

Integrated Information Theory

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Aufbau der menschlichen Großhirnrinde	3
3	Integrated Information Theory [Tononi]	4
4	Consciousness as a State of Matter	8
5	Literaturverzeichnis	11

1 Einleitung

Im Rahmen des Vortrags haben wir uns eingehender mit dem Modell der “Integrated Information Theory” von Tononi zur Beschreibung von Bewusstsein auseinandergesetzt. Dabei haben wir versucht die folgenden Fragen zu klären:

- Was ist Bewusstsein und kann man es quantitativ beschreiben?
- Wie entsteht Bewusstsein und welche Voraussetzungen müssen gegeben sein?
- Ist ein Maß für Bewusstseinsfähigkeit durch physikalische Observablen konstruierbar?

Dabei basiert die Einleitung und der Teil über das menschliche Gehirn auf [1], das Kapitel über die Integrated Information Theory auf [2] und das letzte Kapitel auf [3]. Zunächst sollte definiert werden, was Bewusstsein ist. Eine exakte Definition von Bewusstsein zu finden, ist schwierig. Es lässt sich jedoch eine intuitive Definition angeben. Bewusstsein ist der Zustand in dem sich ein Mensch im wachen beziehungsweise träumenden Zustand befindet. Außerdem ist der Zustand des Bewusstseins immer untrennbar mit einem Erlebnis verknüpft. Im nicht bewussten Zustand sind nur unbewusste Reaktionen wie Reflexe möglich. Weiterhin gibt es empirische Befunde aus der Hirnforschung, die weitere Hinweise zum Verständnis von Bewusstsein liefern. So weiß man heute, dass Verletzungen der Großhirnrinde zur Veränderung oder sogar zum vollständigen Verlust von Bewusstsein führen, während eine Verletzung oder sogar der vollständige Verlust des Kleinhirns fast keinen Einfluss auf die Bewusstseinsfähigkeit hat. Des Weiteren weiß man aus Hirnstrommessungen, dass sich die Aktivitätsmuster in der Großhirnrinde zwischen bewusstem und unbewusstem Zustand stark unterscheiden. So stehen die verschiedenen Hirnareale im bewusstem Zustand viel stärker untereinander in Verbindung. Die These, dass das Bewusstsein im Zusammenspiel der verschiedenen Hirnareale entsteht, wird auch durch Versuche mit sogenannten Split-Brain Menschen unterstützt. Bei diesen wurden zur Behandlung von besonders starker Epilepsie die Verbindung der beiden Gehirnhälften der Großhirnrinde getrennt. Diese Trennung hat unter anderem zur Folge, dass die beiden Gehirnhälften nicht mehr untereinander kommunizieren und somit jede ihr eigenes Bewusstsein besitzt. Auch der Einfluss von Drogenkonsum auf die Bewusstseinsfähigkeit bietet spannende Einblicke auf die Funktion von Bewusstsein. So erhöht der Konsum von Speed die Kommunikation zwischen den verschiedenen Hirnarealen, sodass man das Gefühl eines erhöhten Bewusstseins hat. Das Denken wird schneller, man wird kreativer und ideenreicher, aber es werden unlogische Verknüpfungen hergestellt. Der Ideenreichtum scheint wieder im normalen Zustand verquert und sinnlos. Hingegen dämpft der Konsum von Alkohol die Kommunikation zwischen den verschiedenen Hirnarealen, wodurch ein gegenteiliger Effekt zum Speedkonsum auftritt. Das Denken fällt schwer, der Ideenreichtum nimmt ab, bis nur noch sehr starke Verknüpfungen im Hirn funktionieren, sodass man den Weg nach Hause zumeist noch findet.

2 Aufbau der menschlichen Großhirnrinde

Da wir wissen, dass Menschen ein Bewusstsein besitzen und dass dieses in der Großhirnrinde entsteht, schauen wir uns zunächst den Aufbau und die Funktion der Großhirnrinde an. Denn jedes Modell zur Beschreibung von Bewusstsein sollte mit den bisherigen Erkenntnissen der Neurowissenschaften in Einklang stehen.

Wesentlichster und wichtigster Bestandteil der Großhirnrinde ist das Nervensystem, das aus ca. 10^{11} Neuronen gebildet wird. In der Verknüpfung dieser Neuronen liegen all unsere Erinnerungen und damit auch komplexe Lösungsmöglichkeiten. Außerdem verarbeitet die Großhirnrinde den größten Teil der Sinnesindrücke. So liegt in ihr zum Beispiel das Sehzentrum, das optische Eindrücke verarbeitet, sowie das Hörzentrum. Des Weiteren liegen die Zentren, die für die nicht reflexartige Muskelsteuerung zuständig sind, in der Großhirnrinde.

Neuronen funktionieren im Wesentlichen so, dass sie durch andere Neuronen oder direkt von Sinneszellen, die mit dem Neuron über Synapsen verbunden sind, erregt werden. Dabei wird die gleichzeitige Erregung durch verschiedene Synapsen addiert. Wenn diese Erregung einen bestimmten Wert überschreitet, wird ein Signal an die Synapsen des Neuron gesendet, sodass über diese weitere Neuronen erregt werden. In der menschlichen Großhirnrinde sind dabei Neuronen im Mittel über 10.000 Synapsen mit anderen Neuronen verknüpft. Ein Neuron kann dabei mit einem anderen Neuron auch über viele Synapsen verbunden sein, sodass nicht immer mehrere Neuronen, mit denen ein Neuron verknüpft ist, aktiv sein müssen, um das Neuron selbst zu aktivieren. Ein extremes Beispiel dafür sind Reflexe, bei denen bestimmte Erregungen zu immer gleichen Reaktionen führen. Dabei sind zumeist nur wenige Neuronen beteiligt, die wie Autobahnen das Eingangssignal direkt mit der Reaktion verknüpfen.

Das Nervensystem der menschlichen Großhirnrinde ist jedoch kein starres System, sondern es verändert sich ständig, in dem neue Verbindungen geknüpft und alte gelockert werden. Das ist notwendig damit wir uns Neues merken können. Nicht benutzte Verbindungen hingegen verbrauchen unnötig Kapazität und außerdem sind nicht alle Verknüpfungen sinnvoll, deshalb ist es auch notwendig, dass alte, nicht benutzte Verbindungen wieder langsam getrennt werden. Vor allem bei Kleinkindern ist das sehr wichtig, da sie besonders schnell lernen und somit auch besonders schnell nicht zusammenhängende Konzepte verknüpfen. Das ist der Fall, da das Hirn lernt, indem gleichzeitig aktiven Neuronen, zwischen denen es räumlich möglich ist eine Verbindung zu knüpfen, durch neue Synapsen verbunden werden. Dabei werden bei Babys besonders schnell starke Verknüpfungen gebildet, da sie in kurzer Zeit viele Dinge wie z.B. Laufen und Sprechen lernen. Da ein schneller Aufbau von Verbindungen auf die beschriebene Weise unweigerlich zu sinnlosen Verknüpfungen führt, ist in dieser Phase auch der Abbau von Verbindungen besonders schnell. Deshalb haben Menschen kaum Erinnerungen an bestimmte Ereignisse in ihre frühe Kindheit, können aber Dinge wie Laufen und Sprechen, die immer wieder gebraucht werden, natürlich immer noch. Mit dem Älter werden, wurden grundlegende Abläufe, deren Anlegung eine schnelle Lernfähigkeit erfordert, bereits erlernt und es überwiegt nun der Vorteil sich an spezielleres Wissen erinnern zu können, also auf einen Erfahrungsschatz über einen langen Zeitraum zugreifen zu können, deshalb nimmt die Geschwindigkeit, mit der Verknüpfungen gelockert werden, deutlich ab. Da sonst große Mengen des gelernten Unsinn erhalten bleiben würde, nimmt auch die Geschwindigkeit mit der neue Verknüpfungen

gebildet werden ab und der Mensch lernt langsamer. Was dabei beim menschlichen Gehirn besonders ausgeprägt ist, ist das verschiedene Gehirnareale zu verschiedenen Zeiten ausreifen. So werden im vorderen Stirnlappen, der für logisches Denken und Bewusstseinsfähigkeit eine besondere Rolle spielt, bis ins fortgeschrittenere Alter von 6 bis 7 Jahren besonders schnell neue Verbindungen geknüpft. Das erscheint auch sehr sinnvoll, da ein Kleinkind erst mal lernen muss sich in der Welt zurechtzufinden, sich bewegen zu können und vor allem andere verstehen zu können, bevor es anfangen kann logische Verknüpfungen zu erkennen und Schlüsse zu ziehen.

Nachdem wir etwas über den Aufbau der Großhirnrinde gelernt haben, wollen wir nun besser verstehen, wie es funktioniert. Denn die Funktionsweise ist gerade das wesentliche für die Bewusstseinsfähigkeit. Zunächst sollte erwähnt werden, dass das menschliche Gehirn konstruktiv arbeitet, was bedeutet, dass das menschliche Gehirn die Sinneseindrücke mit abgespeicherten Erlebnissen und Erfahrungen vergleicht und daraus einen erwarteten Ablauf generiert, auf den sich der Mensch einstellt und auf den er somit reagieren kann. Dieser erwartete Ablauf wird dann mit den Sinnen dauernd überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Dabei lenkt der Mensch seine Aufmerksamkeit natürlich sinnvollerweise auf die erwartete Veränderung, damit es diese möglichst schnell wahrnehmen kann. Damit lässt sich das Gehirn jedoch auch austricksen, da es, solange die Sinne keinen Widerspruch zum erwarteten Ablauf wahrnehmen, den erwarteten Ablauf als wahr annimmt. Damit arbeiten Zauberer, indem sie unsere Aufmerksamkeit auf etwas eigentlich gar nicht wesentliches lenken und unserem Gehirn damit einen bestimmten Ablauf vorgaukeln wollen, bis sie diesen durch einen unerwarteten Effekt ad absurdum führen. Doch wie funktionieren diese Vorgänge auf neuronaler Ebene? Wenn das menschliche Gehirn einer Situation ausgesetzt ist oder sich eine Frage stellt, dann gibt es im Gehirn ein Aktivitätsmuster, das ein Konzept darstellt, das für die Situation oder Frage steht. Dieses aktive Konzept ist nun unterschiedlich stark mit anderen Konzepten verknüpft, was dazu führt, dass je nach Aktivität anderer Neuronen oder anderer Konzepte, das als erstes aktivierte Konzept aktiv wird. Das führt wiederum dazu, dass eines der damit verknüpften Konzepte aktiviert wird, bis eine Lösung des Problems gefunden wird. Wichtig ist dabei, dass sich das Gehirn die ganze Zeit auf das richtige Maß dämpft, sodass das aktive Konzept immer gerade ein anderes Konzept aktiviert. Wäre das Gehirn nämlich zu stark gedämpft, dann wäre die Verbindung zu den anderen Konzepten zu schwach um sie zu aktivieren und es könnte keine Lösung gefunden werden. Ist das Gehirn hingegen zu schwach gedämpft, werden zum einen zu viele Konzepte aktiv, sodass keine wirkliche Lösung gefunden werden kann und zum anderen kann es zum Dominoeffekt kommen, sodass immer mehr Konzepte aktiviert werden und dadurch immer mehr Neuronen feuern, was zu unkontrollierbaren Folgen wie z.B. epileptischen Anfällen führt.

3 Integrated Information Theory [Tononi]

In seinem Paper “Integrated Information Theory” versucht Tononi Bewusstsein zu quantifizieren und entwickelt eine Methode dafür. Für ihn ist die Unaufspaltbarkeit und damit verbundene starke Verknüpftheit von Information entscheidend für die Bewusstseinsfähigkeit. Zunächst führt er drei Gedankenexperimente an:

- **Die Photodiode**

Eine Photodiode kann die Zustände hell und dunkel genau so gut voneinander unterscheiden wie ein Mensch. Trotzdem hat das Ansehen eines hellen oder dunklen Bildschirms einen größeren Informationsgehalt für den Menschen als für die Photodiode, was daran liegt, dass für die Photodiode hell und dunkel die einzigen Unterscheidungsmöglichkeiten sind. Ein Mensch dagegen kann dieses Erlebnis in einen größeren Kontext einordnen (wie z.B. der Vergleich mit Farben) und es eventuell mit anderen Eindrücken, wie z.B. einem Geräusch, verbinden.

- **Die Kamera**

Eine Kamera besteht aus einer großen Anzahl von Photodioden. Dem zur Folge kann sie also zwischen einer Vielzahl von Möglichkeiten unterscheiden. Allerdings misst und verarbeitet jede Photodiode ihre Information unabhängig von den anderen. Das Erlebnis der Kamera ist somit vollständig aufspaltbar. Für den Menschen ist dies nicht der Fall. Das Erlebnis eines roten Apfels kann von einem Menschen nicht getrennt werden. Es wird ihm nicht möglich sein nur die Farbe rot oder die Form des Apfels zu erleben.

- **Das Internet**

Im Gegensatz zur Kamera ist das Internet jedoch stark verknüpft und vernetzt. Es gibt viele Ein- und Ausgänge, bestehend aus Servern und Nutzern, sowie Knotenpunkte an denen viele verschiedene Informationen zusammenlaufen. In diesem Sinne ist der Aufbau des Internets vergleichbar mit dem des Gehirns.

Jedoch werden im Internet an den Knotenpunkten die Informationen unabhängig voneinander weitergeleitet und nicht miteinander verarbeitet, was im Gehirn unweigerlich der Fall ist. Das Internet ist nur eine geschickte Anordnung von Leitern.

Die entscheidende Größe in Tononis Arbeit zur Quantifizierung von Bewusstsein ist die integrierte Information, welche als Unaufspaltbarkeit von Information interpretiert werden kann. Dazu muss zunächst der Informationsbegriff definiert werden. Dazu betrachtet Tononi Mechanismen, die in diskreten Zeitschritten die zeitliche Entwicklung eines Zustandes bestimmen.

Im Folgenden werden Beispiele betrachtet, die ein System aus A und B verwenden, die sich in einem der Zustände 0,1 oder 2 befinden können, welche in den Abbildungen durch weiße, graue und gelbe Kreise dargestellt werden. Das Gesamtsystem kann also in neun verschiedenen Zuständen vorliegen. Dieses Beispiel ist natürlich nicht annähernd so komplex wie das menschliche Gehirn, dass aus einer großen Anzahl von Neuronen besteht, welche entweder feuern oder nicht feuern können. Information liegt für Tononi genau dann vor, wenn für einen gegebenen Zustand s die vom Mechanismus induzierte Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Zustand in der Zukunft (ein Zeitschritt weiter) und für den Zustand in der Vergangenheit (ein Zeitschritt zurück) von der Gleichverteilung verschieden ist. Er fasst dies in dem Informationspostulat "Difference that makes a difference ..." zusammen.

Diese Forderung resultiert in der folgenden Definition für die Cause Effect Infor-

mation (CEI):

$$EI(P|s) = D[(P|s), P^{Hmax}] \quad (3.1)$$

$$EI(F|s) = D[(F|s), F^{Hmax}] \quad (3.2)$$

$$CEI(P, F|s) = \min[EI(P|s), EI(F|s)] \quad (3.3)$$

Dabei steht EI für Effective Information, P für Past, F für Future, s ist der aktuelle Zustand des Systems, P^{Hmax} sowie F^{Hmax} repräsentieren die Gleichverteilung in Vergangenheit bzw. Zukunft und D ist ein Maß, um den Abstand der Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu bestimmen.

Zur Veranschaulichung verweisen wir auf den Mechanismus abgebildet in 1, der den folgenden Regeln folgt: A kopiert seinen Zustand nach B während der Zustand B zufällig gewählt wird. In einem zweiten Postulat definiert Tononi die wichtigste



Abbildung 1: Links: Für B ist bekannt, dass $B = 1$ ist. Das liefert eine Information für die Vergangenheit, nämlich $A = 1$ und somit eine Abweichung von der Gleichverteilung. Allerdings ist keine Information über die Zukunft gegeben, sodass keine CEI generiert wird.

Rechts: Hier ist über den aktuellen Zustand $A = 1$ bekannt, woraus $B = 1$ in der Zukunft folgt also eine Information für die Zukunft. Allerdings wird in diesem Fall keine Information für die Vergangenheit generiert woraus $CEI = 0$ folgt.

Es wird nur eine $CEI \neq 0$ generiert, wenn A und B bekannt wären.

Größe seiner Arbeit die integrierte Information: "Information is integrated if it cannot be partitioned into independent components". Wird ein Mechanismus in zwei Teilmechanismen unterteilt, kann das zur Folge haben, dass sich die induzierten Wahrscheinlichkeitsverteilung für Zukunft und Vergangenheit verändern. Genau diese Differenz wird als integrierte Information definiert. Da es jedoch viele mögliche Aufteilungen für einen Mechanismus gibt wird zur Bestimmung der integrierten Information diejenige Aufteilung gewählt, die die integrierte Information minimiert.

$$\phi^{MIP}(P|s) = D \left[(P|s), \prod (P|s/MIP) \right] \quad (3.4)$$

$$\phi^{MIP}(F|s) = D \left[(F|s), \prod (F|s/MIP) \right] \quad (3.5)$$

$$\phi^{MIP}(P, F|s) = \min [\phi^{MIP}(P|s), \phi^{MIP}(F|s)] \quad (3.6)$$

Das MIP meint, dass die Aufteilung gewählt wird, die die integrierte Information minimiert. Ein einfaches Beispiel in dem die integrierte Information den Wert null annimmt, ist schnell gefunden. Dazu betrachte man einen Mechanismus mit

folgender Vorschrift: A kopiert nach B und B kopiert nach A . Eine Aufteilung bei der sicherlich keine Information verloren geht ist, wenn der gesamte Mechanismus $\{A, B\} \rightarrow \{A, B\}$ in die Teilmechanismen $\{A\} \rightarrow \{B\} \cup \{B\} \rightarrow \{A\}$ aufgeteilt wird. Um ein Beispiel für $\Phi \neq 0$ zu geben, wird ein etwas komplizierteren Mechanismus betrachtet:

- Wenn $A > B \Rightarrow A = 0$ und $B = 2$
- Wenn $A = B \Rightarrow A = 1$ und $B = 1$
- Wenn $A < B \Rightarrow A = 2$ und $B = 0$

Zunächst werden dafür die Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmt, die durch den gesamten Mechanismus, $\{A, B\} \rightarrow \{A, B\}$, für den Zustand $\{A = 2, B = 0\}$ induziert werden.

Für den nächsten Zeitschritt ist der Zustand eindeutig gegeben, womit für die Wahrscheinlichkeitsverteilung folgt $P(\{A = 0, B = 2\}) = 1$.

Für die Vergangenheit sind alle Zustände gleich wahrscheinlich für die $A < B$ gilt, also $P(\{A = 0, B = 2\}) = P(\{A = 0, B = 1\}) = P(\{A = 1, B = 2\}) = \frac{1}{3}$.

Nun wird die Aufteilung des Mechanismus in die Teilmechanismen $\{A\} \rightarrow \{A\} \cup \{B\} \rightarrow \{B\}$ betrachtet. Für die folgende Rechnung darf zur Bestimmung von A nur die Information über den Zustand von A selbst verwendet werden, genauso wie für B .

Für die Zukunft ist daher über A nur bekannt, dass es nicht 2 sein kann, da es im aktuellen Zustand 2 ist und somit nicht kleiner als B sein kann. Damit sind für A die Werte 0 und 1 möglich. Da $B = 0$ für die Gegenwart gilt, sind hier die Werte 1 und 2 in der Zukunft möglich. Auch für die Vergangenheit sind genau diese Werte für A und B möglich. Somit ergibt sich für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen:

$$P(\{A = 0, B = 2\}) = P(\{A = 0, B = 1\}) = P(\{A = 1, B = 2\}) \quad (3.7)$$

$$= P(\{A = 1, B = 1\}) = \frac{1}{4} \quad (3.8)$$

Wird für das Abstandsmaß D , $D(P_1, P_2) = \sum_i |P_1(s_i) - P_2(s_i)|$ verwendet, ergibt sich für die integrierte Information des betrachteten Mechanismus bei $s = \{A = 2, B = 0\}$:

$$\phi^{MIP}(P|s) = \frac{1}{2} \quad (3.9)$$

$$\phi^{MIP}(F|s) = \frac{3}{2} \quad (3.10)$$

$$\phi^{MIP}(P, F|s) = \min[\phi^{MIP}(P|s), \phi^{MIP}(F|s)] = \frac{1}{2}. \quad (3.11)$$

Für einen anderen Zustand s werden andere Werte für Φ^{MIP} generiert. Betrachtet man das Gehirn als einen großen Mechanismus müssen zunächst alle Schnitte vorgenommen werden, die das Hirn in unabhängige Teilmechanismen unterteilen, d.h. alle möglichen Schnitte vorgenommen werden, bei denen $\Phi^{MIP} = 0$ gilt. Dann kann jedem dieser unabhängigen Teilmechanismen oder Konzepte eine integrierte Information zugeordnet werden. Aus diesen Konzepten ist nun gerade das Konzept das bewusste Konzept, dass die maximale integrierte Information aufweist. Je nach Zustand ist dieses Kernkonzept unterschiedlich. Tononi fasst dies im Exklusionspostulat zusammen: "Integrated information is about one set of causes and

effects, only those that are maximally irreducible". Dieses Postulat begründet er damit, dass man sich nur einer Sache bewusst sei und nicht mehrerer gleichzeitig. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass diese Prozedere nicht auf dem Neuron Level vorgenommen werden sollte. Zunächst werden auf dem Neuronlevel wie oben beschrieben alle Konzepte identifiziert und dann dieses Prozedere mit den Konzepten anstelle der Neuronen wiederholt. So wird der bewusste Komplex, eine Konzept aus Konzepten, identifiziert.

4 Consciousness as a State of Matter

In seiner Arbeit "Consciousness as a State of Matter" versucht Tegmark die Idee von Tononi auf physikalische Systeme zu übertragen und somit eine erste physikalische Beschreibung von Bewusstsein zu finden. Er versucht also mittels physikalischer Observablen ein Maß für die Bewusstseinsfähigkeit zu konstruieren, d.h. eine Möglichkeit zu finden ein System in einem bestimmten Zustand, in Analogie zu zum Beispiel Aggregatzuständen, als bewusst zu klassifizieren. Unter der Annahme, dass die Gesetze der Quantenmechanik gültig sind und somit die Dynamik durch die Schrödingergleichung gegeben ist, muss das Maß für die Bewusstseinsfähigkeit aus dem Hamiltonian H und der Dichtematrix ρ konstruiert werden, da die Zeitentwicklung des Zustandes, der vollständig durch ρ gegeben ist, vollständig durch H beschrieben wird. Aufbauend auf der Arbeit von Tononi fordert Tegmark, dass ein bewusstes System über integrierte Information verfügen muss. Zusätzlich fordert Tegmark aber auch Unabhängigkeit und Dynamik, da bewusste Systeme unabhängig von ihrer Umgebung operieren können und eine Unterteilung in bewusstes System und Umgebung möglich ist. Dynamik wird gefordert, da bewusste Systeme nicht statisch sind, sondern Informationen prozessieren. Zunächst versucht Tegmark ein Maß für den Informationsgehalt eines Systems in einem bestimmten Zustand zu finden. Ein vernünftiges Maß stellt dabei die Shannonentropie dar, die klassisch definiert ist als:

$$S = - \sum_i p_i \log(p_i). \quad (4.1)$$

Um zu veranschaulichen, dass diese Definition sinnvoll ist, stelle man sich ein System vor, das N Konfigurationen hat, die alle gleich wahrscheinlich sind, d.h. $p_i = N^{-1}$. Wird nun eine dieser Konfigurationen angenommen, sollte ihre Information mit der Systemgröße N zunehmen. Einsetzen in die Definition der Shannonentropie liefert $S = \log(N)$, also das gewünschte Resultat. Die quantenmechanische Verallgemeinerung der Entropie ist gegeben durch:

$$S(\rho) = \text{Tr}[\rho \log(\rho)]. \quad (4.2)$$

Davon ausgehend definiert er die integrierte Information Φ als:

$$\Phi = S(\rho_{\text{gesamt}}) - (S(\rho_1) + S(\rho_2)). \quad (4.3)$$

Diese Definition ist naheliegend, da ρ_1 und ρ_2 zwei Teilsysteme des Gesamtsystems ρ beschreiben und laut Tononi integrierte Information genau dann entsteht, wenn durch Aufteilung des Systems Information verloren geht. Allerdings ist die

integrierte Information nicht durch eine beliebige Aufspaltung gegeben, sondern durch diejenige, die Φ minimiert, woraus folgende Definition gefolgert wird:

$$\Phi_{\min}(\rho) = \min_{\rho_1, \rho_2} [S(\rho) - (S(\rho_1) + S(\rho_2))]. \quad (4.4)$$

Bei dieser ‘klassische’ Minimierung wird die Dichtematrix des gesamten Systems in Dichtematrizen verschiedener Teilsysteme zerlegt. Eine weitere Möglichkeit der Minimierung ergibt sich durch die freie Wahl der Basis des Gesamtsystems in der Quantenmechanik. Es besteht also die Freiheit, die Dichtematrix des Gesamtsystems in eine andere Basis zu transformieren:

$$\Phi'_{\min}(\rho) = \min_U [\Phi_{\min}(U^\dagger \rho U)]. \quad (4.5)$$

Es lässt sich zeigen, dass $\Phi_{\min}(U^\dagger \rho U)$ gerade von dem U minimiert wird, welches die Dichtematrix ρ diagonalisiert. Des Weiteren zeigen numerische Analysen, dass $\Phi'_{\min}(\rho)$ für beliebig große Systeme nicht wesentlich größer als $\frac{1}{4}$ wird. Laut Tegmark ist das deutlich zu wenig für ein bewusstes System, da man mit Hilfe von Hopfield Netzwerken, die Anzahl an Attraktoren des menschlichen Gehirns auf in etwa 10^{10} abschätzen kann. Damit lässt sich einen integrierter Informationsgehalt von $\Phi \sim 37$ Bit abschätzen. Attraktoren sind dabei verschiedene Lösungsmuster die für alle möglichen Eingänge zur Verfügung stehen. Das für quantenmechanische Systeme aufgrund der Möglichkeit der freien Basiswahl nur sehr kleine Werte für den integrierten Informationsgehalt erreicht werden können, bezeichnet Tegmark als Quantenintegrationsparadoxon. Er versucht außerdem integrierte Information in der Zeitentwicklung, d.h. im Hamiltonian, zu finden, aber auch hier findet er keine ausreichend große integrierte Information.

Für die Kriterien Dynamik und Unabhängigkeit ergeben sich in der quantenmechanischen Beschreibung keine Probleme. Es ist möglich ein simples System großer Dynamik zu finden und zwar eine Überlagerung der Eigenzustände maximaler und minimaler Energie. Diese Überlagerung bezeichnet Tegmark als zu einfach, da zu wenig Information prozessiert wird, da nur ein kleiner Teil des Hilbertraums durch die Lösung erreicht wird. Allerdings ist es möglich durch ein kleine Störung des einfachen Systems eine komplexe und weiterhin große Dynamik zu genießen.

Zur Bestimmung der Unabhängigkeit eines Systems sollte die Relation zwischen der Wechselwirkung des Systems mit der Umwelt und seiner Selbstwechselwirkung betrachtet werden. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wird die Autonomie als Maß für die Unabhängigkeit definiert:

$$A = \frac{\tau_{ind}}{\tau_{dyn}}. \quad (4.6)$$

Dabei beschreibt τ_{ind} eine typische Zeitskala in der Wechselwirkungen mit der Umwelt stattfinden und τ_{dyn} die typische Zeitskala der Eigendynamik des Systems. Auch hier ist es nicht schwierig ein Beispiel zu finden in dem eine große Autonomie für große Systeme erzeugt werden kann, z.B. wächst die Autonomie für ein System aus gekoppelten harmonischen Oszillatoren exponentiell mit deren Anzahl, was daran liegt, dass die Dynamik des Systems exponentiell ansteigt während die Wechselwirkungen mit der Umwelt nur linear zunehmen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es kein Problem darstellt Systeme zu finden, die ausreichend dynamisch und unabhängig sind, wohingegen es für quantenmechanische Systeme nicht möglich ist ausreichend integrierte Information zu

generieren. Das liegt daran, dass die Basis in der das System beschrieben wird in der Quantenmechanik frei gewählt werden kann. Dieses Problem könnte vermieden werden, wenn durch bisher unbekannte Gründe eine Basis, wie z.B. die Teilchenbasis, bevorzugt wäre. In diesem Kontext ist es interessant die Frage zu stellen, ob sich die Teilchenbasis gerade dadurch auszeichnet, dass in ihr die integrierte Information maximiert wird, sodass gerade in dieser Basis bewusste Wesen existieren können.

Weiterhin muss darauf hingewiesen werden, dass auch die neurobiologische Beschreibung des Bewusstseins sich in den Anfängen befindet und dass es sich bei Tononis Modell der integrierten Information nicht um eine bestätigte, jedoch auf den ersten Blick plausible Theorie handelt.

5 Literaturverzeichnis

- [1] arbeitsblaetter.stangl-taller.at/GEHIRN/ abgerufen am 11.01.16
- [2] G.Tononi. "Integrated information theory of consciousness: an updated account". <http://www.architalbiol.org/aib/article/viewFile/15056/23165867>
- [3] M.Tegmark. "Consciousness as a state of matter". arXiv: 1401.1219v3