

Im Folgenden sollen die Grundzüge der physikalischen Beschreibung von Beobachtern und dem Bewusstsein betrachtet werden. Dabei wird zunächst auf die Problem der Definitionen eingegangen, um dann theoretische Modelle zu betrachten, die die Möglichkeiten zur Beschreibung eines Beobachters als Teilsystem und der Eigenschaften von bewusster Materie bieten. Ferner wird durch Berechnung der Dekohärenz-Zeitskalen von Gehirnprozessen argumentiert, dass diese als klassisch zu behandeln sind.

## 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 Definition 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 be-

reits 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  $H_{SE}$  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 ein 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  $\rho_{OS}$  eines Systems in denen sowohl das Objekt als auch das Subjekt nur einen Freiheitsgrad mit den jeweiligen Zuständen

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

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

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  $\rho'_O$  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 Sys-

tems 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  $U$

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

Und nach Wirkung der Dekohärenz

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

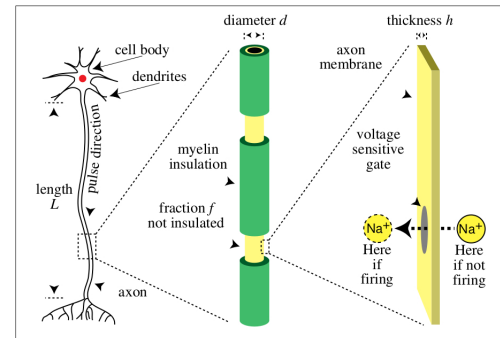
Für den Fall eines menschlichen Beobachters lässt sich nun die Frage stellen, ob die Superpositionen durch die Zeitentwicklung überhaupt entstehen oder aber die Dekohärenz auf so kleinen Zeitskalen abläuft, dass diese förmlich instantan zerstört werden. Diese Frage wird im folgenden Abschnitt unter Betrachtung 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 Abb. 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  $\text{Na}^+$ -Ionen im Inneren der Nervenzelle abhängig, bei hohen Konzentrationen feuert die Nervenzelle bei niedrigen nicht. Eine Superposition zwischen einer feuernenden und nicht-feuernenden Nervenzelle lässt sich demnach vereinfacht als räumliche Superposition von  $\text{Na}^+$ -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



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

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  $\text{Na}^+$ -Ionen ergibt sich damit und realistischen Abschätzungen<sup>①</sup> 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 Zustandes  $\rho$  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  $10^{-20} \text{ s}$  zerstört werden. Verglichen mit den typischen Dynamik-Zeitskalen, die für die schnellsten Neuronen bei etwa  $10^{-3} \text{ s}$  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.

Wechselwirkung	$\tau_{dec}$
Stoß mit Ion	$10^{-20} \text{ s}$
Stoß mit $\text{H}_2\text{O}$	$10^{-20} \text{ s}$
Coulombabstoßung	$10^{-19} \text{ s}$

**Tabelle 1:** Zeitskalen der Dekohärenz aufgrund der betrachteten Wechselwirkungen der  $\text{Na}^+$ -Ionen in Superposition. Abgewandelt aus: [5]

## 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

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

weiter Unterschiede, beispielsweise sind Flüssigkeiten weniger kompressible und Gase und Plasmen lassen sich durch ihr 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.

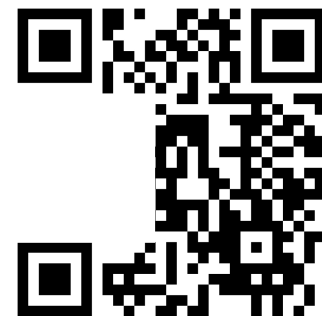
## 4.1 Integrierte Information

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  $\Phi$  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  $\rho$  in zwei Teilsystem Zustände  $\rho_1$  und  $\rho_2$  erreicht werden kann.

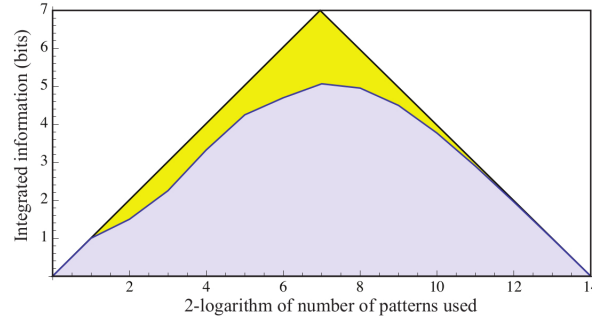
$$\Phi = I_{\min} = \min I(\rho) = \min (S(\rho_1) + S(\rho_2) - S(\rho)) \quad (13)$$

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  $\rho$  zur Bestimmung der Integrierten Information von Tononi als „*the crudest 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 Abb. 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.

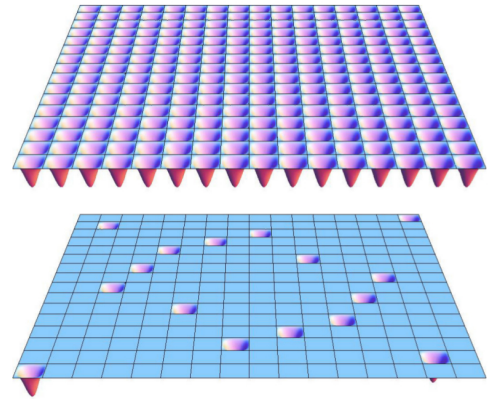


**Abbildung 2:** Beispielhafte Darstellung eines QR-Code, dessen Information auch nach Entfernen von etwa 30 % des Musters noch nicht gelöscht ist.



**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.

Die Übertragung dieses Konzepts in physikalische Systeme ist beispielsweise unter Betrachtung von „Eierkarton“-Potentiallandschaften, wie in Abb. 4 dargestellt, möglich. In dem Beispiel des dargestellten  $16 \times 16$ -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  $y$  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 folgendermaßen veranschaulichen. Kennt man für beide der Potentiale nur einer der beiden Positionen  $x$  oder  $y$ , so gibt das obere Potential keinen Aufschluss auf die andere Komponente während diese im unteren festzustellen ist.



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

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

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

Diese Anzahl übersteigt die Teilchenzahl des Universums  $10^{89}$  um ein Vielfaches. Die notwendige Dynamik für maximale Integration im Gehirn des Menschen ist entsprechend viel zu komplex, um realisiert werden zu können.

## 4.2 Unabhängigkeit

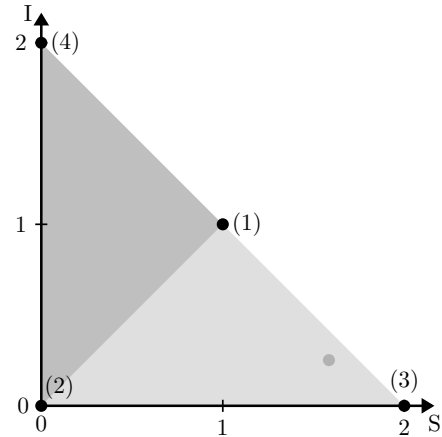
Wie im vorherigen Abschnitt gesehen, führt maximale Integration zu einer so komplexen Dynamik, dass diese im menschlichen Gehirn nicht realisiert sein kann. Im Folgenden soll nun betrachtet werden wie groß die Unabhängigkeit zwischen Teilsystemen werden kann und welche Konsequenzen aus dieser Unabhängigkeit resultieren. Als Maß kann dabei wiederum die Integrierte Information dienen, für maximal unabhängige Teilsysteme hat diese den Wert  $\Phi = 0$ .

Bei der Betrachtung von Unabhängigkeit stellt man einen großen Unterschied zwischen klassischen und quantenmechanischen Systemen fest. Zur Verdeutlichung sollen hier ein klassisches 2-bit- und ein quantenmechanisches 2-qbit-System betrachtet werden. Die Zustände, die von diesen beiden Systemen eingenommen werden können, alle als Punkt in dem Koordinatensystem aus  $(S, I)$  in Abb. 5 eingetragen werden. Dabei ist das klassische System auf das helle Dreieck beschränkt, während das 2-qbit-System zusätzlich im dunklen Dreieck liegen kann.

Die Berechnung der Integrierten Information des klassischen Systems erweist sich als trivial, da nur ein einziger Schnitt in zwei Teilsysteme (jeweils ein bit) möglich ist und somit  $\Phi = I$  gilt. Für das Quantensystem ergibt sich jedoch das Problem, dass jede Basis des Hilbertraums gleich bedeutend ist und daher die Minimierung der Transinformation kontinuierlich über alle unitären Transformationen durchgeführt werden muss.

$$\Phi = \min_U I(U\rho U^\dagger) \quad (15)$$

Dies führt dazu, dass selbst der Zustand (4) in Abb. 5, einer der vier maximal verschränkten Bell-Zustände, in einen reinen Zustand transformiert werden kann, sodass für diesen  $\Phi = 0$  gilt. Die für Quantenzustände maximal mögliche Integrierte Information kann für ein System der betrachteten Größe zu  $\Phi = 0,2516$  bit bestimmt werden. Dieser Wert ist als grauer Punkt in Abb. 5 eingezeichnet. Und auch für größere Systeme zeigt sich, dass  $\Phi$  für klassische Systeme annähernd linear mit der Systemgröße steigt, während  $\Phi$  für Quantensysteme gegen null geht. Damit zeigt sich, dass Zustände von Quantensystemen im Vergleich zu klassischen Zuständen wesentlich unabhängiger sind.



**Abbildung 5:** Darstellung der Transinformation  $I$  eines 2-bit/2-qbit-Systems in Abhängigkeit seiner Entropie  $S$ . Klassische Systeme können nur in dem hellen Dreieck liegen, während quantenmechanisch zusätzlich das dunkle Dreieck möglich ist. Markiert sind die 4 Zustände: (1):  $\rho = \frac{1}{2}(|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|)$ , (2):  $\rho = |\uparrow\rangle\langle\uparrow|$ , (3):  $\rho = \frac{1}{4}(|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\uparrow| + |\uparrow\rangle\langle\downarrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|)$ , (4):  $\rho = \frac{1}{2}(|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|)$ . Der hell graue Punkt stellt für dieses 2-qbit-System die maximal mögliche Integrierte Information dar.



Betrachtet man wiederum die Integrierte Information des gesamten Systems, beschrieben durch  $H$ , der allgemein in drei Teile separiert werden kann

$$H = H_1 \otimes I + I \otimes H_2 + H_3 \quad (16)$$

so ist leicht zu verstehen, dass diese am geringsten ist, wenn der Wechselwirkungsterm  $H_3$  minimal wird. Wird eine solche Separation gefunden gilt, da  $H_1$  und  $H_2$  näherungsweise unabhängig sind, dass  $[H_i, H_j] = 0$  und  $[H_i, H_3] = 0$  für  $i, j \in 1, 2$ . Das Vertauschen des System Hamiltonoperators mit dem Wechselwirkungsterm führt nun aber dazu, dass Zustände durch die Dekohärenz in einen zeitunabhängigen Zustand getrieben werden. Trennt man das Universum also in möglichst unabhängige Teile auf, so kommt jegliche Veränderung zum Erliegen.

## 5 Schlussbetrachtung

Wie schon im Allgemeinen ergeben sich auch in der Physik Problem eine Definition für Bewusstsein zu finden, wobei in letzterer selbst eine allgemeine Definition für einen Beobachter fehlt. Es kann also vermutet werden, dass eine mögliche einheitliche Definition für Beobachter das Bewusstsein in irgendeiner Weise einschließen könnte.

Bei der Auffassung des Beobachters als Teilsystem ergeben sich strikte Bedingungen an die Wechselwirkungsterme mit Objekt und Umwelt, die dafür Sorge zu tragen haben, dass Korrelationen zu ausgewählten Eigenschaften der Umgebung konstant bleiben. Ferner zeigte die Berechnung der Dekohärenz-Zeitskalen von Neuronen, dass diese und damit auch sämtliche Gehirnprozesse als klassische zu beschreiben sind, da jegliche Superpositionen noch bei der Entstehung zerstört werden.

Die Betrachtung von notwendigen Eigenschaften bewusster Materie zeigt, dass obwohl Integrierte Information und Unabhängigkeit sinnvolle Vertreter dieser Eigenschaften sind diese beiden allein noch nicht ausreichend sind, um bewusste Materie vollständig zu beschreiben.

## 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).
- [7] H. Dieter Zeh. „The Problem of conscious observation in Quantum Mechanical Description“. In: *ArXiv e-prints* (2000). arXiv: quant-ph/9908084v3.