehen (Koch, 2005). Eine wichtige Funktion üben die *bewusstseinermöglichenden* Faktoren (NCC_e) aus. Koch nennt hier eine hinlängliche Blutversorgung (a), ohne welche der Mensch innerhalb weniger Sekunden das Bewusstsein verliert. Weiter erwähnt er Myriaden von Gliazellen (b), denen eine neuronenenunterstützende Funktion zugesprochen wird, die für sich allein genommen jedoch nicht die erforderliche Spezifität und Geschwindigkeit für eine Wahrnehmung aufbringen können. Auch bedarf es einer genügenden Wachsamkeit (Arousal Level), ausgehend vom aufsteigenden Aktivierungssystem, das für unseren Schlaf-Wach-Rhythmus zuständig ist (c). Dabei projizieren cholinerge Neuronen aus dem Hirnstamm in die intralaminaren Kerne des Thalamus (intralaminaren Nuclei, ILN), die Informationen vom gesamten Kortex erhalten. Werden die ILN nicht aktiviert oder fehlen, kann kein Bewusstsein

zustande kommen. Die NCC_e werden als eine Art Grundversorgung betrachtet und sind zeitlich nicht an ein bestimmtes Perzept gebunden, während hingegen das NCC gleichzeitig mit dem erkannten Gegenstand auf- und abtaucht. Die NCC sind spezifischer als die NCC_e , da die NCC mit einem bestimmten Bewusstseinszustand korrelieren.

Dass es unabdingbare Aktivität für Bewusstsein gibt, welche unbewusst abläuft, findet sich auch bei Roth (2007). Hierzu zählt er Aktivitäten im Hippocampus, der Amygdala und der retikularen Formation. Bewusstseinsfähig sind ihm zufolge nur Prozesse, welche in den Arealen der assoziativen Großhirnrinde des Schläfen-, Scheitel- und Stirnlappens ablaufen. Auch diese Prozesse werden nur unter bestimmten Bedingungen wahrgenommen. Eine dieser Bedingungen stellen z.B. neue kognitive und motorische Aufgaben dar, für die das Gehirn noch keine Verarbeitungsstrategie abgespeichert hat (Roth, 1999, 2007).

2.3.2. Neuronen und ihre Aktivität

In der neurowissenschaftlichen Forschung ist es sinnvoll, sich bei Hirnaktivität auf die neuronale Aktivität zu beschränken, selbst dann bleiben nach heutigen Schätzungen (Thompson, 2001) im menschliche Gehirn ungefähr eine Billionen Neuronen als Beobachtungsgegenstand übrig. Unter neuronaler Aktivität versteht man die Feuerrate bzw. Spikeaktivität (Aktionspotenziale) einer einzelnen bzw. mehrerer Zellen. Es wird davon ausgegangen, dass die gesamte Information eines Neurons mittels der Frequenz seiner Aktionspotentiale übertragen werden kann (Koch, 2005).

Feuern mehrere Zellen zum selben Zeitpunkt spricht man von Spikesynchronie. Je mehr die Aktivität der einzelnen Neuronen übereinstimmt, desto mehr wird von korreliertem Feuern gesprochen. *Korreliertes Feuern* kann das Zusammenwirken der Aktionspotentiale der vorangegangenen, wie auch der nachgeschalteten Zelle bedeuten. Spikesynchronie (Phasensynchronisation) scheint ein bedeutender Mechanismus zu sein, welcher den Wettbewerb zwischen den Neuronen, und damit der untereinander konkurrierenden Bewusstseinsphänomene beeinflusst und stellt nach Koch eine notwendige Bedingung des Bewusstseins dar (vgl. Engel et al. 1999; Koch 2005).

2.3.3. Spezifisches Korrelat oder ganzheitlicher Prozess?

Eine Frage, die in der Bewusstseinsforschung zu Kontroversen führt, ist, ob es sich bei den NCC um eine lokalisierbare Ansammlung von Neuronen handelt, die einem spezifischen Hirnareal zugeordnet werden können, oder ob es sich um einen über das ganze Hirn verteilten Prozess handelt (vgl. Koch & Greenfield, 2008). Koch vertritt die These eines spezifischen,

lokalisierbaren Korrelats und geht davon aus, dass jede bewusste Wahrnehmung ein entsprechendes Pendant von Nervenaktivität in Form von Koalitionen besitzt, das sich durch seine Einzigartigkeit von anderen Wahrnehmungen unterscheidet. Löst sich eine dieser Koalitionen von Nervenzellen auf, verändert sich oder verschwindet auch die Wahrnehmung (Koch & Greenfield, 2008). Die physiologischen Grundlagen, welche für die Bewusstseinskorrelate verantwortlich sind, bilden ihm zufolge die Pyramidenzellen, welche in der Großhirnrinde liegen. Sie sind fähig mit ihren langen Ausläufern über weite Strecken hinweg zu kommunizieren und dabei Rückkopplungsschleifen zu bilden, was erklären würde, weshalb bestimmte Bewusstseinszustände länger anhalten können als das kurze Feuern einzelner Neuronen. Ein weiteres physiologisches Substrat der NCC, welches Koch für bedeutsam hält, ist das Claustrum in der Großhirnrinde (Crick & Koch, 2005; Koch & Greenfield, 2008). Befunde legen nahe, dass das Claustrum in nahezu alle kortikalen Areale projiziert und aufgrund der Beschaffenheit der dort vorherrschenden Neuronen ein optimaler Kandidat für die NCC sein könnte. Das Claustrum wäre somit ein idealer Ort, an welchem die jeweiligen Informationen aus den sensorischen Rindengebieten gebündelt und zu einheitlichen Erlebnissen verarbeitet werden könnten (Crick & Koch, 2005). Bevor sich jedoch bewusstseinsverantwortliche Zellkoalitionen bilden können, bedarf es aufkommender Erregungssignale aus dem Hirnstamm und dem Thalamus. Dieses sogenannte Aktivierungssystem ist notwendig für bewusstes Erleben. Im Tiefschlaf, unter Narkose oder im tiefen Koma schweigt dieses Aktivierungssystem. Es kommt kein Bewusstsein zustande. Kochs Auffassung der NCC besagt, dass es sich bei neuronalen Aktivitäten nicht um quantitative, sondern um spezifische qualitative Vorgänge handelt. Nicht die Masse der gleichzeitig feuernden Neuronen ist entscheidend, sondern es müssen die richtigen Neuronen aktiv sein.

Greenfield (2008) widerspricht dem, sie geht davon aus, dass die neuronalen Prozesse, aus denen Bewusstsein hervorgeht, weit über das ganze Gehirn verteilt sind und es daher unwahrscheinlich sei ein spezifisches Neuronales Korrelat des Bewusstseins zu lokalisieren, wie es Crick und Koch versuchen. Ihrem Modell zufolge gibt es einen *Bewusstseinsgrad*, welcher sich jeden Augenblick ändert, indem sich die dafür zuständigen Zellensembles voneinander lösen und wieder neu zusammenfinden. Bewusstsein nimmt in dem Maße zu, in dem auch die Funktionen im ganzen Hirn zunehmen. Statt einem qualitativen Vorgang findet ein quantitativer Wettbewerb statt.

Edelman und Tononi (2002) sprechen hier auch von einem neuronalen Darwinismus, welcher unsere Wahrnehmungserlebnisse erzeugt, indem Neuronen untereinander im

Wettbewerb stehen.

Greenfields und Edelmans Thesen eines holistischen Bewusstseinsprozesses werden von aktuellen Forschungsergebnissen gestützt, die zum Schluss führten, dass es kein spezifisches NCC geben kann, das sich allein auf einen abgrenzbaren Hirnbereich reduzieren lässt (Gaillard et al., 2009).

2.3.4. Die Eigenschaften der NCC

Betrachtet man zusammenfassend die Merkmale, welche die NCC aufweisen müssen, damit ein bewusster Eindruck entstehen kann, so lassen sich folgende Punkte manifestieren:

- Es muss ein ausreichendes und globales Erregungsniveau der subcorticalen Hirnstrukturen vorliegen (Koch, 2005; Roth 2007).
- Die bewusstseinsbegleitenden Neuronenprozesse müssen in der assoziative Großhirnrinde des Schläfen-, Scheitel- und Stirnlappens stattfinden (Koch, 2005; Roth 2007).
- Die Neuronen agieren phasensynchron und bilden Zellkoalitionen, um zwischen den verschiedenen Objekten und Wahrnehmungszuständen zu diskriminieren (Engel, 1999, 2005; Koch 2005).
- Es hat sich gezeigt, dass die NCC in irgendeiner Weise mit einem intakten V1 in Verbindung stehen müssen, da bei Läsionen im V1 zwar visuelle Information noch verarbeitet werden kann, jedoch nicht den nötigen Erregungsgrad erfährt, dass sie bewusst wird (Koch, 2005).
- Die bewusstseins erzeugenden Neuronen müssen so beschaffen sein, dass sie Rückkopplungsschleifen bilden und zwischen weit auseinanderliegenden Hirnarealen kommunizieren können (Engel 2005; Kiefer 2002; Koch 2005; Roth 2007).

2.4. Wie lassen sich die Neuronalen Korrelate des Bewusstseins identifizieren?

2.4.1. Forschungszugang

Das System der visuellen Wahrnehmung eignet sich im Moment am besten zur Untersuchung des Bewusstseins, da das Sehsystem beim Menschen und Tier bereits gut erforscht ist (Koch, 2005). Außerdem lassen sich Beobachtungen beim visuellen System von Tieren sehr gut auf das menschliche System übertragen, wodurch es möglich wird, Einblicke in lebendige Gehirne und Nervensysteme zu bekommen (Crick, 1994; Engel, 2005; Koch, 2005).

Die direkteste Möglichkeit die NCC zu identifizieren besteht darin die Neuronenaktivitäten im Gehirn zu beobachten. Das geschieht durch physiologische und psychologische Experimente, während denen, z.B. mittels rückwärts oder vorwärts maskierten Stimuli, untersucht wird, welche unterschiedlichen phänomenalen Zustände mit ein und demselben sensorischen Input (Perzept) einhergehen (Koch, 2005; Kreiman, Fried & Koch, 2002). Bei der Rückwärtsmaskierung blockiert ein folgender Stimulus (Maske) die Weiterverarbeitung des Zielreizes, indem die Maske das ikonische Gedächtnis überschreibt. Bei der Vorwärtsmaskierung fällt der Zielreiz in eine Refraktärphase, wodurch die Verarbeitung der neuen Information ausbleibt (vgl. Kiefer 2002; Koch 2005).

Darüber hinaus hängen diese unterschiedlichen Bewusstseinszustände von vielen Faktoren ab z.B. welche Reize dem Input vorausgehen oder dem Aufmerksamkeitszustand des Probanden (Koch, 2005).

2.4.2. Einzel- und Vielzelleitungen

Gegenwärtig gibt es zwei Methoden der Neurobiologie, welche die Bewusstseinsforschung dominieren (Roth, 2007). Unterschieden wird zwischen den Einzelzelleitungen durch Mikroelektroden und den Vielzelleitungen durch bildgebende Verfahren, wie die Elektroenzephalographie (EEG), die Magnetenzephalographie (MEG) und die funktionelle Kernspintomographie (fNMR/fMRT/fMRI), wobei per computergestützter Verfahren auf die Zellaktivität mehrerer Zellen geschlossen wird.

Manchmal ergibt sich bei einer chirurgischen Operation, unter Einwilligung des Patienten, die Möglichkeit, Mikroelektroden im Hirn des Patienten zu fixieren. Mit den Elektroden lässt sich die Aktivität einzelner Neuronen *belauschen* oder stimulieren, indem man den Neuronen leichte Stromstöße verpasst. Das *Belauschen* der Neuronen ist örtlich wie auch zeitlich mit einer sehr genauen Auflösung verbunden. Solche Experimente sind an wachen Personen möglich, da das Hirn keine Schmerzrezeptoren hat und nur beim Öffnen der Schädeldecke eine lokale Betäubung nötig ist (Crick, 1994). Hat man erst einmal die Elektroden platziert, können Wahrnehmungsexperimente mit den Patienten durchgeführt werden (s. auch 2.4.4 und 2.4.5). Da die Möglichkeit solcher Verfahren beschränkt ist und nur bei Patienten, bei denen ein chirurgischer Eingriff getätigt wird, stattfinden kann, werden Experimente an Tieren bevorzugt (Roth, 2007). Das Spektrum der Versuchstiere im Feld der Bewusstseinsforschung reicht von Mäusen, Ratten, Katzen zu Schimpansen. Das gängigste Versuchstier ist der Makakeaffe, dessen visuelles System dem des Menschen sehr nahe kommt und welchem durch seine Lernfähigkeit Verhaltensreaktionen antrainiert werden können, durch die er

signalisieren kann, ob er einen bestimmten Reiz bewusst wahrnimmt oder nicht.

Die Bedenken, ob Tierversuch in der Forschung des Bewusstseins geeignet sind, konnten Cowey und Stoerig (1995) entkräften, indem sie bei Affen und Menschen mit Läsionen im V1 Wahrnehmungsexperimenten durchführten und dabei hohe Ähnlichkeiten im Antwortverhalten bei Mensch und Tier fanden. Die gewonnenen Daten lassen laut den Autoren, zumindest bei derartigen Wahrnehmungsexperimenten, den Schluss zu, dass die Verarbeitung und bewusste Wahrnehmung bei Mensch und Affe vergleichbar sind.

2.4.3. Unterschiedliche Interpretation: Necker Würfel

Eine Versuchsanordnung zur Ermittlung neuronaler Aktivitäten sind die Untersuchungen mit bistabilen Perzepten, die trotz gleichbleibenden Input, abwechselnd zu unterschiedlichen Interpretationen führen. Als Beispiel dient der *Necker-Würfel* (Koch, 2005). Die zweidimensionale Strichzeichnung lässt sich auf zwei Weisen interpretieren, welche sich nur in der räumlichen Orientierung unterscheiden. Einmal ist der Würfel nach innen geneigt, das andere Mal springt er einem entgegen, ein Mischzustand scheint nicht zu existieren. Somit liefert unser Gehirn bei Mehrdeutigkeit nicht mehrere Lösungen, sondern bevorzugt immer eine einzige. Das Ganze findet statt, ohne dass sich das Bild, welches auf der Retina abgebildet wird, verändert. Wir haben also zwei unterschiedliche phänomenale Zustände bei demselben retinalen Zustand, was zu der Vermutung führt, dass es Neuronen geben muss, deren Aktivität mit dem jeweils bewussten und unbewussten Eindruck korrelieren (Koch, 2005). Der Vorteil dieser mehrdeutigen Interpretationen für die Suche nach den NCC ist, dass ein identischer visueller Input über die Zeit zu unterschiedlichen Wahrnehmungserlebnissen führt, wodurch eine mit dem Wahrnehmungserlebnis korrelierende neuronale Aktivität ermittelt werden kann (Kiefer, 2002).

2.4.4. Binokularer Wettbewerb und Flash Supression

Ein weiteres Phänomen, mit welchem Wissenschaftler bewusste Vorgänge untersuchen, ist als *binokularer Wettbewerb* bekannt. *Binokularer Wettbewerb* entsteht, wenn beiden Augen jeweils ein unterschiedliches Bild präsentiert wird. Das Ergebnis ist, dass der Proband unter den richtigen Umständen abwechselnd jeweils nur eines der beiden Bilder sieht. Welches der beiden Bilder länger sichtbar bleibt hängt von vielen Faktoren ab, sicher ist, dass sich beide Bilder abwechseln. Neuere bildgebende Verfahren lassen dabei z.B. erkennen, dass das automatische Umschalten auch von aktiven Aufmerksamkeitsprozessen ergänzt wird, welche in präfrontalen und parietalen Arealen des Kortex lokalisiert sind (Koch, 2005; Tononi &

Koch, 2008).

Flash Suppression („Blitzunterdrückung“) ist eine Technik, mit der sich unterschiedliche Bilder gezielt in die Augen projizieren lassen, so dass Affen und Menschen über längere Zeit der gleiche visuelle Reiz dargeboten werden kann, ohne dass ihnen dieser Reiz bewusst wird. Die *Flash Suppression* basiert auch auf dem *Binokularen Wettbewerb*, das sichtbare Perzept lässt sich jedoch kontrollieren, indem gezielt neue Bilder auf die Netzhaut geblitzt werden. Durch ihre Neuartigkeit sind diese salienter als das konstant gehaltene Bild, welches dadurch aus der Sicht gelöscht wird. Logothetis (1998) fand mit Hilfe des *binokularen Wettbewerbs* und der *Flash Suppression* bei trainierten Affen heraus, dass die Neuronenaktivität im primären visuellen Kortex (V1) kaum mit dem bewusst wahrgenommenen (dominanten) Stimulus einhergeht und somit nicht zwischen dominanten und nicht-dominanten Stimulus diskriminiert. In den höheren kortikalen Arealen wie dem inferotemporalen Kortex (IT) und dem medialen Temporallappen (MTL), ließen sich jedoch Korrelationen finden. Je nachdem welches Bild den Affen bewusst wurde, feuerten, trotz gleichem retinalen Input, unterschiedliche Zellen. In der Sehrinde im Arealen V4 und im mittleren Temporallappen (MT) zeigten sich Neuronenkoalitionen, welche je nach bewusstem und unbewusstem Reiz miteinander zu konkurrieren schienen. Ein Teil der Zellen feuerte in zeitlicher Verbindung zu dem wahrgenommenen Perzept, ein anderer Teil korrelierte mit dem unterdrückten Reiz. Dieser Wettbewerb war im IT und im unteren Bereich des Sulcus temporalis superior (STS) beendet, hier korrelierte die Neuronenaktivität nur noch mit dem bewussten Perzept, keine IT-Zelle signalisierte den unterdrückten Reiz. In einer Studie von Rees (2007) bestätigten sich diese Befunde auch beim menschlichen Hirn.

Eine hohe Feuerrate im V1 und dessen Funktionieren scheint demnach nicht hinreichend für eine bewusste Wahrnehmung zu sein, stellt aber eine notwendige Bedingung dar. In den Arealen V4 und MT korrelieren bereits mehr als ein Drittel der Neuronen mit der bewussten Wahrnehmung, während der andere Anteil den unbewussten Reiz repräsentiert. Zum bewussten Bestandteil der visuellen Wahrnehmung werden nur Informationen aus höheren visuellen Arealen, welche zugleich eine direkte Verbindung zum Frontalhirn aufweisen können. Betrachtet man weiter allein die Korrelationen mit dem bewussten Perzept, so sind die erfolgversprechendsten Kandidaten der NCC die Neuronen des IT- und des STS (Koch 2005).

Untermauert werden diese Annahmen von Kreiman, Fried und Koch (2002) mit Befunden aus Einzelableitungen bei epileptischen Patienten, denen während einer Operation Mikroelektroden in den Temporal- und Frontallappen eingepflanzt wurden. Wenn die Patienten die Bilder bewusst sahen, welche ihnen per *Flash Suppression* dargeboten wurden,

feuerten die Zellen. Das Feuern stellte sich jedoch ein, sobald das Bild unterdrückt dargeboten wurde, obwohl es noch in einem der beiden Augen präsent war (Kreiman et al., 2002; zitiert nach Koch, 2005).

2.4.5. Bewegungswahrnehmung

Einige spezifischen Areale im Hirn sind über die Zeit immer genauer lokalisiert worden. Darum eignen sich diese besonders gut für die Bewusstseinsforschung. So konnten beim Affen bestimmte Zellen gefunden werden, welche auf Gesichter spezialisiert sind (Scheinberg, 1996; zitiert nach Koch, 2005). Bekannt geworden ist auch eine andere Entdeckung von Kreiman (2001). Er fand bei einer Patientin, mittels *Flash Supression* und implantierten Elektroden, ein Amygdalaneuron, welches signifikant häufiger feuerte, wenn der Patientin Bilder von Bill Clinton präsentiert wurden. Bei anderen Politikern oder prominenten Persönlichkeiten blieb das Neuron stumm.

Weitere gut erforschte Bereiche des Kortex sind Areale des mittleren Temporallappens (MT), der an der Bewegungswahrnehmung beteiligt ist (Koch, 2005). Experimente, sind möglich, indem man mit Mikroelektroden, welche im MT eines Affen befestigt worden sind, die Neuronenaktivität beobachtet, während den Affen verschiedene Bewegungen mit Hilfe der *Flash Supression* präsentiert werden (Heeger et al., 1999; zitiert nach Block, 2005). Kourtzi und Kanwisher (2000, zitiert nach Block, 2005) bestätigen nicht nur, dass dort die neuronale Grundlage der Bewegungswahrnehmung lokalisiert ist, sie konnten auch feststellen, dass selbst Bilder, in welchen Bewegungen nur implizit dargestellt wurden, die Bewegungsareale der Affen aktivierten. Anstatt die Neuronen zu *belauschen*, lassen sich diese auch mit elektrischen Signalen so stimulieren, dass man die Affen in ihrem Wahrnehmungsurteil beeinflussen kann und ihre Wahrnehmung gezielt auf ein bestimmtes Perzept lenkt (Britten et al., 1992; zitiert nach Block, 2005).

Durch solche Experimente lässt sich deutlich zeigen, dass man sehr wohl anhand spezifischer neuronaler Aktivitäten etwas über Wahrnehmungsphänomene aussagen und sie gegebenenfalls sogar auch beeinflussen kann (Block, 2005; Koch, 2005).

2.4.6. Emotionale Reize

Einen etwas anderen Ansatz verfolgen Kandel (2007) und seine Kollegen auf der Suche nach Zellaktivitäten, bezogen auf bewusst und unbewusst wahrgenommene Emotionen verschiedener Gesichter. Die Experimente zeigen, dass je nach Bewusstseinsgrad unterschiedliche Regionen der Amygdala aktiv sind. Ängstliche Gesichter aktivieren bei

unbewusster Wahrnehmung die Neuronen im basolateralen Kern bei Menschen mit einer relativ starken Hintergrundangst, während bei Menschen mit wenig Hintergrundangst keine Erregung des basolateralen Kerns zu finden ist. Werden die gleichen Gesichter bewusst wahrgenommen, wird die hintere Region der Amygdala aktiv, sie aktiviert dann über Umwege Regionen, welche für die Abwehrreaktionen zuständig sind.

Diese Ergebnisse zeigen zwei interessante Tatsachen. Erstens wird gezeigt, dass ein emotionaler Reiz sowohl bewusst als auch unbewusst vom Hirn verarbeitet werden kann, und zweitens bekräftigen sie die These von Crick und Koch, dass unbewusste und bewusste Wahrnehmungen mit spezifischen Hirnarealen einhergehen (Kandel, 2007).

3. Diskussion

Während sich ursprünglich nur die Philosophen mit dem Leib-Seele-Problem und der Existenz eines Bewusstseins beschäftigten, durchkreuzen die Fragen nach einer Erklärung unserer phänomenalen Wahrnehmung (vgl. Nagel, 1993; Searle, 2005; in Koch, 2005), dem Sein und dessen Entstehung, sämtliche Disziplinen der Wissenschaft. Biologen, Psychologen, Neurologen, Neurophilosophen, Physiker und viele mehr erforschen mittlerweile diese Fragen (Singer, 2002).

Ziel dieser Arbeit war es, sich dem *Bewusstsein* über einen biologisch-materialistischen Ansatz zu nähern, der, ausgehend von einer Arbeitshypothese, wie sie Crick und Koch 1990 formuliert und im Laufe der letzten 20 Jahre spezialisiert haben, einen Einblick in die Suche nach den *Neuronalen Korrelaten des Bewusstseins* und ihrer Identifizierung zu geben versucht.

Seit den 70er Jahren wurde in der Forschung zum Bewusstsein das Augenmerk vermehrt auf die biologischen Wurzeln mentaler Prozesse gerichtet, und Bewusstsein als ein natürliches Produkt der Evolution betrachtet (Engel, 2005). Es hat sich gezeigt, dass es sinnvoll ist, sich bei einem so komplexen Phänomen wie dem Bewusstsein in der Forschung auf greifbare und beobachtbare Einzelheiten zu beschränken (Churchland, 1997; Kandel, 2007; Koch, 2005). Das Bewusstsein als Ganzes oder als Form des Selbst-Bewusstseins zu betrachten, scheint derzeit keinen geeigneten Forschungsgegenstand darzustellen (Koch, 2005). Es wurde gezeigt, dass auf der einen Seite versucht wird dem Bewusstsein eine provisorische Struktur zu geben, indem man wie Churchland (1997) nach den bewusstseinsbeschreibenden Eigenschaften sucht, während auf der anderen Seite der Bewusstseinsbegriff in verschiedene Aspekte aufgeteilt wird, damit er genauer beschrieben und erforscht werden kann (Roth, 2007).

Das primäre Wahrnehmungsbewusstsein erwies sich schließlich als ein sinnvoller und umsetzbarer Untersuchungszugang, da hierbei in der Forschung auch auf höhere Tiere zurückgegriffen werden kann (Crick, 1994; Koch, 2005).

Die Suche nach den NCC hat gezeigt, dass Neuronale Korrelate der Wahrnehmung bestehen, die durch ihre ständige Aktivität jedoch nicht differenzierend genug sind. Hierbei handelt es sich um Aktivitäten im Hirnstamm und Thalamus, welche unabdingbare Voraussetzungen für eine bewusste Wahrnehmung sind (Roth, 2007). Diese minimalen Aktivitäten, welche notwendig sind, damit überhaupt Bewusstsein entstehen kann, zählt Koch (2005) zu den bewusstseinsermöglichenden Faktoren (NCC_e). Wirkliche Kandidaten der NCC sind für Koch die Pyramidenzellen und das Claustrum in der Großhirnrinde (Crick & Koch, 2005; Koch & Greenfield, 2008). Bezogen auf ein bestimmtes Perzept ließen sich auch Neuronen im Temporal- und Frontallappen finden, deren Spikeaktivitäten konstant mit dem bewussten Perzept korrelierten (Kreiman et al., 2002). Befunde zum primären visuellen Kortex schienen im Bezug auf die NCC hingegen keine eindeutigen Ergebnisse zu liefern, Koch (2005) rät daher davon ab, den primären visuellen Kortex den NCC zuzuschreiben.

Die bewusstseinskorrelierenden Spikeaktivitäten im Temporal- und Frontallappen, lassen sich vermutlich dadurch erklären, dass der IT und STS zuständig für unsere Assoziationsbildung ist, da sich dort Objektrepräsentationen befinden (Kiefer, 2002). Es handelt sich dabei um den ventralen Pfad, welcher für das Erkennen von Objekten zuständig ist. Während im V1 die visuelle Information retinotop organisiert und kaum verändert abgebildet ist, bekommt sie erst im IT ihre Bedeutung und kann damit bewusst werden. Die Aktivität im Frontallappen könnte in Verbindung mit unserem Arbeitsgedächtnis (Kiefer, 2002) und Aufmerksamkeitsprozessen (Roth, 2007) gebracht werden, welche wir benötigen um ein Objekt in unserem Aufmerksamkeitsfokus zu behalten.

Was die Methoden anbelangt, mit welchen nach den NCC geforscht wird, so handelt es sich bei Experimenten meistens um *binokularen Wettbewerb* und *Flash Suppression*, oder um Methoden, welche auf rückwärts oder vorwärts maskierte Stimuli, mit Präsentationszeiten im Millisekundenbereich, beruhen (Koch, 2005; Roth, 2007). Während die Probanden oder Affen visuelle und/oder kognitive Aufgaben erfüllen, wird mittels bildgebender Verfahren die Hirnaktivität aufgezeichnet.

Die häufigsten Beobachtungsverfahren basieren auf dieser Methode. In besonderen Fällen, zum Beispiel während eines chirurgischen Eingriffes bei Epilepsiepatienten, können auch per implantierter Mikroelektroden Einzelableitungen durchgeführt werden (Kreiman et al., 2002). Das sogenannte *Belauschen* der Neuronen ist örtlich wie auch zeitlich mit einer sehr genauen

Auflösung verbunden, jedoch ist die Anzahl der Probanden sehr beschränkt, weshalb gerne auf trainierte Makaken zurückgegriffen wird (Roth, 2007).

All diese Methoden zusammen haben insgesamt zu einem verbesserten Verständnis der Hirnaktivität beigetragen und stützen zum großen Teil die These von Crick und Koch, dass unbewusste und bewusste Wahrnehmung mit spezifischen Hirnarealen einhergehen (Kandel, 2007). Doch ob sich die NCC wirklich auf spezielle Zelltypen reduzieren lassen, wie es Koch (2008) in seinem Ansatz vorschlägt, bleibt noch eine offene Frage. Auch wenn viele Forschungsergebnisse darauf hindeuten, dass einzelne Hirnareale für bestimmte Bewusstseinszustände existieren, sind diese Resultate mit Vorsicht zu betrachten. Wissenschaftsbeiträge, welche ganzheitliche Theorien anstreben und hinter den NCC ein weit komplexeres Gebilde vermuten, deuten darauf hin, dass ein spezifisches Bewusstseinskorrelat oder ein einziges Bewusstseinszentrum nicht existieren kann (Edelman & Tononi, 2002; Gaillard et al., 2009; Koch & Greenfield, 2008).

Einig sind sich die Autoren bei den bewusstseinsermöglichenden Faktoren. Als zentrale Punkte seien hier Hirnstamm und thalamokortikales System genannt (Edelman & Tononi, 2002; Koch, 2005; Roth, 2007). Bewusstsein wird erst möglich, wenn unser System vom Hirnstamm die nötige Stimulation erfährt. Ähnliches gilt für das thalamokortikale System, kleinste Schädigungen können in diesem Bereich zu Bewusstseinsverlust führen.

Offen ist noch ob das Claustrum, wie es von Crick und Koch (2005) vorgeschlagen wurde, eine Art Dirigentenrolle im Hinblick auf Bewusstseinsprozesse einnimmt. Hierzu fehlen derzeit die passenden Beobachtungsverfahren.

Offene Fragen gibt es auch im Hinblick auf Bewusstseinszustände wie die einzelnen Schlafphasen, Narkose und Koma. Eine Theorie zu den NCC sollte auch diese Phänomene einordnen und erklären können (Tononi & Koch, 2008).

Abschließend muss gesagt werden, dass bis dato die NCC zwar theoretisch, aber nicht praktisch definiert werden konnten. Auch der Versuch, die NCC zu identifizieren, ist bisher gescheitert. Es konnten aber einige Eigenschaften herauskristallisiert werden, welche mit den NCC einhergehen. Darunter fällt ein ausreichendes Erregungsniveau der subcorticalen Hirnstrukturen, Neuronenaktivität im assoziative Kortex, speziell im Frontal- und Temporallappen. Die NCC weisen desweiteren eine synchrone Aktivität auf und müssen so beschaffen sein, dass sie ein Netzwerk über dem gesamten Kortex aufspannen können. Vermutlich werden in Zukunft kombinierte und weiterentwickelte bildgebende Verfahren, so wie psychologische und neurowissenschaftliche Theorien von Nöten sein, um schließlich neue Einblicke und Denkanstöße im Hinblick auf Gehirn und Bewusstsein zu ermöglichen.

Nichtsdestotrotz ist es beachtenswert, zu welchen Ergebnissen und Forschungsanstößen die Bewusstseinsforschung in den letzten 20 Jahren geführt hat. Doch es sei auch zur Vorsicht gemahnt. Mit dem technischen Fortschritt wird auch das Wissen bezüglich unseres Gehirns und seiner Funktionen steigen und damit gleichzeitig die Verantwortung, wie wir mit diesem Wissen umzugehen haben, was uns vor ganz neue moralische Aufgaben stellen wird.

4. Literaturverzeichnis

- Block, N. (2005). Two neural correlates of consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 46-52.
- Churchland, P. (1997). *Die Seelenmaschine : eine philosophische Reise ins Gehirn*. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Cowey, A. & Stoerig, P. (1995). Blindsight in monkeys. *Nature*, 373, 247-249.
- Crick, F. (1994). *Was die Seele wirklich ist: die naturwissenschaftliche Erforschung des Bewusstseins*. München: Artemis und Winkler.
- Crick, F. & Koch, C. (1990). Towards a neurobiological theory of consciousness. *Seminars in The Neurosciences*, 2, 263-275.
- Crick, F. & Koch, C. (1992). Das Problem des Bewusstseins. In S. Wolf (Hrsg.), *Gehirn und Bewusstsein* (S. 162-170). Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Crick, F. & Koch, C. (2005). What is the function of the claustrum? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360, 1271–1279.
- Edelman, G. & Tononi, G. (2002). *Gehirn und Geist : Wie aus Materie Bewusstsein entsteht*. München: Beck.
- Engel, A. K., Fries, P., König, P., Brecht, M., & Singer, W. (1999). Temporal binding, binocular rivalry, and consciousness. *Consciousness and Cognition*, 8, 128-151.
- Engel, A. K. (2005). Neuronale Synchronisation und Wahrnehmungsbewusstsein. In C. Herrmann, M. Pauen, J. Rieger, & S. Schicktanz (Hrsg.), *Bewusstsein - Philosophie, Neurowissenschaften, Ethik* (S. 216-241). München: Wilhelm Fink Verlag.
- Gaillard, R., Dehaene, S., Adam, C., Clémenceau, S., Hasboun, D., Baulac, M. et al. (2009). Converging Intracranial Markers of Conscious Access. *PLoS Biology*, 7, e1000061
- Horgan, J. (1994). Ist das Bewußtsein erklärbar? *Spektrum der Wissenschaft*, 74-80.
- Kandel, E. (2007). *Auf der Suche nach dem Gedächtnis : die Entstehung einer neuen Wissenschaft des Geistes*. (1. Aufl.). München: Pantheon.
- Kiefer, M. (2002). Bewusstsein. In J. Müsseler & W. Prinz (Hrsg.), *Allgemeine Psychologie* (S. 179-222). Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Koch, C. (2005). *Bewusstsein, ein neurobiologisches Rätsel* (1. Aufl.). München; Heidelberg: Elsevier, Spektrum Akad. Verl.
- Koch, C. & Greenfield, S. (2008). Wie geschieht Bewusstsein? *Spektrum der Wissenschaft*, (1), 42-49.

- Kreiman, G. (2001). *On the neuronal activity in the human brain during visual recognition, imagery and binocular rivalry*. Unpublished doctoral dissertation. California Institute of Technology.
- Kreiman, G., Fried, I. & Koch, C. (2002). Single-neuron correlates of subjective vision in the human medial temporal lobe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99, 8378–8383.
- Logothetis, N. K. (1998). Single units and conscious vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 353, 1801–1818.
- Rees, G. (2007). Neural correlates of the contents of visual awareness in humans. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362 (1481), 877–886.
- Roth, G. (1999). Entstehen und Funktion von Bewußtsein. *Deutsches Ärzteblatt*, 96 (30), A-1957–1961.
- Roth, G. (2002). Gleichtakt im Neuronennetz. *Gehirn & Geist*, 1, 38-46.
- Roth, G. (2007). *Persönlichkeit, Entscheidung und Verhalten : warum es so schwierig ist, sich und andere zu ändern* (2. Aufl.). Stuttgart: Klett-Cotta.
- Singer, W. (2002). *Der Beobachter im Gehirn : Essays zur Hirnforschung* (1. Aufl.). Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Thompson, R. F. (2001). *Das Gehirn: Von der Nervenzelle zur Verhaltenssteuerung* (3. Aufl.). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Tononi, G. & Koch, C. (2008). The Neural Correlates of Consciousness: An Update. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124.