

Neuronale Korrelaten des Bewusstseins

## Das einfache Problem des Bewusstseins: schwer genug

Ein zentraler Bereich der Erforschung unseres Bewusstseins ist die Suche nach neuronalen Korrelaten des Bewusstseins. Man sucht dabei nach Strukturen und Prozessen im Gehirn, die mit bewusstem Erleben in Beziehung stehen.

Ein Workshop des Jungen Kollegs der Akademie befasste sich mit diesem jungen Zweig der Neurowissenschaften.

VON VICTOR SPOORMAKER

NEUROWISSENSCHAFTLICHE Studien zu den neuronalen Korrelaten des Bewusstseins konzentrierten sich in den vergangenen Jahren zunehmend auf veränderte Bewusstseinszustände wie Schlaf, Anästhesie und Koma.

Das Ziel des Workshops „Neural Correlates of Consciousness: Functional Neuroimaging of Sleep and Anesthesia“ am 28. Februar 2014 in der Akademie war es, verschiedene theoretische Ansätze und bildgebende Verfahren vorzustellen – von hochauflösender Elektroenzephalographie (EEG) bis zu funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT). Sprecher aus verschiedenen Fachgebieten (Philosophie, Psychologie, Neurologie, Physik und Mathematik) diskutierten über die einzelnen Methoden und Befunde.



### Das „einfache“ versus „schwere“ Problem des Bewusstseins

Das erste Thema des Tages war ein philosophisches Problem, das auch das „schwere“ Problem des Bewusstseins genannt wird. Es wurde erstmals von dem Philosophen David Chalmers benannt und beschreibt das Problem der subjektiven Erfahrung: Auch wenn wir eines Tages alles über die kognitiven Prozesse und die neuronalen Korrelate des Bewusstseins wüssten, würde dies noch immer nicht erklären, warum Menschen eine subjektive Erfahrung haben – warum also die Erfahrung eine subjektive Komponente hat. Aber schon das „einfache“ Problem des Bewusstseins, also wie und durch welche neuronalen Systeme sensorische Informationen überhaupt verarbeitet werden, ist nur in der Theorie „einfach“. Für Neurowissenschaftler ist es eine harte Nuss, die es noch zu knacken gilt.

ABB.: NAEBY'S / FOTOLIA.COM



**Bottom-up- versus Top-down-Ansätze**

Mit dieser Einschränkung im Hinterkopf lautet die nächste Frage, wie das „einfache“ Problem des Bewusstseins gelöst werden sollte. Manche Philosophen und Psychologen bevorzugen einen Top-down-Ansatz: Dabei wird ein Konstrukt wie das Bewusstsein erst einmal konzeptionell beschrieben und definiert. Danach folgen einzelne Untergliederungen aus der Konzeption und können bezüglich kognitiver und neuronaler Korrelate untersucht werden. Immer mehr Experimentalpsychologen und Neurowissenschaftler sind mit diesem Ansatz jedoch nicht einverstanden, da Bewusstsein derzeit ein breites und manchmal unpräzise definiertes Konstrukt ist, das zu viele vage Konzepte und Phänomene enthält, um strikt an den Definitionen festhalten zu können. Hinzu kommt, dass für die Untersuchung der neuronalen Korrelate ein strikt definiertes Konzept wenig bringt, denn entweder sind Gehirnareale oder -netzwerke mit einem Konzept verknüpft oder nicht, und das sagt Wissenschaftlern wenig über die Genauigkeit und Nützlichkeit des Konzeptes.

Im Gegensatz dazu wird der Bottom-up-Ansatz wohl Auskunft über die Prozesse und Konzepte geben können, da man aufgrund von kognitiver und neuronaler Verarbeitung mehr über eine (möglicherweise) mit Bewusstsein verknüpfte Funktion lernen kann. Hier kann als neurowissenschaftliches Beispiel die Gedächtnis-Rekonsolidierung dienen: Neurobiologische Tierstudien haben gezeigt, dass das Gedächtnis in einen labilen Zustand gebracht werden kann, wonach auch die langfristige Konsolidierung blockiert werden könnte. Aufgrund dieser sehr dynamischen und plastischen neurobiologischen

Abb. 2 (unten): A) Eine weit verbreitete Theorie besagt, dass das Bewusstsein der Kapazität eines Systems zur Informationsintegration entspricht. Die Informationsintegration ist in einem Netzwerk wie dem links optimal, da ein solches Netzwerk sowohl Daten integrieren kann (also gut verknüpft ist) als auch spezialisiert ist (also unterschiedliche Subsysteme unterstützen kann). Die Komplexität, hier ausgedrückt durch  $\Phi$ , ist hoch. Ein Verlust der Informationsintegration kann durch fehlende Spezialisierung stattfinden (mittleres Bild), zugleich ist das Netzwerk aber immer noch gut verknüpft. Die Komplexität jedoch ist niedrig, da das Netzwerk nach einer äußeren Störung nur wenige unterschiedliche Zustände annehmen kann. Eine geringe Fähigkeit zur Informationsintegration kann auch auf fehlender Integration basieren. Das rechte Bild zeigt ein stark spezialisiertes Netzwerk, das aber nicht mehr gut verknüpft ist. Auch hier ist die Komplexität niedrig.

B) „Smallworldness“ ist eine weitere praktische Art, die Topologie eines Netzwerkes zu klassifizieren. Hierbei berechnet man auf Grund der Verknüpfungen zwischen Knoten das lokale „Clustering“ (also wie stark die Nachbarn eines Knoten miteinander verknüpft sind) und die Pfadlänge, ein Maß für Effizienz (also wie schnell man von einem Knoten zu einem anderen Knoten kommt). Wenn das Clustering hoch ist, aber die Pfadlänge gering (links), hat man ein System, in dem die Nachbarn gut miteinander verknüpft sind, aber es viele Schritte bräuchte, bevor eine Information auf der anderen Seite ankommt – ein sog. reguläres Netzwerk. Bei einem zufälligen (random) Netzwerk (rechts) ist das lokale Clustering zwar minimal, aber die Pfadlänge kurz – man kommt also schnell an die andere Seite des Netzwerkes, allerdings kann Information zwischen direkten benachbarten Knoten kaum ausgetauscht werden. Falls man im regulären Netzwerk (links) nur einige Verknüpfungen neu verlegt, erhält man eine „small world“-Topologie (mittleres Bild), wobei man sowohl eine hohe lokale Verknüpfung benachbarter Knoten als auch einige wenige Verknüpfungen zwischen weit entfernten Knoten hat. Diese Organisation stellt ein hohes Maß an Netzwerk-Effizienz mit minimalen Verknüpfungskosten dar.

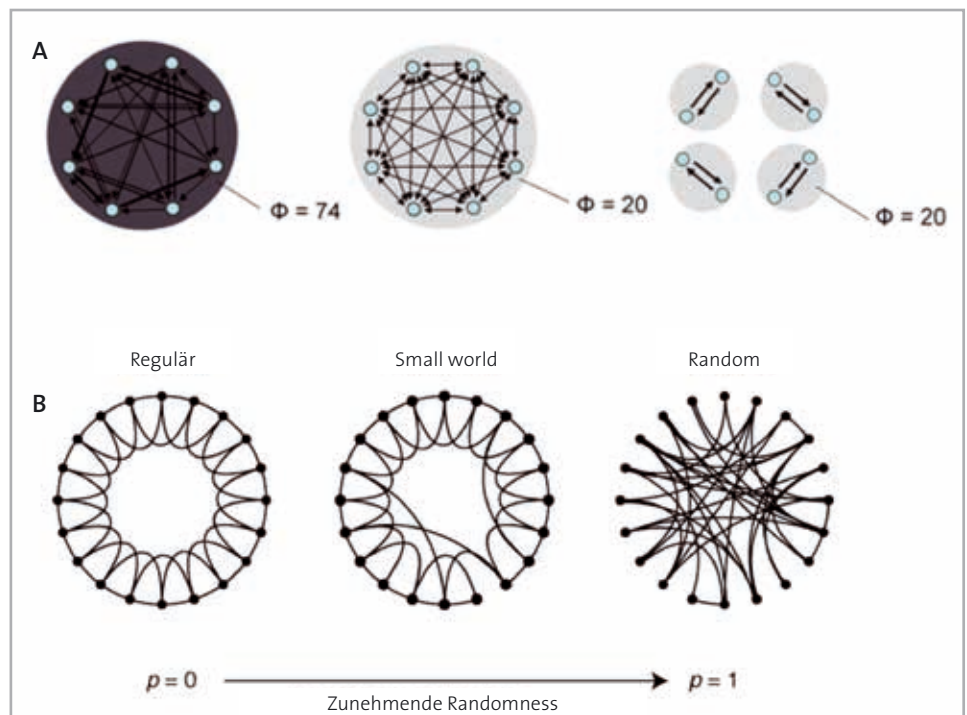


ABB. AUS: D. J. WATTS, S. H. STROGATZ, COLLECTIVE DYNAMICS OF SMALL-WORLD NETWORKS, NATURE, 393:440-2, 1998 / MACMILLAN PUBLISHERS LTD.

Realität mussten frühere Annahmen über die Funktionsweise des Gedächtnisses angepasst werden. Die neurobiologische Dynamik sollte man auch bei anderen kognitiven Konzepten wie etwa dem Bewusstsein im Auge behalten, denn es kann gut sein, dass uns ein Bottom-up-Ansatz letztendlich zu einem ganz neuen Verständnis von Bewusstsein bringen kann.

**Bewusste Wahrnehmung versus Bewusstseinszustände**

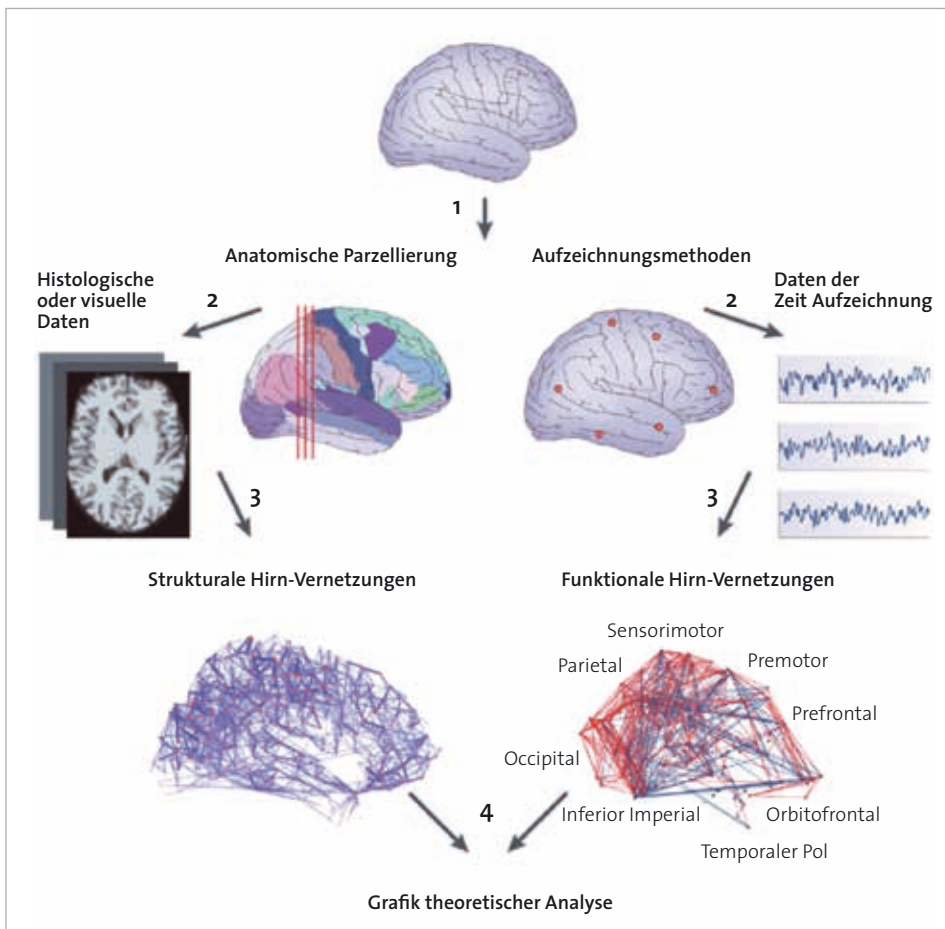
Den Bottom-up-Ansatz bevorzugen viele Neurowissenschaftler, die sich mit bewusster Wahrnehmung beschäftigen, beispielsweise damit, ob ein visueller Stimulus bewusst oder unbewusst (implizit, automatisch) wahrgenommen wird – etwa bei der so genannten Rindenblindheit oder bei der unterschweligen (subliminalen) Wahrnehmung. Dieses Gebiet der neurowissen-

schaftlichen Bewusstseinsforschung ist heute bereits umfassender und weiter entwickelt als das Gebiet, das sich mit Bewusstseinszuständen wie Schlaf, Koma usw. beschäftigt.

Ein Vortrag des Workshops stellte die jüngsten Wahrnehmungsstudien vor, mit einem Schwerpunkt auf der Trennung des Bewusstseins selbst von den Voraussetzungen für Bewusstsein und den Folgen. Viele Studien nutzen so genannte Kontrast-Analysen, bei denen bewusst wahrgenommene Stimuli mit nicht bewusst wahrgenommenen Stimuli verglichen werden. Ein solcher Kontrast ergibt jedoch nicht die destillierten neuronalen Korrelate des Bewusstseins, sondern zeigt lediglich, dass verschiedene Areale des Gehirns gleichzeitig aktiviert werden, die auch mit automatischen oder reflexiven Prozessen vor oder nach der bewussten Wahrnehmung zu tun haben könnten.

**Kontrast-Analysen der Bewusstseinszustände**

Bei Studien der neuronalen Korrelate der Bewusstseinszustände ist man jedoch immer auf Kontrast-Analysen angewiesen, so wie beim Vergleich zwischen Wachzustand, leichtem oder tiefem Schlaf und leichter oder tiefer Anästhesie. Hier gibt es immer das grundsätzliche Problem, dass eine Änderung im Bewusstseinszustand sofort auch eine Änderung des Wachsamkeitszustands (*vigilance state*) mit sehr unterschiedlicher Gehirnaktivierung mit sich bringt. Diese könnten eher mit basalem Arousal zu tun haben, also mit der Aktivierung des zentralen Nervensystems. Deswegen muss man mehrere Kontraste miteinander vergleichen, um Überlappungen und Differenzen zu bestimmen.



**Abb. 3: Von Gehirndaten zu Netzwerkanalysen: Strukturelle (anatomische) und funktionelle Netzwerkanalysen (Aktivierungsänderungen über die Zeit in EEG- oder fMRT-Daten).**

Zudem gibt es einen interessanten Kontrast zwischen dem REM-Schlaf, bei dem Menschen am intensivsten träumen, und leichtem nicht-REM-Schlaf, bei dem die mentale Aktivität weniger lebendig sein kann. Eine Neurowissenschaftlerin stellte in dem Workshop Merkmale des Traumbewusstseins vor und erläuterte die beeinträchtigte Funktion des Bewusstseins in diesem Schlaf, wodurch leichter Denkfehler gemacht werden können. Eine Ausnahme sind die Klarträume, bei denen der Träumer weiß, dass er träumt: Im Gegensatz zum normalen Traumzustand hat er hier vollen Zugriff auf das eigene Gedächtnis und die eigenen Absichten. Es gibt bereits eine EEG/fMRT-Studie zu Klarträumen, die zeigen könnte, dass die Umschaltung von normalem Traumbewusstsein zu Klartraumbewusstsein nur mit Veränderungen in neokortikalen Netzwerken verknüpft ist und nicht etwa mit dem Gehirnstamm oder Thalamus. Ein Vorteil bei Klarträumen ist, dass Probanden im Traum die Augen bewegen können: Wechselnde Augenbewegungen nach links und rechts sind im Elektrooculogramm sehr klar zu sehen. Daher muss man nicht hinterher erfragen, ob Probanden einen Klartraum hatten, er lässt sich vielmehr objektiv und bereits während des Traums bestätigen.

### Quantifizierung des Bewusstseins

Eine Herausforderung beim „einfachen“ Problem des Bewusstseins ist die Feststellung des Bewusstseins, die fast immer über subjektive Berichte läuft. Probanden müssen berichten, ob sie etwas wahrgenommen haben, ob sie das Gefühl von Bewusstsein hatten oder etwa zu Beginn einer Anästhesie ihr Bewusstsein durch einen Händedruck vermitteln. Neuerdings gibt es allerdings in der Bewusstseins-Quantifizierung eine viel versprechende Entwicklung, wobei die Komplexität der Gehirnantwort auf Stimulation (transkranielle Magnetstimulation) als Indikator für Bewusstsein dienen könnte. Komplexe, über unterschiedliche Gehirnareale verteilte Aktivitäten zeigt der Mensch nur im Wachzustand; im Schlaf oder bei der Anästhesie beobachtet man eher stereotype Antworten des Gehirns. Interessanterweise weist dieses Maß auch Unterschiede bei Koma-Patienten auf: Patienten mit vollem Bewusstsein (z. B. beim Locked-in-Syndrom) zeigen komplexe Aktivitäten des Gehirns, Patienten in einem vegetativen Zustand dagegen stereotype. Eine objektive Quantifizierung mittels Messung der Komplexität könnte daher möglicherweise die Unzuverlässigkeit subjektiver Einschätzungen beheben und Bewusstsein von *responsivity* trennen.

### Sprecher und Vorträge des Workshops

Jaan Aru (Max-Planck-Institut für Hirnforschung, Frankfurt/Main & Universität Tartu):

Distilling the Neural Correlates of Conscious Perception

Michael Czisch (Max-Planck-Institut für Psychiatrie, München):  
EEG-fMRI of Sleep: From Acoustic Stimulation to Intrinsic Connectivity

Martin Dresler (Radboud Universität Nijmegen):  
Neuroscience of Lucid Dreaming

Denis Jordan (Technische Universität München):  
Mechanisms of Anesthesia Induced Unconsciousness – a Combined EEG-fMRI Study

Marcello Massimini (Universität Mailand):  
Consciousness and Complexity: From Theory to Practice

Valentin Riedl (Technische Universität München):  
Simultaneous PET-fMRI Reveals Specific Links between Local and Network Brain Activity

Philipp Sämann (Max-Planck-Institut für Psychiatrie, München):  
Decoding of NREM Sleep Based on Resting-State fMRI

Renate Wehrle (EasyCap, Herrsching):  
Functional Neuroimaging of REM Sleep: Phasic Events and Thalamocortical Connectivity

Jennifer Windt (Johannes Gutenberg-Universität Mainz):  
Dreams, Consciousness and the Self: An Analysis from the Perspective of Philosophy of Mind

### Komplizierte Aufgaben für ein „einfaches“ Problem

Zu allen neun Vorträgen gab es intensive Diskussionen, auch während des anschließenden Abendessens. Eine Frage, die beim nächsten Workshop mehr Aufmerksamkeit verlangt, ist diejenige, wie die unterschiedlichen neuronalen Korrelate der Bewusstseinsübergänge gesehen werden sollten und wie man herausfinden kann, welche Areale bzw. Netzwerke als Schalter funktionieren, welche nur partizipieren, und welche ein Epiphänomen des Bewusstseins sind. Es gibt also zuerst noch einige schwere Aufgaben zu erledigen, bevor man das „einfache“ Problem des Bewusstseins systematisch angehen kann.

### DER AUTOR

**Victor Spoormaker, Ph. D.,** studierte Psychologie an der Universität Utrecht und schloss dort 2005 auch seine Promotion über Alpträume ab. Er ist seit 2008 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Unit Neuroimaging des Max-Planck-Instituts für Psychiatrie in München tätig. Seit 2011 ist er Mitglied des Jungen Kollegs der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.