

# Gehirn und Bewusstsein: Neurobiologische Grundlagen

## Brain and Consciousness: Neurobiological Foundations

Gerhard Roth

### 1 Einleitung

Die Frage nach dem Wesen, der Herkunft und der Funktion von Bewusstsein und Geist hat die Menschen beschäftigt, seit es Philosophie und Wissenschaften gibt; entsprechend unterscheiden sich die Antworten zum Teil radikal voneinander. Traditionell werden Bewusstsein und Geist als etwas angesehen, das sich von den Phänomenen und Geschehnissen der „materiellen“ Welt wesensmäßig unterscheidet (*ontologischer Dualismus*; vgl. Eccles, 1994); danach entzieht sich Bewusstsein grundsätzlich der Erklärung durch die empirischen Wissenschaften. Für andere entspringen Bewusstseinszustände direkt bestimmten Hirnmechanismen und/oder Hirnprozessen und lassen sich auf diese reduzieren (*neurobiologischer Reduktionismus*; vgl. Churchland, 1997). Für wieder andere entspringt Bewusstsein zwar den Hirnfunktionen und existiert nicht ohne sie, ist jedoch in seinen Phänomenen und Gesetzmäßigkeiten nicht (vollständig) auf sie zurückführbar (*Emergentismus*; vgl. Chalmers, 1996). Insbesondere das ausschließlich private Erleben von Bewusstsein („phänomenales Bewusstsein“) wird als unüberwindliches Hindernis angesehen („fundamentale Erklärungslücke“; vgl. Pauen & Stephan, 2002).

### 2 Empirische Bewusstseinsforschung

Neurobiologen und Psychologen weisen darauf hin, dass zum Bewusstsein neben dem rein subjektiven Erleben zumindest beim Menschen (1) die sprachliche Berichtbarkeit gehört, (2) unterschiedliche Bewusstseinszustände anhand von unterschiedlichen Reaktionsweisen und Verhaltensleistungen (z. B. beim Lösen von Problemen) relativ verlässlich erkannt werden können und (3) Störungen unterschiedlicher Hirnfunktionen zu charakteristischen Störungen kognitiver, emotionaler und motorischer Leistungen führen, die Bewusstsein (z. B. in Form von Aufmerksamkeit und Berichtbarkeit) erfordern.

**Merke:**

Neurobiologische Bewusstseinsforschung beruht auf der Annahme, dass sich bei Tieren und Menschen unterschiedliche Bewusstseinszustände verlässlich in unterschiedlichen kognitiven Leistungen und Verhaltensreaktionen, beim Menschen zusätzlich in bestimmten sprachlichen Äußerungen ausdrücken. Diese können dann mit bestimmten Hirnstrukturen und deren Aktivitäten in Verbindung gebracht werden.

Auf diesen drei objektiv zugänglichen Aspekten von Bewusstsein baut die *empirische Bewusstseinsforschung* auf. Sie hat neben der Verfeinerung kognitionspsychologischer und neuropsychologischer Testverfahren und der Elektroenzephalographie (EEG) vor allem durch die Entwicklung moderner Bildgebungstechniken (vornehmlich Positronenemissionstomographie, PET, funktionelle Magnetresonanztomographie, fMRI, und Magnetenzephalographie, MEG) große Fortschritte erlebt. Diese Techniken erlauben es, insbesondere in Kombination, die Aktivität des intakten menschlichen Gehirns mit guter räumlicher und zeitlicher Auflösung zu registrieren.

Insgesamt zeigt sich, dass bestimmte Bewusstseinszustände und bestimmte Hirnvorgänge *untrennbar* miteinander verbunden sind, angefangen von einfachen Wahrnehmungsprozessen bis hin zu Zuständen des Dafürhaltens und Wissens. Ebenso lässt sich mithilfe der Kombination des EEG oder MEG mit fMRI zeigen, dass allen Bewusstseinszuständen bestimmte unbewusste Prozesse zeitlich (meist 300 Millisekunden oder länger) und in systematischer Weise vorhergehen (Noeselt et al., 2002). Weiterhin lässt sich zeigen, dass corticale Stimulation eine Mindestdauer und eine Mindeststärke und die Inhalte eine bestimmte inhaltliche Prägnanz besitzen müssen, um bewusst zu werden. Man kann entsprechend in vielen Fällen nicht nur verlässlich von bestimmten Hirnstörungen auf bestimmte Bewusstseinsstörungen schließen und umgekehrt, sondern man kann auch bei Manipulation spezifischer neuronaler Mechanismen das Auftreten oder Nichtauftreten von Bewusstseinszuständen vorhersagen.

**Merke:**

Bewusstseinszustände sind untrennbar an bestimmte Hirnstrukturen und -prozesse gebunden. Diese legen die Rahmenbedingungen fest, innerhalb derer bestimmte Inhalte überhaupt bewusst werden können. Hierzu gehören eine Mindestdauer und Mindeststärke der Erregung der Großhirnrinde (Cortex) und eine bestimmte Prägnanz des Inhalts.

### 3 Phänomenologie des Bewusstseins

Bewusstsein tritt in einer Vielzahl unterschiedlicher Zustände auf. Die allgemeinste Form von Bewusstsein ist der Zustand der Wachheit oder *Vigilanz*. *Wachheit* ist meist mit konkreten Inhalten verbunden (Roth, 2003). Diese können sein:

- a) Sinneswahrnehmungen von Vorgängen in der Umwelt und im eigenen Körper,
- b) mentale Zustände und Tätigkeiten wie Denken, Vorstellen und Erinnern,
- c) Selbst-Reflexion,
- d) Emotionen, Affekte, Bedürfniszustände,
- e) Erleben der eigenen Identität und Kontinuität,
- f) „Meinigkeit“ des eigenen Körpers,
- g) Autorschaft und Kontrolle der eigenen Handlungen und mentalen Akte, Willenszustände,
- h) Verortung des Selbst und des Körpers in Raum und Zeit,
- i) Realitätscharakter von Erlebtem und Unterscheidung zwischen Realität und Vorstellung.

Einige dieser Zustände, z. B. die unter e) bis i) genannten, bilden zusammen eine Art „Hintergrundbewusstsein“, vor dem die unter a) bis d) genannten spezielleren Bewusstseinszustände mit wechselnden Inhalten und Intensitäten und in wechselnder Kombination auftreten.

### 4 Bewusstseinsstörungen und Modularität des Bewusstseins

Diese verschiedenen Inhalte von Bewusstsein können nach Schädigungen bestimmter Gehirnteile, insbesondere solcher der assoziativen Großhirnrinde (s. u.), mehr oder weniger unabhängig voneinander ausfallen. So gibt es Patienten, die völlig normale geistige Leistungen vollbringen, jedoch glauben, dass der sie umgebende Körper nicht der ihre ist bzw. dass bestimmte Körperteile nicht zu ihnen gehören. Andere wiederum besitzen bei sonstigen intakten Bewusstseinsfunktionen keine autobiografische Identität. Dies deutet auf eine „modulare“, d. h. räumlich und funktional getrennte Organisation der Bewusstseinsinhalte hin. Eine Steigerung konkreter Bewusstseinszustände, die mit erhöhten und gleichzeitig räumlich, zeitlich und inhaltlich eingeschränkten (*fokussierten*) Sinnesleistungen oder mentalen Zuständen (*Konzentration*) einhergeht, ist → *Aufmerksamkeit*.

Zu abnormen Bewusstseinszuständen zählen → *Agnosie*, d. h. die teilweise oder gänzliche Unfähigkeit, bestimmte Wahrnehmungsinhalte bewusst wahrzunehmen (z. B. von Gesichtern, Farben, Objektbewegungen), → *Neglect* bzw. *Hemineglect*,

d. h. das Nichtbeachten von Teilen der Umwelt oder des eigenen Körpers (z. B. der linken Gesichts- oder Körperhälfte), → *Anosognosie*, d. h. das Leugnen von Fehlleistungen und Erkrankungen im Bereich der Wahrnehmung, des Körperschemas und der Handlungen, *Blindsehen (blindsight)*, d. h. der Zustand, dass Patienten bestimmte visuell gesteuerte Aufgaben vollbringen können, ohne sich dessen bewusst zu sein, *Bewusstseinspaltungen* bei Schizophrenen oder bei Patienten mit durchtrenntem Balken, bei denen die linke und die rechte Großhirnhemisphäre unterschiedliche Bewusstseinszustände haben können.

**Merke:**

Bewusstsein ist modular aufgebaut, d. h. es enthält unterschiedlichste Inhalte, die z. T. voneinander getrennt verarbeitet werden und ausfallen können (*Agnosien*). Man unterscheidet hierbei Zustände des Aktualbewusstseins von Formen des Hintergrundbewusstseins.

## 5 Arbeitsgedächtnis und „Enge des Bewusstseins“

Eine besondere Rolle beim Bewusstsein spielt das *Arbeitsgedächtnis*. Es hält für wenige Sekunden einen bestimmten Teil der Wahrnehmungen und damit verbundener Gedächtnisinhalte und Vorstellungen im Bewusstsein und konstituiert damit den charakteristischen „Strom des Bewusstseins“. Man nimmt an, dass das Arbeitsgedächtnis Zugriff zu den unterschiedlichen, in aller Regel unbewusst arbeitenden Sinnes-, Gedächtnis- und Handlungssteuerungssystemen hat, die in anderen Teilen des Gehirns lokalisiert sind, und nach bestimmten Kriterien Informationen aus diesen Systemen „einlädt“. Diese werden dann aktuell bewusst. Das Arbeitsgedächtnis ist offenbar für die subjektiv empfundene „Enge“ und „Linearität“ des Bewusstseins („Strom des Bewusstseins.“) verantwortlich. Umstritten ist, ob diese Enge und Beschränkung aus der begrenzten Kapazität des Arbeitsgedächtnisses selbst herrührt oder aus der zeitlichen und/oder inhaltlichen Beschränktheit des Zugriffs und Abrufens von Informationen aus den Sinnes-, Gedächtnis- und Handlungssteuerungssystemen.

**Merke:**

Das im präfrontalen Cortex angesiedelte Arbeitsgedächtnis wird als Sitz bzw. Träger des „Stroms des Bewusstseins“ angenommen.

## 6 Bewusste und unbewusste Informationsverarbeitung

Idealtypisch werden zwei Systeme der Informationsverarbeitung unterschieden, ein bewusst und ein unbewusst ablaufendes System. Das erste, auch *explizites* oder *deklaratives System* genannt, arbeitet überwiegend seriell, langsam (d. h. im

Bereich von Sekunden und Minuten) und „mühevoll“, ist in seiner Kapazität beschränkt und fehleranfällig, seine Informationsverarbeitung ist „tief“, d. h. auf die Verarbeitung komplexer und bedeutungshafter Inhalte ausgerichtet, es ist flexibel und kann entsprechend neue oder neuartige Leistungen vollbringen.

Das zweite, unbewusst ablaufende System, auch *implizites, prozedurales* oder *nicht deklaratives System*, genannt, ist in seiner Kapazität nahezu unbeschränkt, arbeitet überwiegend parallel, schnell und weitgehend fehlerfrei. Es ist in seiner Informationsverarbeitung „flach“, d. h. es verarbeitet Informationen anhand einfacher Merkmale oder Bedeutungen und ist relativ unflexibel bzw. variiert innerhalb vorgegebener Alternativen. Es ist außerdem nicht an Sprache gebunden bzw. einer sprachlich-bewussten Beschreibung nicht zugänglich. Hierunter fällt alles, was mit *implizitem Lernen* zu tun hat, mit Objektidentifikation anhand äußerlicher Merkmale, Einüben durch langwierige Praxis, unbewusster Imitation, Gruppierung nach Ähnlichkeiten, Erfassen einfacher Regeln.

Zwischen beiden Systemen bestehen beliebig feine Übergänge. Die Leistungen und Fertigkeiten aus dem expliziten System sinken gewöhnlich mit zunehmender Vertrautheit und Übung in das implizite System ab, können mit entsprechendem Aufwand jedoch zumindest teilweise wieder explizit gemacht werden.

**Merke:**

Bewusstseinszustände zeichnen sich gegenüber unbewussten Zuständen als Form der sprachlich berichtbaren, flexiblen, detailreichen, fehleranfälligen und ressourcenabhängigen Informationsverarbeitung aus. Sobald bestimmte Leistungen automatisiert werden, entziehen sie sich zunehmend der detaillierten Bewusstwerdung.

## 7 Bewusstseinsrelevante Hirnstrukturen

Am Entstehen von Bewusstsein wirken stets viele Hirnzentren mit, die über das ganze Gehirn verteilt sind; es gibt kein „oberstes Bewusstseinszentrum“. Allerdings können Geschehnisse uns nur dann bewusst werden, wenn sie von Aktivität der *assoziativen Großhirnrinde* begleitet sind, d. h. dem hinteren und unteren Scheitellappen (parietaler Cortex), dem mittleren und unteren Schläfenlappen (temporaler Cortex) und dem Stirnlappen (Frontallappen; präfrontaler Cortex) (Übersicht in Roth, 2000). Alles, was *nicht* in der assoziativen Großhirnrinde abläuft, ist uns nach gegenwärtigem Wissen grundsätzlich nicht bewusst.

Der hintere und untere *Scheitellappen* hat linksseitig mit symbolisch-analytischer Informationsverarbeitung zu tun (Mathematik, Sprache, Bedeutung von Zeichnungen und Symbolen); der rechtsseitige Scheitellappen ist befasst mit realer und

vorgestellter räumlicher Orientierung, mit räumlicher Aufmerksamkeit und Perspektivwechsel. Im Scheitellappen sind unser Körperschema und die Verortung unseres Körpers im Raum lokalisiert; auch trägt er zur Planung und Vorbereitung von Bewegungen bei. Der obere und mittlere *Schläfenlappen* umfasst komplexe auditorische Wahrnehmung einschließlich Sprache. Der untere Schläfenlappen ist wichtig für komplexe visuelle Informationsverarbeitung nicht räumlicher Art, das Erfassen der Bedeutung und korrekten Interpretation von Objekten, Gesichtern usw. sowie von ganzen Szenen. Der *präfrontale Cortex* (PFC) ist in seinem oberen, dorsolateralen Teil vornehmlich ausgerichtet auf Ereignisse und Probleme in der Außenwelt, insbesondere hinsichtlich deren zeitlicher Reihenfolge und ihrer Relevanz bzw. Lösung (Förstl, 2002; Fuster, 2002). Dort befindet sich auch das Arbeitsgedächtnis (s. o.). Der untere, *orbitofrontale PFC* hat demgegenüber zu tun mit Sozialverhalten, ethischen Überlegungen, divergentem Denken, Risikoabschätzung, Einschätzung der Konsequenzen eigenen Verhaltens, Gefühlsleben und emotionaler Kontrolle des Verhaltens.

Bei Aufmerksamkeit und anderen von Bewusstsein begleiteten kognitiven Zuständen wie Fehlerkorrektur und Handlungsentscheidung, aber auch bei der Schmerzempfindung spielt der an der Innenseite des Stirnhirns liegende *vordere Gyrus cinguli* eine wichtige Rolle. Er ist ein Bindeglied zwischen der übrigen Großhirnrinde und den an der Entstehung von Bewusstsein beteiligten, aber völlig unbewusst arbeitenden subcorticalen Zentren im Endhirn selbst (vor allem Hippocampus und Amygdala), im Zwischenhirn (intralaminäre Kerne, Nucleus reticularis thalami) sowie im Hirnstamm (Formatio reticularis).

Die vom verlängerten Mark über die Brücke bis zum vorderen Mittelhirn sich hinziehende *Formatio reticularis* (FR) kontrolliert Atmung und Blutkreislauf, Schlafen und Wachen sowie Bewusstsein und Aufmerksamkeit. Schon kleine Verletzungen führen zu tiefer Bewusstlosigkeit. Kerne der *medialen* Kerngruppe der FR bilden das *aufsteigende aktivierende System*. Sie erhöhen über Umschaltstellen im Thalamus (intralaminäre Kerne) den generellen Erregungszustand der Großhirnrinde. Die *mediane* Kerngruppe enthält den serotonergen dorsalen Raphekern mit Verbindungen zur Amygdala, zum Hippocampus sowie zu den assoziativen Bereichen der Großhirnrinde. Das serotonerge System erzeugt den Zustand entspannter Zufriedenheit und Beruhigung. In der *lateralen* Kerngruppe liegt der noradrenerge *Locus coeruleus*. Er weist dieselben Verbindungen mit Bereichen des Zwischenhirns und des Endhirns auf wie der dorsale Raphekern. Das noradrenerge System erzeugt eine unspezifische Erregtheit, Aufmerksamkeit und Verhaltensbereitschaft (Roth & Dicke, 2005b).

Eine wichtige Rolle bei der Steuerung des Aufmerksamkeitsbewusstseins, des Kurzzeitgedächtnisses und des Erfassens bedeutungshafter Ereignisse spielt das *basale Vorderhirn*. Mit seinen cholinergen Projektionsfasern ist es in der Lage,

die Aktivität umgrenzter Regionen der Hirnrinde gezielt zu verstärken oder abzuschwächen. Das basale Vorderhirn hat enge Beziehungen zur *Formatio reticularis* sowie zu limbischen Zentren wie Hippocampus und Amygdala (Roth & Dicke, 2005b).

Der *Hippocampus* liegt auf der Innenseite des Schläfenlappens und wird als Organisator des Wissensgedächtnisses (*deklaratives Gedächtnis*) angesehen, dessen Inhalte in der Großhirnrinde niedergelegt sind, und zwar an unterschiedlichen Orten je nach Art und Inhalt des Gedächtnisses. Der Hippocampus ist hiermit eine wichtige Kontrollstation für den Zugang von Gedächtnisinhalten zum Bewusstsein. Neuere Untersuchungen weisen ihm eine zentrale Rolle beim Prozess der „Verdrängung“ bestimmter Inhalte aus dem Bewusstsein zu (Anderson et al., 2004).

**Merke:**

Für das Entstehen von Bewusstseinszuständen ist die Aktivität assoziativer Areale der Großhirnrinde, insbesondere des präfrontalen und temporalen Cortex unerlässlich. Notwendig ist zudem die Interaktion des assoziativen Cortex mit primären sensorischen und motorischen Cortexarealen, dem Hippocampus (Organisator des deklarativen Gedächtnisses), subcorticalen limbischen Zentren wie Gyrus cinguli, basales Vorderhirn, Amygdala und Nucleus accumbens (Aufmerksamkeit, Emotionen) sowie der retikulären Formation des Hirnstamms (Wachheit, sensorische Filterung, unspezifische Aufmerksamkeit).

## 8 Neuronale Grundlagen des Bewusstseins

Während der Bewusstseinszustände finden nach gegenwärtiger Anschauung Umstrukturierungen bereits vorhandener corticaler *neuronaler Netzwerke* aufgrund von Sinnesreizen und Gedächtnisinhalten statt, und zwar durch eine schnelle Veränderung synaptischer Übertragungsstärken. Hierbei spielen die Neuromodulatoren Serotonin, Dopamin, Noradrenalin und Acetylcholin eine wichtige Rolle, die im Sekundentakt arbeiten. Derartige schnelle Reorganisationsprozesse sind stoffwechselintensiv und führen an den Synapsen zu einem überdurchschnittlichen Verbrauch an Glucose und Sauerstoff, was wiederum den lokalen corticalen Blutfluss erhöht. Dies macht man sich bei bildgebenden Verfahren wie Positronenemissionstomographie (PET) oder funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) zu Nutze.

Es wird von einigen Neurobiologen vermutet, dass bestimmte Typen von Synapsen (z. B. NMDA-Synapsen) eine wichtige Rolle bei der schnellen „Umverdrahtung“ spielen (Flohr, 2002); ebenso wird angenommen, dass oszillatorische Akti-

vität von Netzwerken und die wechselseitige Synchronisation neuronaler Felder eine Grundlage von Aufmerksamkeitsbewusstsein darstellen (Crick & Koch, 2003). Eine wichtige Funktion beim Bewusstwerden von Wahrnehmungsinhalten scheint die simultane oder sequenzielle Aktivierung primärer und assoziativer corticaler Areale einzunehmen, und zwar durch eine Kombination aufsteigender und absteigender, d. h. rückkoppelnder Verbindungen zwischen Cortexarealen. Entsprechend bleiben sensorische Erregungen unbewusst, wenn sie ausschließlich aufsteigende Verbindungen aktivieren und nicht zu Rückwirkungen assoziativer Areale auf primäre Areale führen (Lamme, 2000).

Generell scheint für das Entstehen von Bewusstsein als „Innenperspektive“ die ungeheure Binnenverdrahtung der Großhirnrinde eine wichtige Rolle zu spielen, die die Zahl der Ein- und Ausgänge um mehrere Größenordnungen übersteigt (Roth, 2003). Dies bedeutet, dass die Großhirnrinde sich im Wesentlichen „mit sich selbst“ beschäftigt und dass die Einflüsse von „außen“ einen eher modulierenden und nicht dominierenden Effekt auf die Aktivität des Cortex haben. Dies könnte die exklusive „Selbst-Zugänglichkeit“ von Bewusstsein erklären. Darüber hinaus gibt es in der Großhirnrinde deutliche „Integrations-“ oder „Konvergenzzentren“, vor allem im oberen und unteren Temporallappen, im supplementär-motorischen Areal und im präfrontalen Cortex, welcher Sitz des Arbeitsgedächtnisses ist. Dies könnte die Grundlage *höherstufiger* Repräsentationen („Meta-Repräsentationen“) sein, wie sie für Bewusstsein charakteristisch ist (z. B. im Zusammenhang mit dem Gewahrwerden von Erlebnisinhalten und Selbst-Reflexion).

**Merke:**

Es wird diskutiert, dass Bewusstsein an spezifische neuronale Mechanismen gebunden ist wie multimodale integrative corticale Prozesse, oszillatorisch-synchronisatorische Prozesse im Cortex bzw. zwischen Cortex und Thalamus, corticale Rückkopplungssysteme und spezielle synaptische Verknüpfungsmechanismen wie NMDA-Synapsen.

## 9 Die Bedeutung neurobiologischer Befunde für das philosophische Problem des Bewusstseins

Wie festgestellt, sind Bewusstseinszustände und Hirnprozesse untrennbar miteinander verbunden; ebenso gehen unbewusste Prozesse in eindeutiger Weise Bewusstseinszuständen voraus und legen die Rahmenbedingungen für das Bewusstwerden bestimmter Inhalte fest. Während Ersteres mit einem *interaktiven Dualismus* vereinbar wäre, spricht Letzteres eindeutig zu Gunsten der Annahme, dass Bewusstseinszustände aufgrund spezifischer hirnanatomischer und -physio-