

1 Was sind Beobachter und Bewusstsein?

Betrachtet man die Begriffe Beobachter und Bewusstsein aus einer allgemeinen Perspektive, so wirft nur einer dieser beiden tiefer greifende Fragen auf. Die Antwort auf die Frage, was ein Beobachter ist, ist so grundlegend einfach wie beispielsweise die im Duden gegebene Definition „*jemand, der etwas oder jemanden beobachtet*“ [1]. Diese Einfachheit der Beschreibung eines Beobachters ist durch die Objektivität zu begründen, die dem Begriff zu Grunde liegt. Im Gegensatz dazu ist das Bewusstsein etwas, das für jeden Menschen nur subjektiv erfahrbar ist und obgleich es anzunehmen ist, dass auch alle anderen Menschen bewusst sind, ist dies nicht ohne weiteres feststellbar. Eine umfassende Definitionen für Bewusstsein erweist sich daher als schwierig, sodass sich Definitionen häufig auf einzelne Teilaspekte fokussieren, die mit dem Bewusstsein assoziiert werden. [2] Eine der angedeuteten tiefgreifenden Fragen, ist das von David Chalmers benannte „*schwierige Problem*“ [3], welches unter Philosophen nicht unumstritten ist, jedoch im Grunde die Frage danach stellt, warum wir ein Bewusstsein haben. Ein Konzept, das diese Frage zu beantworten versucht, ist das des Dualismus. Dieses beschreibt prinzipiell die Existenz einer nicht-physischen „Lebenskraft“ (Seele) neben der physischen Materie, die uns Menschen unser Bewusstsein verleiht.

Aus physikalischer Sicht ist schon die Definition eines Beobachters schwierig, da diese sich je nach Betätigungsfeld unterscheidet. Eine große Differenz zwischen den Bedeutungen eines Beobachters ergibt sich beispielsweise, wie auch unter anderen Gesichtspunkten, zwischen der allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. In erstere wird er Beobachte als ein masse- und ausdehnungsloser Punkt wahr genommen, der folglich keine Auswirkung auf das Beobachtete hat. In der quantenmechanischen Beschreibung kann argumentiert werden, dass ein Beobachter in irgendeiner Form an einem Messprozess beteiligt ist und somit einen Einfluss auf das System ausübt. Die aktuelle Situation lässt sich mit den Worten von Max Tegmark wie folgt beschreiben:

„The only issue there is consensus on is that there is no consensus about how to define an observer and its role.“ [4]

Da schon der allgemein noch eher einfache Begriff des Beobachters in der Physik bereits für Uneinigkeit sorgt, ist anzunehmen, dass das Bewusstsein aus physikalischer Sicht mindestens genauso viele offene Fragen hinterlässt. Zu einem gewissen Ausmaß ist dies Vermutung zutreffend, denn auf Fragen wie das „schwierige Problem“ liefert die Physik bislang keine Antworten. Beispielsweise ist das Konzept des Dualismus von einem physikalischen Standpunkt aus nicht vertretbar, da eine Seele entweder keine Auswirkungen auf die Elementarteilchen hat, aus denen unser Körper aufgebaut ist, und folglich nicht existiert oder aber doch Kräfte ausübt, wodurch die Seele wiederum physikalisch beschrieben werden kann. In beiden Fällen ist eine Unterscheidung von Materie und Seele somit nicht notwendig. Eine Vereinfachung der Definition für Bewusstsein ergibt sich jedoch dadurch,

dass das Bewusstsein in der Physik allgemein unbeachtet bleibt, wodurch sich die Frage nach einer Definition gar nicht erst stellt. [4]

2 Beschreibung eines Beobachter als Teilsystem

Ein theoretisches Konzept für die Beschreibung eines Beobachters, ist die Einteilung des betrachteten Gesamtsystems, beschrieben durch den Hamiltonoperator H , in drei Teilsysteme der Form

$$H = H_O + H_S + H_E + H_{OE} + H_{SE} + H_{OS} + H_{OES}. \quad (1)$$

Dabei werden die Teilsysteme so gewählt, dass das Objekt (O) alle Freiheitsgrade enthält die für den Beobachter relevant sind, beispielsweise der Wert eines Messgeräts. Genauso werden alle Freiheitsgrade des Beobachters, die dessen Wahrnehmung beschreiben in einem Teilsystem betrachtet, das Subjekt (S) genannt wird. Der Großteil aller Freiheitsgrade, der nach dieser Einteilung noch übrig ist und auch die Freiheitsgrade aller Teilchen einschließt aus denen Beobachter und Messgerät bestehen, wird als Umgebung (E) beschrieben.

Durch die Einteilung in drei Teilsysteme ergibt sich im allgemeinen Fall ein komplexer Wechselwirkungsterm, der aus den Wechselwirkungen von jeweils zweien der Teilsysteme miteinander und einem Term besteht, der die Wechselwirkung aller drei Teilsysteme beschreibt, für den jedoch im Folgenden $H_{OES} = 0$ angenommen wird. Die drei übrigen Wechselwirkungsterme lassen sich mit bekannten Wechselwirkungen identifizieren. So beschreiben H_{OE} und H_{OS} die Dekohärenz von dem Objekt respektive dem Subjekt durch die Wechselwirkung mit der Umgebung. Der Term H_{OS} kann als Messung des Beobachters am System verstanden werden.

Damit ein solches Modell für den Beobachter (Subjekt) mit der Realität vereinbare Ergebnisse liefert, müssen die Wechselwirkungen von Subjekt mit der Umgebung und dem Objekt eine hohes Maß an Korrelation zu bestimmten Eigenschaften hervorrufen. Beispiele für diese Eigenschaften sind die Lichtintensität oder den Schalldruck, die wir mit unseren Sinnen relativ konstant wahrnehmen können. Ferner müssen auch Korrelationen zu vergangenen Zuständen möglich sein, da wir als menschliche Beobachter die Fähigkeit haben uns an die Vergangenheit zu erinnern.

Um die Wirkung der einzelnen Wechselwirkungsterme zu verdeutlichen ist im Folgenden ein Beispiel aus [4] gegeben. Betrachtet wird hierbei die reduzierte Dichtematrix ρ_{OS} eines Systems in denen sowohl das Objekt als auch das Subjekt nur einen Freiheitsgrad mit den jeweiligen Zuständen

$$\text{Subjekt : } |\odot\rangle, |\ominus\rangle, |\otimes\rangle \quad (2)$$

$$\text{Objekt : } |\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle \quad (3)$$

besitzen. Aus denen sich die 6 Basiszustände

$$|\odot \uparrow\rangle, |\odot \downarrow\rangle, |\ominus \uparrow\rangle, |\ominus \downarrow\rangle, |\oplus \uparrow\rangle, |\oplus \downarrow\rangle \quad (4)$$

für das verbundene System ergeben. Für den Anfangszustand wird die Dichtematrix $\rho_{OS} = |\odot \uparrow\rangle \langle \odot \uparrow|$ angenommen. Der Term H_O beschreibt nun die Zeitentwicklung des Objekts für die folgendes angenommen werden soll.

$$U |\uparrow\rangle = \exp(-iH_O t) |\uparrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) \quad (5)$$

Diese Entwicklung erzeugt aus dem reinen Anfangszustand $\rho_O = |\uparrow\rangle \langle \uparrow|$ einen Zustand in Superposition

$$U \rho_O U^\dagger = \frac{1}{2} (|\uparrow\rangle \langle \uparrow| + |\uparrow\rangle \langle \downarrow| + |\downarrow\rangle \langle \uparrow| + |\downarrow\rangle \langle \downarrow|). \quad (6)$$

Durch die Wechselwirkung mit der Umgebung findet nun (vollständige) Dekohärenz dieses Zustands statt, wodurch die Nebendiagonalelemente der Dichtematrix unterdrückt werden und man den Zustand

$$\rho'_O = \frac{1}{2} (|\uparrow\rangle \langle \uparrow| + |\downarrow\rangle \langle \downarrow|) \quad (7)$$

erhält. Die Messung des Subjekts an Objekt sei in der Art, dass die neutrale Stimmung $|\odot\rangle$ des Beobachters bei Beobachtung eines $|\uparrow\rangle$ zu $|\odot\rangle$ und bei Beobachtung von $|\downarrow\rangle$ zu $|\ominus\rangle$ übergeht. Formal lassen sich diese Annahmen mit $U |\odot \uparrow\rangle = |\odot \uparrow\rangle$ und $U |\odot \downarrow\rangle = |\ominus \downarrow\rangle$ beschreiben, wobei U die Zeitentwicklung in Abhängigkeit von H_{OS} darstellt. Bei der Beobachtung des Zustands ρ'_O durch einen anfangs neutralen Beobachter ergibt sich entsprechend

$$\begin{aligned} \rho'_{OS} &= \frac{1}{2} U (|\uparrow\rangle \langle \uparrow| + |\downarrow\rangle \langle \downarrow|) \otimes |\odot\rangle \langle \odot| U^\dagger \\ &= \frac{1}{2} (|\odot \uparrow\rangle \langle \odot \uparrow| + |\ominus \downarrow\rangle \langle \ominus \downarrow|). \end{aligned} \quad (8)$$

Analog wirken die interne Dynamik des Subjekts H_S und die Wechselwirkung des Systems mit der Umgebung H_{SE} , wodurch zunächst Superpositionen erzeugt und durch Dekohärenz wieder unterdrückt werden. Aus dem System des neutralen Beobachters $\rho_S = |\odot\rangle \langle \odot|$ ergibt sich durch Zeitentwicklung U

$$U \rho_S U^\dagger = \frac{1}{2} (|\odot\rangle \langle \odot| + |\ominus\rangle \langle \ominus| + |\oplus\rangle \langle \oplus| + |\otimes\rangle \langle \otimes|). \quad (9)$$

Und nach Wirkung der Dekohärenz

$$\rho'_S = \frac{1}{2} (|\odot\rangle \langle \odot| + |\ominus\rangle \langle \ominus|). \quad (10)$$

Für den Fall eines menschlichen Beobachters lässt sich nun die Frage stellen, ob die Superpositionen durch die Zeitentwicklung überhaupt entstehen oder aber die Dekohärenz auf so kleinen Zeitskalen abläuft, dass diese förmlich instantan zerstört werden. Diese Frage wird im folgenden Abschnitt unter Betrachtung von Neuronen im menschlichen Gehirn beantwortet.

3 Dekohärenz von Gehirnprozessen

Ein Gehirnprozess in dem quantenmechanische Superpositionen denkbar sind die Aktivität von Neuronen, den Grundbausteinen der Informationsverarbeitung im Gehirn. Das komplexe Netzwerk aus $\sim 10^{11}$ Neuronen kann auch durch Forschungsergebnisse anderer Wissenschaften mit dem Bewusstsein in Zusammenhang gebracht werden.

Eine schematische Darstellung einer Nervenzelle ist in Abbildung 1 gezeigt. Auf das, für diese Betrachtung, Notwendigste reduziert stellen Neuronen im Prinzip ein System mit zwei möglichen Zuständen dar, die feuern (aktiv) und nicht-feuern (passiv) genannt werden. Der Zustand ist dabei von der Konzentration von Na^+ -Ionen im Inneren der Nervenzelle abhängig, bei hohen Konzentrationen feuert die Nervenzelle bei niedrigen nicht. Eine Superposition zwischen einer feuernden und nicht-feuernden Nervenzelle lässt sich demnach vereinfacht als räumliche Superposition von Na^+ -Ionen annehmen. Die räumliche Trennung dieser beiden Orte ist dabei von der Größenordnung der Zellwände $h \sim 10 \text{ nm}$.

Um nun Aussagen über die Dekohärenz-Zeitskalen machen zu können muss zunächst die Anzahl der Ionen bestimmt werden, die sich gleichzeitig in Superposition befinden. Diese Anzahl wird über eine einfache Abschätzung der Ladungsverteilung in der Nervenzelle ermittelt. Im feuernden Zustand beträgt die Potentialdifferenz zwischen dem Inneren und Äußeren der Zelle $U_1 \sim 0,03 \text{ V}$ während diese im nicht-feuernden Zustand $U_0 \sim -0,07 \text{ V}$ beträgt. Die Anzahl N der Na^+ -Ionen ergibt sich damit und realistischen Abschätzungen^① für die Ausmaße einer Nervenzelle zu

$$N = \frac{\pi d L f \epsilon_0}{q h} (U_1 - U_0) \approx 10^6. \quad (11)$$

Für die Abschätzung der Größenordnung der Dekohärenz-Zeitskala werden die drei am häufigsten auftretenden Wechselwirkungen mit der Umgebung betrachte. Dies sind zum einen Stöße der Na-Ionen mit anderen Ionen oder Wassermolekülen und zum anderen Coulomb-Abstoßung zwischen den gleich geladenen Na-Ionen. Die Zeitentwicklung des

^① $h = 8 \text{ nm}$, $d = 10 \text{ }\mu\text{m}$, $L = 10 \text{ cm}$, $f = 10^{-3}$

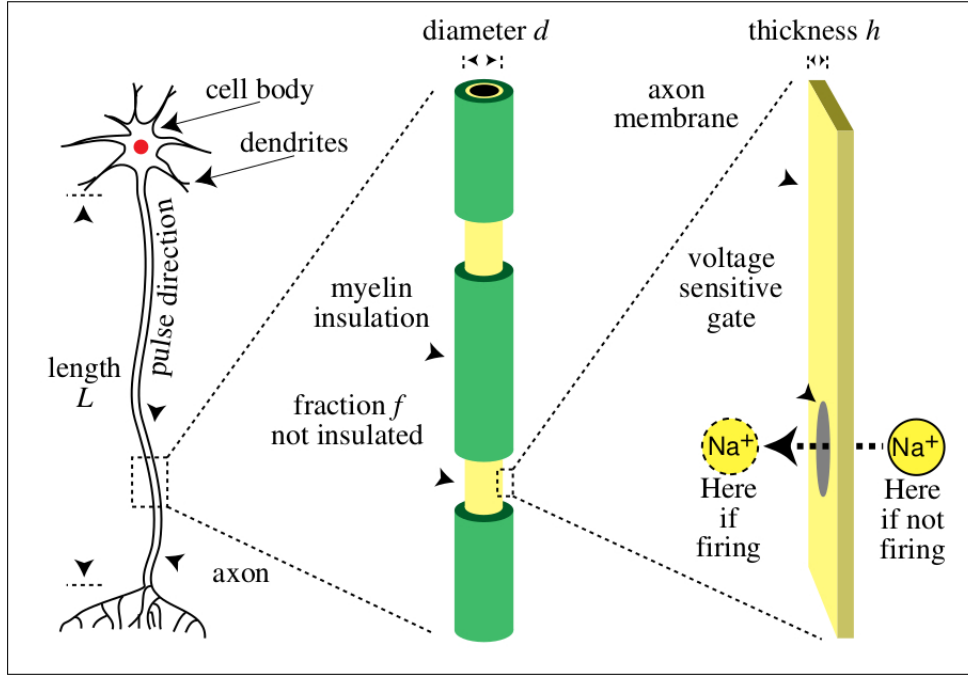


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Nervenzelle. Hervorgehoben sind die Größen, die für die Abschätzung der Anzahl der Na^+ -Ionen verwendet werden, die sich in Superposition befinden.[5]

Wechselwirkung	τ_{dec}
Stoß mit Ion	10^{-20} s
Stoß mit H_2O	10^{-20} s
Coulombabstoßung	10^{-19} s

Tabelle 1: Zeitskalen der Dekohärenz aufgrund der betrachteten Wechselwirkungen der Na^+ -Ionen in Superposition. Abgewandelt aus: [5]

Zustandes ρ lässt sich für diese drei Wechselwirkungen allgemein mit

$$\rho(r, r', t_0 + t) = \rho(r, r', t_0) f(r, r', t) \quad (12)$$

beschreiben wobei die Funktion $f(r, r', t)$ von der Wechselwirkung und nicht von dem Zustand des Ions abhängt. Eine detailliert Betrachtung der Berechnungen ist in [5] zu finden. Als Dekohärenz-Zeitskalen für die drei betrachteten Wechselwirkungen ergeben sich die in Tabelle 1 dargestellten.

Es zeigt sich als das Superpositionen von Neuronen, wie sie hier betrachtet wurde auf Zeitskalen der Größenordnung 10^{-20} s zerstört werden. Verglichen mit den typischen Dynamik-Zeitskalen, die für die schnellsten Neuronen bei etwa 10^{-3} s liegen, zeigt sich ein Unterschied von etwa 17 Größenordnungen. Entsprechend kann gefolgert werden das Superpositionen zwischen unterschiedlichen Neuronenzuständen bereits bei der Entstehung unterdrückt werden und diese Gehirnprozesse somit klassisch beschrieben werden müssen.

4 Bewusstsein als Aggregatzustand

Die bekannten Aggregatzustände lassen sich durch die Unterschiede in ihren Eigenschaften einteilen, so haben Festkörper eine quasi-unendliche Viskosität. Alle übrigen Stoffe zeigen weitere Unterschiede, beispielsweise sind Flüssigkeiten weniger kompressible und Gase und Plasmen lassen sich durch ihre Leitfähigkeit unterscheiden.

In analoger Form lässt sich nun die Frage nach den Eigenschaften stellen, die Materie haben muss, die bewusst ist. Ähnliche Überlegungen wurden bereits angestellt, um festzustellen welche Eigenschaften *computronium* haben muss, ein Zustand von Materie der „berechnen“ kann. Zwei mögliche Eigenschaften von bewusster Materie, Integrierte Information und Unabhängigkeit werden im folgenden erläutert.

4.1 Integrierte Information

Integrierte Information als Maß für das Bewusstsein zu verwenden ist Teil der *Integrated Information Theory* des Neurowissenschaftlers Giulio Tononi. [6] Die im Folgenden verwendete formale Definition für die Integrierte Information Φ weicht dabei von der Definition nach Tononi ab, ermöglicht aber ähnliche Aussagen. Die Integrierte Information entspricht hier der minimalen Transinformation $I(\rho)$ die durch eine Trennung des Zustands ρ in zwei Teilsystem Zustände ρ_1 und ρ_2 erreicht werden kann.

$$\Phi = I_{\min} = \min I(\rho) = \min (S(\rho_1) + S(\rho_2) - S(\rho)) \quad (13)$$

Da ein Zustand mit $\Phi = I = 0$ in vollkommen unabhängige Teilzustände zerlegt werden kann und demnach möglichst unabhängigen Teilzustände die geringste Transinformation haben, wurde die Trennung des Zustands ρ zur Bestimmung der Integrierten Information von Tononi als „*the cruelest cut*“ bezeichnet.

Eine mögliche Veranschaulichung von Integrierten Information ist das Speichern von Information mit unter Verwendung von Redundanz oder Fehlerkorrektur-Mechanismen. Dies findet beispielsweise in den weit verbreiteten QR-Codes Anwendung, deren Informationen nach Verlust eines Teils des Musters immer noch zugänglich sind. Ein Beispiel dafür ist in ?? dargestellt. Durch numerische Berechnung kann die maximal mögliche Integration von Information eines Systems mit einer festen Größe von n bit bestimmt werden. In Abbildung 3 ist dies beispielhaft für $n = 14$ bit gezeigt. Es ergibt sich, dass die maximal mögliche Integration für die Auswahl von $n/2$ bit zum speichern der Information vorliegt. Die übrigen $n/2$ bit sorgen entsprechend für die notwendige Redundanz.

Die Übertragung dieses Konzepts in physikalische Systeme ist beispielsweise unter Betrachtung von „Eierkarton“-Potentiallandschaften, wie in Abbildung 4 dargestellt, möglich. In dem Beispiel des dargestellten 16×16 -Gitters lässt sich die Position (x, y) eines Potentialminimums mit unter Verwendung von je einer 4-bit-Zahl ($0_2 - 15_2$) für x und y



Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung eines QR-Code, dessen Information auch nach Entfernen von etwa 30 % des Musters noch nicht gelöscht ist.

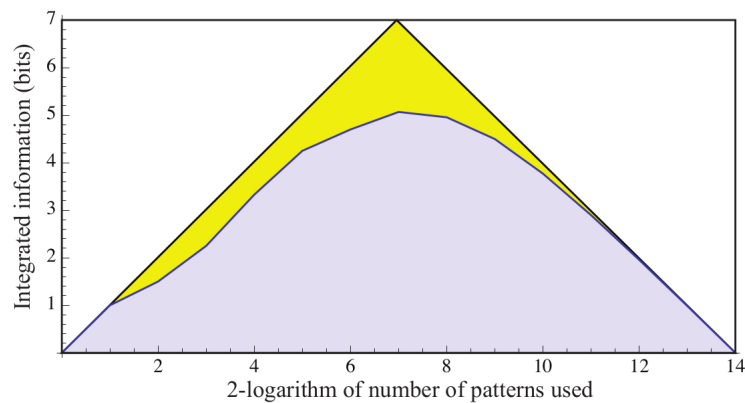


Abbildung 3: Darstellung der Ergebnisse der numerischen Suche nach maximaler Integration in einem System mit $n = 14$ bit. Das Dreieck im Hintergrund stellt dabei die theoretisch maximal mögliche Integration dar, die dem Minimum von Speicher-bits und Redundanz-bits entspricht. Die grau dargestellte Kurve gibt jeweils die maximale Integration für die jeweilige Anzahl an Speicher-bits an.

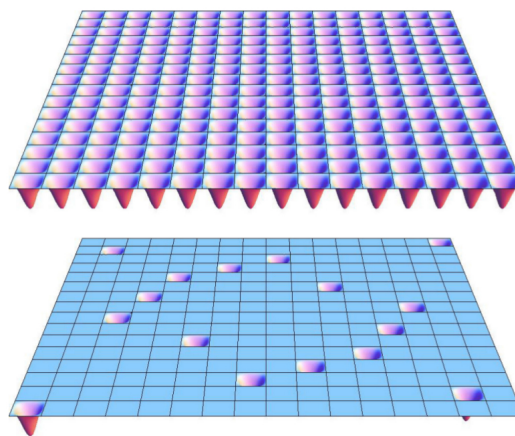


Abbildung 4: Darstellung von zwei Eierkarton-Potentiallandschaften einmal mit 256 Minima (oben) und einmal mit 16 Minima (unten). Ein Zustand im unteren System weißt eine gute Integration auf ein Zustand im oberen System ist gar nicht integriert.

kodieren. Für die beiden dargestellten Potentiallandschaften ergeben sich für die Integrierte Information die Werte $\Phi_{\text{oben}} = 0$ und $\Phi_{\text{unten}} = 2$. Diese Unterschiede in der Integration lassen sich folgender Maßen veranschaulichen. Kennt man für beide der Potentiale nur einer der beiden Positionen x oder y so gibt das ober Potential keinen Aufschluss auf die andere Komponente während diese im unteren festzustellen ist.

Betrachtet man nun neben der Information in einem n -bit-Zustand für die nach Shannon in etwa $S(\rho) \sim \log_2(\# \text{ möglicher Zustände}) \sim n$. Die Information, die in einem System mit k Minima so ergibt sich $S(H) \sim \log_2(\# \text{ möglicher } H) \sim kn$. Setzt man nun beispielhaft die Anzahl der Neuronen im menschlichen Gehirn an und maximiert die Integrierte Information die in diesem System steckt, ergibt sich die dafür notwendige Information zu

$$S(H) \sim \sqrt{2^n} \frac{n}{2} \sim 10^{10^{10}} \text{ bit.} \quad (14)$$

Diese Anzahl übersteigt die Anzahl der Teilchen im Universum 10^{89} um ein vielfaches. Die notwendige Dynamik für maximale Integration im Gehirn des Menschen ist entsprechen viel zu komplex um realisiert zu werden.

4.2 Unabhängigkeit

5 Schlussbetrachtung

6 Literatur

Literatur

- [1] *Definition: Beobachter*. 29. Juni 2016. URL: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Beobachter>.
- [2] *Definition: Bewusstsein*. 29. Juni 2016. URL: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Bewusstsein#Bedeutung1a>.
- [3] David Chalmers. „Facing Up to the Problem of Consciousness“. In: *Journal of Consciousness Studies* (1995). URL: <http://consc.net/papers/facing.html> (besucht am 29.06.2016).
- [4] Max Tegmark. „Consciousness as a State of Matter“. In: *ArXiv e-prints* (2015). arXiv: 1401.1219v3.
- [5] Max Tegmark. „The Importance of Quantum Decoherence in Brain Processes“. In: *ArXiv e-prints* (1999). arXiv: quant-ph/9907009v2.

- [6] Giulio Tononi. „Consciousness as Integrated Information: a Provisional Manifesto“. In: *Biol. Bull.* 215 (2008). URL: <http://www.biolbull.org/content/215/3/216.full> (besucht am 29.06.2016).