Signalübertragung in den Nerven und die Quantum-Mind-Hypothese

Gary Bruno Schmid

Zürich, Schweiz

Schlüsselwörter

Bewusstsein · de-Broglie-Wellenlänge · Gliazellen · Quanteneffektgrösse · Quantum-Mind-Hypothese · Quantenphysik · Signalübertragung im Gehirn

Zusammenfassung

Diese Arbeit geht folgender Frage nach: «Inwiefern sind auch quantenphysikalische Prozesse entscheidend für die Funktionsweise des Gehirns?» Um diese Frage theoretisch auf einer soliden empirischen Basis beantworten zu können, muss man die Eigenschaften der Signalleitung im Gehirn untersuchen. Diese erfolgt innerhalb der Neurone durch die Fortpflanzung von Spannungsänderungen in Form von Aktionspotenzialen, den sogenannten Spikes. Die Verteilung der elektrischen Spannung nach Durchlaufen des Axons kann Eigenschaften aufweisen, die nur quantenphysikalisch erklärbar sind, wenn die parenchymischen Dimensionen eines Axons, einer Synapse oder eines Mikrotubulus für die an der Depolarisation beteiligten Ionen genügend klein sind. Was «genügend klein» heisst, kann mithilfe der Quanteneffektgrösse erklärt werden, die von mir auf der Basis der de-Broglie-Wellenlänge definiert wird. Die geschätzten Quanteneffektgrössen der Ionen, die an der Bildung und Fortpflanzung der Spikes beteiligt sind, zeigen, dass mindestens ein Teil der Informationsverarbeitung im Gehirn auf quantenphysikalischen Prozessen basiert. In der Konsequenz können Denkprozesse teilweise auf Quanteneffekte zurückgeführt werden. Je grösser die Quanteneffektgrösse ist, desto eher werden Quanteneffekte im Verhalten des Systems zum Vorschein kommen. Bei Quanteneffektgrössen ≥ 1 muss die Quantenphysik einbezogen werden. Dies ist der Bereich der Quantenwelt. Quanteneffektgrössen zwischen ca. 0,01 und 1 bezeichnen nach meiner Definition die mesoskopische Welt. Für Quanteneffektgrössen kleiner als 0,01 haben wir es meines Erachtens eher mit Phänomenen der Alltagswelt der klassischen Physik zu tun. Aufgrund empirischer zellanatomischer Gegebenheiten wird eine Quanteneffektgrösse von ca. 0,01–0,5 für das Ca^{++} -, K^+ - oder Na^+ -Ion in den verschiedenen Nervenleitungen (Mikrotubulus, synaptische Spaltbreite, Axon) geschätzt. Bis und mit diesen Einschätzungen sind alle Argumente streng wissenschaftlich haltbar. Was aus diesen Argumenten über die subjektive Wahrnehmung – über das «Bewusstsein an sich» – abgeleitet werden kann, wird im Ausklang kurz diskutiert. Im Sinne eines wissenschaftlich-spekulativen Erklärungsver-

suchs wird angenommen, dass Systeme, in denen die an den Signalleitungen innerhalb oder zwischen Zellen beteiligten Botenstoffe durchschnittliche Quanteneffektgrössen haben, die nicht im mesoskopischen Bereich liegen, nicht in der Lage wären, sich selbst zu reflektieren. Die Quantenphysik – richtig dosiert im Gehirn – scheint die Basis des Bewusstseins zu sein. Veränderungen der anatomischen Verhältnisse auf mikroskopischer Ebene (z.B. Veränderung der Myelinschicht oder der charakteristischen Dimensionen des Systems $S(\partial_s)$) würden eine Veränderung der «Dosis Quantenphysik» nach sich ziehen und das Bewusstsein beeinflussen.

Keywords

Consciousness · de Broglie wavelength · Glia · Quantum effect number · Quantum mind hypothesis · Quantum physics · Signaling in the brain

Summary

Signal Transmission in the Nerves and the Quantum Mind Hypothesis

This work explores the following question: 'To what extent are quantum physical processes substantially involved in the functioning of the brain?' To properly answer this question theoretically on a sound empirical basis, one has to examine the properties of signal transmission in the brain. The transmission of signals within the brain occurs via the propagation of voltage changes along neurons in the form of action potentials, so-called spikes. The distribution of the electric potential after passing through the axon can display characteristics which can only be explained by quantum physical laws when the parenchymic dimensions of an axon, a synapse, or a microtubule are sufficiently small for the ions involved in the depolarization. What 'sufficiently small' means can be explained with the help of what I call a 'quantum effect number' defined on the basis of the de Broglie wavelength. The estimated quantum effect numbers of the ions involved in the formation and transmission of the spikes indicate that at least a portion of the information processing in the brain can involve quantum physical processes. As a consequence, thought processes can be partly attributed to quantum effects. The larger the quantum effect number, the more quantum effects can be expected to be involved in the behavior of the system under investigation. For quantum effect numbers ≥ 1 one has to take quantum physics into

consideration. This is the realm of the quantum world. Quantum effect numbers between about 0.01 and 1 denote what I call the mesoscopic world. For quantum effect numbers less than 0.01, we are dealing most likely with macroscopic phenomena, i.e. with the everyday world. The quantum effect numbers estimated in this study on the basis of reasonable cellular, anatomical considerations lie in the range of about 0.01–0.5 for Ca^{++} , K^+ , or Na^+ ions within different nerve conduits (microtubule, synaptic gap width, axon). All arguments up to this point are strictly tenable from a purely scientific perspective. How these arguments might pertain to our understanding of subjective perception – consciousness-onto-itself – is also discussed briefly in the conclusions. In particular, it is postulated in terms of a scientific speculation that systems, in which the relevant processes for the biochemical messengers that are instrumental in sending signals within or between cells and which have average quantum effect sizes which do not lie within the mesoscopic domain, would not be capable of introspection. A proper dose of quantum physics in the brain seems to be the basis of consciousness. Changes in anatomy at the microscopic level (e.g. changes in the myelin sheath or in characteristic dimensions of the system S (∂_S)) would necessarily result in a change of the ‘dose of quantum physics’ and, accordingly, affect consciousness.

Signalübertragung in den Nerven

Diese Arbeit geht der folgenden Frage nach: «Inwiefern sind auch quantenphysikalische Prozesse entscheidend für die Funktionsweise des Gehirns?» Um diese Frage theoretisch auf einer soliden empirischen Basis beantworten zu können, muss man die Eigenschaften der Signalleitung im Gehirn untersuchen. Selbstverständlich sind die chemischen Reaktionen zwischen den Atomen, Ionen und Molekülen jedes chemischen Prozesses letztendlich quantenphysikalischer Natur. Nichtsdestotrotz lassen sich viele für uns relevante Prozesse mit den Begrifflichkeiten der klassischen Physik formulieren. Auch wenn die Chemie auf quantenphysikalischen Prozessen basiert, lässt sich bei den meisten, alltäglichen chemischen Reaktionen eine Ebene finden, oberhalb derer die Quantennatur der chemischen Prozesse keine Rolle mehr spielt; d.h., sie erzeugt keine Quantenphänomene (Verschränkung, Tunneling usw.) mehr, wie z.B. beim Kochen.

Eine Erregung (Signal) besteht aus einer Potenzialdifferenz (Aktionspotenzial) quer zur Membran des – häufig von Gliazellen umhüllten – Axons und pflanzt sich entlang der Membran fort. Ionenströme erzeugen eine Depolarisation des Ruhemembranpotenzials, durch die das Aktionspotenzial aufgebaut wird. Dieser Prozess wird grafisch auf einem «Elektrische Spannung (y-Achse) versus Zeit (x-Achse)»-Diagramm als eine dornenartige Spitze der elektrischen Spannung (sogenannter Spike) dargestellt (Abb. 1) [1].

Abb. 1. Elektrische Spannung an einem Ort entlang des Axons zu einem gegebenen Zeitpunkt (modifiziert nach [1]).

Eine Depolarisation geht Hand in Hand mit einer vorübergehenden Öffnung spannungsaktivierter Natriumkanäle in den Axonen. Dabei werden Natrium-Ionen aus der Zelle heraus und Kalium-Ionen gegen den chemischen Konzentrations- und den elektrischen Ladungsgradienten in die Zelle hineintransportiert. Das Aktionspotenzial setzt sich in der Folge als eine Depolarisationswelle über die Membran entlang der gesamten Länge des Axons fort (Schlüsselbegriff: «saltatorische Erregungsleitung»), bis das Signal an einer Verzweigung oder einer Synapse der Axonterminals verteilt wird.

Die Frage, wie diese Verteilung jeweils bestimmt wird, ist noch offen. Je nachdem, ob der Prozess dieser Verteilung eher nach quantenphysikalischen (wellenartig) oder nach klassischen (teilchenartig) Gesetzen abläuft, wird das Verhalten der Signalübertragung in den Nerven bzw. weniger von einem (in den Gliazellen versteckten? [2]) Beobachter – wie beim Quantendoppelspaltexperiment – abhängig sein. Ob ein (sich in Bewegung befindendes) Elementarteilchen, ein Ion, ein Atom oder ein Molekül sich nach klassischen oder quantenphysikalischen Gesetzen verhält, hängt unter anderem ab von den physischen Dimensionen des natürlichen Systems, innerhalb dessen das Teilchen lokalisiert ist (Schlüsselbegriff: de-Broglie-Wellenlänge). Sind diese sehr begrenzt, also zu eng für die Teilchen, muss die Quantenphysik in Betracht gezogen werden. Hierauf soll im späteren Verlauf eingegangen werden.

Das Gleiche gilt für die Prozesse, welche die Dendriten betreffen. Dendriten dienen als Eingangsregion von synaptisch übertragener Information, die dann im Perikary-

on aufsummiert und über das Axon an andere Nervenzellen weitergegeben wird. Das klassische Bild der Dendriten als eine postsynaptische Zellstruktur mit passiven elektrischen Eigenschaften musste im Laufe der Jahre modifiziert werden [3]. Die Dendriten einiger Neuronentypen (z.B. die Purkinje-Zellen im Kleinhirn, einige Pyramidenzellen im Isocortex) sind ähnlich wie das Axon in der Lage, elektrische Potenziale aktiv fortzuleiten. Das die Depolarisation tragende Ion ist dabei oft nicht das Natrium (Na^+) (wie im Axon), sondern das Kalzium (Ca^{2+}), wenn es in der Dendritenmembran spannungsabhängige Kanäle gibt.

Fazit

Die Signalleitung im Gehirn erfolgt innerhalb der Neurone durch die Fortpflanzung von Spannungsänderungen in Form von Aktionspotenzialen, den sogenannten Spikes. Die Verteilung des elektrischen Potenzials nach Durchlaufen eines Axons kann Eigenschaften aufweisen, die nur quantenphysikalisch erklärbar sind, wenn die parenchymatischen Dimensionen eines Axons, einer Synapse oder eines Mikrotubulus für die an der Depolarisation beteiligten Ionen genügend klein sind (strikt gesehen können übrigens auch «grosse» Systeme Quantenverhalten zeigen, z.B. Supraflüssigkeiten). Was «genügend klein» bedeutet, wird im Abschnitt zum Thema «de-Broglie-Wellenlänge» erklärt.

Quantum-Mind-Hypothese

Der Mensch empfängt Signale aus der Umwelt, die er als Information für sich bzw. für sein Überleben sinnvoll deutet (Schlüsselbegriff: Qualia) und nutzt. Die genaue Funktionsweise ist jedoch vollkommen unklar (Schlüsselbegriff: Hard Problem). Ob wir Musik hören oder fernsehen, die *Spikes* sind alle gleich beschaffen: Die physikalischen Eigenschaften der Aktionspotenziale verraten nicht, wie die Reize, die sie ausgelöst haben, gestaltet sind. Erst die Eintrittspforten bzw. die Aufnahme der Signale, die räumliche Verteilung im Gehirn, die Kombination verschiedener Signale und ihre Einbettung in die vorhandenen Strukturen und Informationen bilden den neuronalen Code, auf dem sensorische Wahrnehmungen basieren, sodass sie vom Subjekt irgendwie verstanden, eingeordnet und genutzt werden können (Schlüsselbegriff: verkörperte Intelligenz). Dennoch bleibt die Frage, wie das subjektive Verständnis eines neuronalen Signals genau zustande kommt.

Nehmen wir z.B. an, dass wir Englisch lernen wollen. Unser Sprachlehrer zeigt uns ein Bild von einem Hund und sagt «Dog!». Die Signale, die dabei durch den optischen Kanal gehen, ermöglichen uns, das visuell wahrge-

nommene – und bereits bekannte und gespeicherte – Objekt als Hund zu erkennen. Was ermöglicht uns aber, das mit dem Objekt assoziierte akustische Signal «Dog!» durch die grosse Menge von Nerven mit einer Unzahl von Axonen und Dendriten zuverlässig so zu steuern, dass dieser Laut eindeutig mit dem deutschen «Hund» und nicht mit einem anderen bereits gespeicherten Wort assoziiert wird?

Es ist naheliegend anzunehmen, dass es im Gehirn einen «versteckten Beobachter» gibt, der an jeder Verzweigung (der Axone und Dendriten) entscheidet, wie diese Spikes, welche die Information «Hund» irgendwie beinhalten, durch die verschiedenen Nerven und Nervenendigungen hindurch- bzw. weitergeleitet werden und so den neuen (englischen) Laut bzw. das Wort «Dog» mit den bereits unter «Hund» abgelegten Informationen verknüpfen. Im Bereich des maschinellen Lernens (machine learning) werden Lernprozesse ganz ohne die Quantenphysik aber sehr wohl supervidiert, «unsupervised» oder mit «reinforcement learning» durchgeführt. Wie es beim maschinellen Lernen einen Beobachter gibt, ist es anzunehmen, dass ein Beobachter auch beim Lernen im Gehirn eine wichtige Rolle spielt.

Bei allen quantenphysikalischen Prozessen muss gesetzmässig immer irgendeine Art von Beobachter beteiligt sein: Subjekt und Objekt sind zwei Seiten derselben Medaille bzw. Münze und hier desselben Messapparats, und dasselbe gilt für die Teilchen- und Welle-Natur jedes Elementarobjekts. Der Begriff «Beobachter» hat in der Quantenphysik eine ziemlich scharf umrissene Bedeutung. Das Problem hier besteht aber darin, dass mit dem Begriff «Beobachter» die Idee erzeugt wird, es handle sich um eine in irgendeiner Form selbstbewusste Struktur wie ein Lebewesen. Technisch gesehen kann ein Beobachter auch etwas Primitives und Unbelebtes sein – wie z.B. ein thermisch angeregtes Gas. Eigentlich geht es mehr um die Frage, wie es durch den Beobachter zum sogenannten «Kollaps der Wellenfunktion» kommt [4, 5]. Eine Möglichkeit ist hierbei der Prozess der Dekohärenz, die auch durch unbelebte Objekte (z.B. statistisch verteilte Gase) erzwungen werden kann. Diesen Überlegungen folgend müsste gesagt werden, dass quantenphysikalische Systeme nach Kontakt mit einer wie auch immer gearteten «Messapparatur» klassisches Verhalten zeigen. Wie es genau zu diesem «Zusammenbruch der Wellenfunktion» kommt und was er genau bedeutet, ist weiterhin Gegenstand der Diskussion und Forschung und bis heute nicht vollständig verstanden. Ein möglicher Mechanismus basiert auf der Idee der Dekohärenz [6].

Die üblichen medizinischen Lehrbuch-Erklärungen der Natrium-Kalium-Pumpe oder von Botenstoffübertragungen beruhen auf einem vereinfachten, klassischen Weltbild von Teilchen bzw. Spikes, die sich kausal und ohne die Mitwirkung eines Beobachters wie Bälle auf der

Schiene einer Kugelbahn durch die Nervenbahnen hindurch bewegen.

Wie aus der Quantenphysik bekannt ist, können Teilchen wie z.B. Photonen sich auch wie Wellen verhalten und daher mit sich selbst interferieren (Schlüsselbegriff: Teilchen-Welle-Zweieinigkeit). In diesem Fall wäre eine bessere Metapher für die Bewegung der Spikes innerhalb des Nervensystems ein Flipperautomat, der durch den Spieler bzw. Beobachter kontrolliert bzw. gesteuert wird.

Die grundlegende Frage dabei ist, ob sich die Ionen, die an der Bildung der erwähnten Spikes beteiligt sind, innerhalb der engen parenchymischen Dimensionen eines Axons, einer Synapse oder eines Mikrotubulus eher quantenphysikalisch oder eher klassisch verhalten – egal, ob hier von Na^+ , K^+ , Ca^{2+} oder von irgendwelchen anderen an der Signalübertragung beteiligten Ionen oder Neurotransmittern/Botenstoffen die Rede ist. Erst wenn gezeigt wird, dass diese Ionen sich quantenphysikalisch verhalten, hat die Quantenphysik eine Bedeutung für das Verständnis von im Gehirn ablaufenden Prozessen. In Abhängigkeit von der quantenphysikalischen oder klassischen Verhaltensweise ist dann ein solcher (versteckter) Beobachter nötig oder eben nicht, um die Funktionsweise des Gehirns genauer zu verstehen (siehe Bemerkung zum fundamentalen Problem des Beobachters in der Quantenphysik).

Um diese Frage zu beantworten, muss ausführlich auf die de-Broglie-Wellenlänge eingegangen werden.

Die de-Broglie-Wellenlänge

Materie in Bewegung kann sich sowohl als Teilchen als auch als Welle verhalten. Aufprall und Kollision sind zwei klassische Beispiele für Teilchenverhalten. Beugung und Interferenz sind zwei typische Beispiele für Wellenverhalten. Die Wellenartigkeit eines Teilchens wird in der Physik anhand der sogenannten de-Broglie-Wellenlänge des Teilchens eingeschätzt.

Wenn man von der de-Broglie-Wellenlänge λ_{deB} eines Teilchens X spricht, stellt sich wohl die Frage: «Welche Welle ist hier gemeint?» Bei der hier gemeinten Welle handelt es sich um eine wellenförmige (mathematische) Wahrscheinlichkeitsverteilung des Ortes des sich mit der Geschwindigkeit v bewegenden Teilchens X in einem abstrakten, mehrdimensionalen Hilbert-Raum – sie ist also keine schwingende Bewegung von Materie in der realen, vierdimensionalen Raumzeit wie z.B. eine Wasserwelle auf der Oberfläche eines Sees. (Etwas genauer: λ_{deB} ist die Periodizität der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ψ , auch Wellenfunktion genannt, die das Verhalten des Teilchens im Raum-Zeit-Kontinuum beschreibt. Die Wellenfunktion ist eine komplexwertige Funktion, deren Betragsquadrat gleich der Wahrscheinlichkeitsdichte des durch sie beschriebenen Teilchens ist.)

Diese Wahrscheinlichkeitswelle ist räumlich ausgebreitet wie ein Paket oder Bündel von mathematischen Schwankungen (auch «Materie-Wellen», «Wellenpaket» oder besser noch «Wahrscheinlichkeitspaket» genannt), das sich mit der Teilchengeschwindigkeit v von X fortsetzt. Folglich gibt es genau betrachtet keine eindeutige Position für das Teilchen X, wo es, d.h. sein Gewichtsschwerpunkt bzw. Massenmittelpunkt, sich mit 100%iger Wahrscheinlichkeit befindet.

Die folgende Metapher illustriert das quantenphysikalische Problem der Delokalisation anhand einer klassischen Wahrscheinlichkeitsdichte und nicht anhand einer Wahrscheinlichkeitsamplitude, welche eigentlich notwendig wäre, um auch die Wellennatur der Quantenphysik zu verstehen. Die in der Metapher beschriebenen Schwierigkeiten sind eigentlich nicht quantenphysikalischer Natur, sondern sie treten bei jeder Wahrscheinlichkeitsverteilung auf.

Der metaphorische Herr X – Teil 1

Stellen Sie sich zur Veranschaulichung einen mafiösen Verein vor, der insgesamt genau 100 Mitglieder hat. Alle 100 Mitglieder sind in einem einzigen, riesigen Kongresszentrum verteilt und Herr X, ein besonders berühmtes Mitglied dieses mafiösen Vereins, wird polizeilich gesucht. Diese Verteilung entspricht einer sich dynamisch wandelnden geometrischen Figur. Für jede derartige Figur lässt sich in jedem Augenblick der geometrische Schwerpunkt bestimmen. Wir stellen einem Physiker nun die Frage: «Wo genau ist dieser mafiöse Verein?» Falls alle Mitglieder im selben Zimmer Ω in einem perfekten Kreis genau in der Mitte des Zimmers Ω , d.h. um den geometrischen Schwerpunkt Ω_0 herum, sitzen, lautet seine Antwort: «Genau in der Mitte des Zimmers Ω im Punkt Ω_0 !»

Falls nur 50 Mitglieder gleichmässig verteilt in diesem Kreis im Zimmer Ω sitzen und die anderen 50 Mitglieder sich ebenso gleichmässig verteilt in einem perfekten Kreis genau um die Mitte eines anderen Zimmers Υ versammeln, d.h. um den geometrischen Schwerpunkt Υ_0 , lautet seine Antwort: «Der Verein befindet sich mit 100%iger Wahrscheinlichkeit genau im geometrischen Schwerpunkt $\hat{a}$, der in der Mitte der Strecke zwischen den geometrischen Schwerpunkten Ω_0 und Υ_0 liegt!»

Geht der Fragesteller aber dorthin, so findet er an dieser Stelle keinen einzigen Menschen! Die Mitglieder des Vereins sind verteilt: zu 50% um den geometrischen Schwerpunkt Ω_0 in der Mitte des Zimmers Ω und zu 50% um den geometrischen Schwerpunkt Υ_0 in der Mitte des anderen Zimmers Υ .

Die Geschichte geht noch weiter. Es besteht bloss eine 1%ige Wahrscheinlichkeit, Herrn X zu lokalisieren, auch wenn wir genau wissen, wo sich der Verein (seine Mit-

glieder) im Kongresszentrum befindet. Für eine Person, die Herrn X kennt, reicht es zu wissen, in welchem Zimmer er sich aufhält – in diesem Fall besteht eine 50%ige Wahrscheinlichkeit über seinen Aufenthaltsort. Wie gut ihn dort jedoch die Fahnder finden, hängt noch von der Grösse des Zimmers ab. Falls das Zimmer z.B. Δ Meter breit und Δ Meter lang ist und somit eine Fläche von $\Delta \times \Delta \text{ m}^2$ hat, könnten sie sodann seinen Ort bis auf eine Genauigkeit von $\Delta^2 \text{ m}^2$ bestimmen (das Kongresszentrum liegt immerhin ebenerdig).

Nun spazieren diese beide Gruppen – benannt nach den Räumen, in denen sie anfänglich gesessen sind: Gruppe Ω und Gruppe Υ – als zwei voneinander unabhängige Gruppen im Kongresszentrum umher. Das Verhalten des Herrn X kann der Physiker wie die Bewegung eines Teilchens beschreiben, das sich im geometrischen Schwerpunkt $\hat{a}$ bewegt, der in der Mitte der Strecke zwischen den geometrischen Schwerpunkten der Gruppen Ω und Υ liegt. Die Mitglieder sind jedoch 50/50 um die sich gleichzeitig bewegenden geometrischen Schwerpunkte Ω_0' und Υ_0' verteilt (das Apostroph ' auf Ω_0 oder Υ_0 und auf dem geometrischen Schwerpunkt $\hat{a}$ bedeutet, dass die jeweilige Gruppe bzw. der geometrische Schwerpunkt sich in Bewegung befindet). Oder der Physiker kann das Verhalten des Herrn X wie eine Welle verstehen, wobei die ihm entsprechende Wellenlänge λ^X als der Abstand zwischen den sich gleichzeitig bewegenden geometrischen Schwerpunkten Ω_0' und Υ_0' vorgestellt werden kann, z.B. $\lambda^X \approx 50 \text{ m}$.

Falls der Physiker nun gefragt würde: «Wo befindet sich das Vereinsmitglied Herr X?», würde er antworten: «Herr X befindet sich mit 50%iger Wahrscheinlichkeit im Kreis um den Raumpunkt Ω_0' und mit 50%iger Wahrscheinlichkeit im Kreis um den Raumpunkt Υ_0' !» So gesprochen betrachtet der Physiker Herrn X metaphorisch eher als eine Welle, d.h. irgendwie im Raum verteilt. Der Kreis um den geometrischen Schwerpunkt Ω_0' stellt metaphorisch das dar, was ein Physiker ein Wellenpaket nennt. Geht nun ein Fahnder – ein Beobachter – von aussen zur Gruppe Ω_0' und befindet sich Herr X tatsächlich in dieser Gruppe, wird die Kohärenz der Gruppe gerade in dem Moment gewissermassen zerstört, in dem der Fahnder ihn festnimmt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung «kollabiert» sozusagen augenblicklich bei Herrn X, der sich nachweislich mit 100%iger Wahrscheinlichkeit an genau diesem Ort befindet. So gesehen manifestiert sich Herr X sicher als ein Teilchen mit einem festen Standort – die Suche nach ihm im Raum ist vorbei. So können Physiker eine prinzipiell einfache Sache wie die Suche nach dem Aufenthaltsort einer Person gleichzeitig sehr kompliziert, aber auch sehr präzise gestalten. Auf diese Metapher soll im späteren Verlauf nochmals eingegangen werden.

Der genaue Ort, an dem sich Herr X zu einem gegebenen Zeitpunkt befindet, hängt natürlich davon ab, wie

ruhig er sich zu der Zeit verhält. Sitzt er schlafend auf einem Stuhl wie ein ruhendes Teilchen, können wir ihn genau in dem Schwerpunkt des Objekts «Der auf dem Stuhl sitzende Herr X» lokalisieren. Läuft er in einem gegebenen Zimmer herum, wird diese Aufgabe umso schwieriger, je schneller er sich wie ein Teilchen bewegt und/oder je wellenartiger er wirkt. Laut der Quantenphysik hängt die Schwierigkeit der Aufgabe auch mit der Masse des Herrn X zusammen. Um dies alles besser zu begreifen, benötigen wir die geniale Idee eines klugen Physikers des letzten Jahrhunderts.

Wo genau ist eigentlich der Ort eines Körpers, der sich bewegt?

Der französische Physiker Louis de Broglie (1892–1987) postulierte 1924 einen physikalischen Zusammenhang zwischen der wellenartigen und der teilchenartigen Natur eines sich bewegenden materiellen Objekts:

$$\lambda_{\text{deB}} = h/p \text{ bzw. } p = h/\lambda_{\text{deB}} \quad (1).$$

λ_{deB} ist die dem mathematischen Wellenpaket zugeordnete de-Broglie-Wellenlänge eines sich bewegenden Teilchens mit dem Impuls p bzw. p ist der dem mathematischen Wellenpaket zugeordnete Impuls einer Welle mit der Wellenlänge λ_{deB} . h ist eine universelle, physikalische Konstante: die Planck'sche Konstante (diese hat den Wert von ungefähr $6,63 \times 10^{-34} \text{ J*s}$ und stellt den Wert einer Quantenwirkung dar; das Zeichen s steht für Sekunde und das Zeichen J für die Energieeinheit Joule). Diese Formel drückt die Idee aus, dass Materie gleichzeitig sowohl ein wellenartiges als auch ein teilchenartiges Verhalten zeigen kann.

λ_{deB} ist eine rein mathematische Grösse, die dem Physiker hilft, die Wellenartigkeit eines Teilchens einzuschätzen. In der Folge wird klar, ob die Gesetze der Quantenphysik oder der klassischen Physik anzuwenden sind, um das Verhalten des Teilchens zu verstehen und zu beschreiben. Wie bereits in der Metapher des Herrn X beschrieben, wäre diese Wellenlänge so etwas wie der Abstand zwischen den sich gleichzeitig bewegenden Raumpunkten Ω_0' und Υ_0' .

Wie die gesamte Materie haben auch grosse Objekte wie z.B. Dachziegel Eigenschaften sowohl von Teilchen als auch von Wellen, wie es nachfolgend mithilfe der de-Broglie-Wellenlänge erklärt wird.

Die de-Broglie-Wellenlänge eines fallenden Dachziegels

Ein Dachziegel, der mit einem Gewicht von 1 kg und einer Geschwindigkeit von 1 m/s durch die Luft fällt, hat einen Impuls von $p = m_0 v = [1 \text{ kg} \times (1 \text{ m/s})]$ und somit mit der Gleichung (1) eine de-Broglie-Wellenlänge von

Abb. 2. Wenn der Spalt die Grösse der Wellenlänge aufweist, werden auch klassische Wasserwellen gebeugt und die Welleneigenschaften des untersuchten Objekts treten klar zutage (a). Falls der Spalt deutlich grösser ist als die Wellenlänge, tritt keine wesentliche Beugung mehr auf (c).

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{deB}}^{\text{Dachziegel}} &= 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} / p \\ &= 6,63 \times 10^{-34} \text{ kg} \times \text{m}^2/\text{s} / [1 \text{ kg} \times (1 \text{ m/s})] \\ &= 6,63 \times 10^{-34} \text{ m}\end{aligned}\quad (2).$$

Zum Vergleich: Der Durchmesser eines Atomkerns liegt im Bereich 10^{-14} m , d.h. 10^{20} (100 000 000 000 000 000 000) Mal grösser als die de-Broglie-Wellenlänge eines Dachziegels. Ein Physiker würde hier sagen, dass die de-Broglie-Wellenlänge des Dachziegels viel zu klein ist, als dass er sich als Welle verhalten könnte.

Die de-Broglie-Wellenlänge für Extremfälle

Für ein Teilchen mit der Ruhemasse m_0 , das sich (relativ zur Lichtgeschwindigkeit langsam) mit der Geschwindigkeit v bewegt, definieren Physiker den Impuls p als das Produkt m_0 mal v (Einheit von p ist $\text{kg} \times (\text{m/s})$). Falls das Teilchen ruht (v bzw. $p = 0$), weiss man genau, wo es sich befindet, sodass es sinnlos wäre, eine entsprechende de-Broglie-Wellenlänge für das Teilchen im mathematischen Hilbert-Raum zu definieren (Materie in Ruhe entspricht einer unendlich langen und entsprechend flachen de-Broglie-Welle wie ein gespanntes Drahtseil, d.h. eigentlich gar keiner Welle mehr):

$$\lambda_{\text{deB}} = h/p = \infty \quad (3).$$

Da es bei einem bewegungslosen Teilchen keine entsprechende Welle gibt, lässt sich bei Formel (3) feststellen, dass keine Beugung, d.h. keine Ablenkung irgendeiner Welle an einem Hindernis, stattfinden kann. Das Phänomen der Beugung am Beispiel klassischer Wasserwellen erläutert die Bedeutung der de-Broglie-Wellenlänge (Abb. 2).

Die de-Broglie-Wellenlänge im Allgemeinen

Nachdem die de-Broglie-Wellenlänge für den alltäglichen Fall sowie für die Extremfälle behandelt wurde, stellt sich folgende Frage:

«Wo liegt die Grenze zwischen der klassischen und der Quantenwelt bzw. wie können wir schätzen, ob das Verhalten eines Systems besser durch die klassische Physik oder durch die Quantenphysik beschrieben und erklärt werden kann bzw. wann es gerechtfertigt ist, das Verhalten eines anscheinend klassischen Systems durch die Quantenphysik zu beschreiben und zu erklären?»

In dieser Arbeit ist vor allem das anscheinend klassische System des menschlichen Gehirns und seines Verhaltens, das Denken, von Interesse.

Grenze zwischen klassischer Physik und Quantenphysik

Aus der Formel (1) ist ersichtlich:

- λ_{deB} hat die gewöhnliche physikalische Dimension einer Länge

$$[(\text{kg} \times (\text{m/s})^2) \times \text{s} / [\text{kg} \times (\text{m/s})] = \text{m}. \quad (4).$$

- Je grösser Masse und/oder Geschwindigkeit eines Objekts, desto kleiner ist seine de-Broglie-Wellenlänge λ_{deB} .

Mittels der de-Broglie-Wellenlänge λ_{deB} kann eine Art Grenze zwischen klassischer Physik und Quantenphysik markiert werden. In der klassischen Physik ist kein Beobachter notwendig, um das Resultat einer Beobachtung/Messung zu bedingen. Die klassische Physik beschreibt mit ihrer zugrundeliegenden Mathematik Tatsachen, die unabhängig von der Beteiligung irgendeines Beobachters ablaufen. Die Quantenphysik beschreibt mit ihren mathematischen Grundlagen die Entwicklung von (im Prinzip) unendlich vielen Möglichkeiten, von denen sich erst bei einer Beobachtung/Messung eine einzige Tatsache hypostasiert.

In der Quantenphysik muss bei jeder Beobachtung/Messung die Existenz eines Beobachters bzw. jene einer «Messapparatur» – siehe auch Diskussion zum Thema «Kollaps der Wellenfunktion durch rein physikalische Dekohärenz-Phänomene» – angenommen werden: Für jede bewusste Beobachtung muss immer irgendwo eine Art *Erkenntnisfenster* zwischen dem Subjekt und dem Objekt vorhanden sein. Diese merkwürdige Tatsache wurde

zuerst von dem mathematischen Physiker Johann von Neumann (1903–1957) bewiesen und besagt, dass man die Welt immer dreiteilen muss in den Beobachter, das beobachtete Ding (Objekt) und das Messgerät, welches die Beobachtung erst ermöglicht [7, S. 224].

Was auch immer Bewusstsein ist, es muss eine physikalische Wirkung auf neuronale Prozesse haben. Dies ist keine Mutmassung, sondern eine Tatsache. Wenn angenommen wird, dass das Bewusstsein nicht ein reines Epiphänomen ist, dann hat der Wunsch, den Arm zu heben, offensichtlich materielle Konsequenzen. Die Annahme, das Bewusstsein sei ein Epiphänomen, kann meines Erachtens auch noch durch ein evolutionäres Argument entkräftet werden: Wenn das Bewusstsein ein reines Epiphänomen ist, dann hat sein Vorhandensein keinerlei evolutionäre Konsequenzen – oder: Alles, was passiert, würde auch ohne Bewusstsein passieren. Es wäre dann schon sehr erstaunlich, dass das Bewusstsein überhaupt entstanden ist.

Ferner muss sich der Beobachter irgendwie selbst beobachten, um zu entscheiden, was er – mithilfe der neuronalen Plastizität – zu lernen wünscht. Hier muss zwangsläufig auf der Basis der Quantenphysik ein (versteckter) Beobachter (in den Gliazellen? [2]) ins Spiel kommen, um den sogenannten «Arrow B» im Sinne von Graziano zu erklären [8, 9]. Eine erfolgreiche Theorie des Bewusstseins muss erklären können, wie das Gehirn auf seine eigene neuronale Vernetzung einwirken und somit seine Aufmerksamkeit lenken kann (siehe auch letztes Kapitel «Der Messprozess» in [7]).

Wenn eine oder mehrere massgebende Dimension/en eines Systems kleiner ist/sind als die λ_{deB} für die Objekte, die sich innerhalb dieses Systems bewegen, darf die Quantenphysik nicht mehr ignoriert werden und muss in jedem Fall samt Beobachter einbezogen werden.

Ebenso muss die Quantenphysik bzw. die Beteiligung eines Beobachters berücksichtigt werden, je genauer der Ort eines beliebigen Objekts in Bezug auf seine de-Broglie-Wellenlänge λ_{deB} lokalisiert werden soll. Mit anderen Worten: Beobachtungen und Messungen, die versuchen, den Ort eines Teilchens X in einem System S mit noch höherer Genauigkeit ∂_S als seiner (= die des Teilchens) de-Broglie-Wellenlänge λ_{deB}^X zu lokalisieren, rufen naturgemäss die wellenartigen Eigenschaften des Teilchens auf und erfordern zwingend die Beteiligung eines Beobachters.

Anders gesagt darf man den Ort eines Objekts bis auf eine Genauigkeit von der Grössenordnung seiner de-Broglie-Wellenlänge λ_{deB} lokalisieren, bevor die Quanteneigenschaften des Objekts und die Beteiligung eines Beobachters massgeblich ins Spiel kommen. Wenn die de-Broglie-Wellenlänge eines Objekts z.B. im Zentimeterbereich läge und der Raum, in dem das Objekt sich bewegt, mindestens ca. 1 m gross wäre, dürften wir die klassische Phy-

sik benutzen und könnten das Objekt bis auf wenige Zentimeter genau orten. Wenn wir genauer sein wollen und dasselbe Objekt mit einer Genauigkeit von Millimetern orten wollten, müsste auf jeden Fall die Quantenphysik angewendet werden.

Fazit

Wenn die Grösse des Systems oder die Genauigkeit der Ortsbestimmung ∂ eines Teilchens grösser ist als die de-Broglie-Wellenlänge λ_{deB} des Teilchens, d.h.

$$\lambda_{\text{deB}} < \partial \text{ bzw. } \lambda_{\text{deB}} / \partial < 1 \quad (5),$$

muss klassisch vorgegangen werden, d.h. ohne die Quantenphysik und ohne die Beteiligung eines Beobachters zu berücksichtigen.

Wenn die Grösse des Systems oder die Genauigkeit der Ortsbestimmung ∂ eines Teilchens kleiner ist als die de-Broglie-Wellenlänge λ_{deB} des Teilchens, d.h.

$$\partial \leq \lambda_{\text{deB}} \text{ bzw. } 1 \leq \lambda_{\text{deB}} / \partial \quad (6),$$

muss man die Quantenphysik samt Beobachter einbeziehen, d.h., Quanteneffekte und die Beteiligung eines Beobachters werden im Verhalten des Systems zwangsläufig zum Vorschein kommen.

Diese beiden Aussagen folgen faktisch und zwangsläufig aus den mathematischen Grundlagen der Quantenphysik.

Quanteneffektgrösse

λ_{deB}^X sei die de-Broglie-Wellenlänge für ein Teilchen X in einem System S mit Massstab ∂_S . Nennen wir den Bruch $\lambda_{\text{deB}}^X / \partial_S$ die Quanteneffektgrösse (QEG $_S^X$) für Teilchen X im System S. Dann ist Folgendes bekannt: Je grösser die Quanteneffektgrösse $\lambda_{\text{deB}}^X / \partial_S$ ist, desto eher werden Quanteneffekte und die Beteiligung eines Beobachters im Verhalten des Systems zum Vorschein kommen.

Bei Quanteneffektgrössen $\lambda_{\text{deB}}^X / \partial_S \geq 1$ muss auf jeden Fall die Quantenphysik samt Beobachter einbezogen werden.

Die Quanteneffektgrösse eines fallenden Dachziegels

Nun zurück zum Dachziegel: Für einen Zusammenstoss mit dem Kopf eines Menschen reichen schon Genauigkeiten ∂ im Millimeterbereich aus, d.h. extrem viel grösser als die de-Broglie-Wellenlänge eines Dachziegels,

$$\lambda_{\text{deB}}^{\text{Dachziegel}} / \partial = 6,63 \times 10^{-34} \text{ m} / 10^{-3} \text{ m} \approx 1 \times 10^{-30} \quad (7);$$

ein Resultat, das sehr viel kleiner als 1 ist. Mit anderen Worten: Ein auf den Kopf eines Menschen fallender Dachziegel ist kein Quantenphänomen!

Der metaphorische Herr X – Teil 2

Kehren wir zurück zur beschriebenen Metapher von Herrn X im mafiösen Verein, wobei die metaphorische de-Broglie-Wellenlänge λ_{deB}^X für Herrn X als so etwas wie der Abstand zwischen den sich gleichzeitig bewegenden Raumpunkten Ω_0' und Υ_0' vorgestellt werden kann, z.B. $\lambda_{\text{deB}}^X \approx 50$ m. Das System S ist nun der Verein im Konferenzzentrum. Solange wir uns mit einer Genauigkeit ∂_S in der Grössenordnung von mehreren Metern begnügen, wissen wir ungefähr, wo Herr X sich befindet, nämlich mit 50%iger Wahrscheinlichkeit irgendwo in einem Bereich von Δ^2 m², z.B. im Umkreis von 64 m² um Punkt Ω_0' oder um Punkt Υ_0' . Diese Beobachtung bzw. Suche könnte mit einem Feldstecher durchgeführt werden, ohne den Verein im Geringsten zu stören, das Verhalten bliebe nach wie vor «klassisch», und metaphorisch würde man sich weiterhin im Bereich der klassischen Physik bewegen.

Wollen wir aber viel genauer wissen, wo Herr X sich befindet, um seine Festnahme vorzunehmen, müssten wir uns viel präziserer Instrumente als eines Feldstechers bedienen, z.B. einer Sicherheitskontrolle wie am Flughafen. Das bedeutet, dass das System S, in dem der Verein sich für die Kontrolle befinden müsste, viel kleiner wäre als das ganze Konferenzzentrum. In diesem Fall wäre die Genauigkeit ∂_S von der Grössenordnung eines Meters, d.h. $\partial_S \approx 1$ m. Dies ist aber viel kleiner als die metaphorische de-Broglie-Wellenlänge: $\lambda_{\text{deB}}^X / \partial_S = 50$. Die Quanteneffektgrösse wäre nun viel grösser als 1. Würde man die Gruppe auffordern, durch eine Sicherheitskontrolle wie am Flughafen hindurchzugehen, würde es das Verhalten der Gruppe massgeblich stören: Das Verhalten bliebe keineswegs «klassisch», und man käme metaphorisch gesprochen zwangsläufig in den Bereich der Quantenphysik.

Informationsverarbeitung im Körper

Wie sieht es nun mit der Informationsverarbeitung im Körper aus? Mithilfe der erwähnten empirischen, zellanatomischen Gegebenheiten lässt sich folgern:

- Das geschätzte durchschnittliche Gewicht (relative atomic mass (RAM)) eines Kalziumions (Ca^{2+}), das massgeblich an der Leitung eines Signals *zwischen* Nervenzellen beteiligt ist, liegt in der Grössenordnung von $6,66 \times 10^{-26}$ kg [= (40,09 g/mol) $\times$ (1 mol/(6,02 $\times$ 10²³ Atome))]. (Hier wie auch in den weiteren Schätzungen wurde das Gewicht der jeweils bei einem Ion fehlenden Elektronen – ein Elektron wiegt lediglich 9,10938291

$\times 10^{-31}$ kg und ist somit mehr als 1000 Mal leichter als ein Proton! – vernachlässigt.)

- Das geschätzte durchschnittliche Gewicht (RAM) eines Kaliumions (K^+), das massgeblich an der Leitung eines Signals *in einer* Nervenzelle beteiligt ist, liegt in der Grössenordnung von $6,50 \times 10^{-26}$ kg [= (39,10 g/mol) $\times$ (1 mol/(6,02 $\times$ 10²³ Atome))].
- Das geschätzte durchschnittliche Gewicht (RAM) eines Natriumions (Na^+), das *auch* massgeblich an der Leitung eines Signals *in einer* Nervenzelle beteiligt ist, liegt in der Grössenordnung von $3,82 \times 10^{-26}$ kg [= (22,99 g/mol) $\times$ (1 mol/(6,02 $\times$ 10²³ Atome))].
- Die Transportgeschwindigkeit eines Signals innerhalb eines myelinisierten Axons hängt stark vom Durchmesser des Axons und von den Neuron-Gliazellen-Wechselwirkungen ab [10, S. 571]. Der schnellste Impulstransport im Tierreich liegt bei über 200 m/s bei der Garnele, zwischen 70 und 90 m/s im Rückenmark (Gruppe-I-Afferenzen) bei der Katze und in der Grössenordnung von ca. 1 m/s bei der Ratte. Es wird allgemein geschätzt, dass die Leitgeschwindigkeiten biologischer Systeme im Bereich von 0,5–120 m/s liegen [11]. Für den Zweck dieser Arbeit nehmen wir einen generischen Wert in der Grössenordnung von 1 m/s an.

Das bedeutet, die de-Broglie-Wellenlänge λ_c eines *Kalziumions* in einer Nervenzelle beträgt etwa

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{deB}}^{\text{Ca}^{++} \text{ Ion}} &= 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} / p \\ &= 6,63 \times 10^{-34} \text{ kg} \times \text{m}^2/\text{s} / [6,66 \times 10^{-26} \text{ kg} \times (1 \text{ m/s})] \\ &\approx 1 \times 10^{-8} \text{ m oder } 10^4 \text{ pm (1 Picometer = } 10^{-12} \text{ m)} \quad (8);\end{aligned}$$

jene eines *Kaliumions* in einer Nervenzelle beträgt ungefähr

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{deB}}^{\text{K}^+ \text{ Ion}} &= 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} / p \\ &= 6,63 \times 10^{-34} \text{ kg} \times \text{m}^2/\text{s} / [6,50 \times 10^{-26} \text{ kg} \times (1 \text{ m/s})] \\ &\approx 1 \times 10^{-8} \text{ m oder } 10^4 \text{ pm} \quad (9)\end{aligned}$$

und die eines *Natriumions* in einer Nervenzelle beträgt circa

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{deB}}^{\text{Na}^+ \text{ Ion}} &= 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} / p \\ &= 6,63 \times 10^{-34} \text{ kg} \times \text{m}^2/\text{s} / [3,82 \times 10^{-26} \text{ kg} \times (1 \text{ m/s})] \\ &\approx 2 \times 10^{-8} \text{ m oder } 2 \times 10^4 \text{ pm} \quad (10).\end{aligned}$$

Erst wenn Teilchen, z.B. Kaliumionen, sich in Systemen befinden, in denen ∂ in der Grössenordnung von kleiner oder gleich seiner de-Broglie-Wellenlänge λ_{deB} ist, muss man die Quantenphysik samt Beobachter einbeziehen. Mit anderen Worten muss $\partial \leq \lambda_{\text{deB}}$ gelten, sodass Quanteneffekte und die Beteiligung eines Beobachters zu erwarten sind.

Tab. 1. Wird ein Teilchen X lokalisiert in einem System S mit der Dimension ∂_S kleiner-gleich seine de-Broglie-Wellenlänge λ_{deB}^X , so werden naturgemäss die wellenartigen Eigenschaften des Teilchens und somit auch Quantenphänomene samt der Beteiligung eines Beobachters aufgerufen: Bei Quanteneffektgrössen $\lambda_{\text{deB}}^X/\partial_S \geq 1$ muss man die Quantenphysik samt Beobachter einbeziehen. Dies ist der Bereich der Quantenwelt. Quanteneffektgrössen zwischen ca. 0,01 und 1 bezeichnen nach meiner Definition die mesoskopische Welt. Bei Quanteneffektgrössen kleiner als 0,01 handelt es sich um Phänomene der Alltagswelt bzw. der klassischen Welt

Schätzung der Quanteneffektgrösse für das Ca^{++} -, K^+ - oder Na^+ -Ion	Mikrotubulus-Durchmesser	Synaptische Spaltbreite	Axon-Durchmesser
$\lambda_{\text{deB}}^{\text{X-Ion}} \approx 10^4 \text{ pm}$	$\partial_S = 12\text{--}24 \times 10^3 \text{ pm}$	$\partial_S = 20 \times 10^3 \text{ pm}$	$\partial_S = \text{ca. } 1 \times 10^6 \text{ pm}$
$\lambda_{\text{deB}}^{\text{Ca++/K+ o. Na+-Ion}}/\partial_S \approx$	1 bzw. 2	1/2 bzw. 1	1/100 bzw. 1/50

Die Quanteneffektgrössen, die mit der Informationsverarbeitung im menschlichen Körper zu tun haben, bewegen sich in der Grössenordnung von 0,01–1,00 (Tab. 1). Zum Beispiel liegt der Durchmesser ∂ eines kortikalen Axons ohne Myelinschicht zwischen ca. 0,08 und $0,4 \times 10^6 \text{ pm}$ und mit Myelinschicht bei ca. $1 \times 10^6 \text{ pm}$ [12, 13]; ein synaptischer Spalt hat eine Grösse ∂ von ca. $20 \times 10^3 \text{ pm}$ und ein Mikrotubulus einen inneren oder äusseren Durchmesser ∂ von 12 bzw. $24 \times 10^3 \text{ pm}$.

Diese Schätzungen beruhen auf vernünftigen, empirisch nachprüfaren zellanatomischen Gegebenheiten und Messungen, sodass der Inhalt von Tabelle 1 als «*State-of-the-art*»-Faktum verstanden werden kann.

Resultate und Schlussfolgerung

Wie anhand der *evidenzbasierten* Schätzungen in Tabelle 1 ersichtlich ist, ist es physikalisch nachvollziehbar, die Informationsverarbeitung im Gehirn gemäss quantenphysikalischer Argumente samt Beteiligung eines (versteckten) Beobachters zu diskutieren und zu analysieren. Wenn wir die Quanteneffektgrösse von 1/100 im Axon im Sinne des statistischen Mittels einer Normalverteilung auffassen, gelangt man zu der Annahme, dass ein nicht vernachlässigbarer Teil unseres Denkens sich auf Quanteneffekte zurückführen lässt. Bis und mit diesen Schlussfolgerungen sind alle Argumente streng wissenschaftlich nachprüfbar bzw. falsifizierbar. Was kann nun aus diesen Argumenten über die subjektive Wahrnehmung – über das «Bewusstsein an sich» – abgeleitet werden?

Wohlgemerkt können mit einem klassischen Computer quantenphysikalische Rechnungen durchgeführt, das Verhalten von Quantensystemen berechnet und mit einem Quantencomputer Simulationen der klassischen Welt vorgenommen werden. Die Ergebnisse eines klassischen Computers müssen genauso wenig ganze Zahlen statt einer numerischen Verteilung mit wellenartigen Eigenschaften sein, wie die Ergebnisse einer Quantenfakturierung zwangsläufig wellenartige Eigenschaften haben müssen, sondern können einfach aus zwei Zahlen bestehen. Im Gegenteil: Ein klassischer Computer ermöglicht die Lösung quantenphysikalischer Rechenprobleme, und der Sinn des Quantencomputers besteht eigentlich darin,

eindeutig klassische, aber komplizierte Rechenprobleme zu lösen.

Genauso wenig wie sich von der Funktionsweise eines Werkzeugs auf die Funktionsweise dessen, was mit dem Werkzeug gebastelt wird, schliessen lässt, sagt die «Grammatik» eines Rechners (Computer oder Gehirn) etwas über die «Semantik», die mit diesem Rechner gewonnen wurde.

Immerhin gilt es ernsthaft zu bedenken, dass anhand der hier dargelegten faktischen Argumente die Rechenprozesse des Gehirns vorwiegend im mesoskopischen Bereich stattfinden. In der Tat muss man in der Bewusstseinswissenschaft zwischen dem Problem «Nach welchen Gesetzmässigkeiten (<Grammatik>) verläuft die Informationsverarbeitung in einer Maschine oder in einem Lebewesen?» und dem viel schwierigeren Problem – das sogenannte «Hard Problem» [9, 14–16] – «Ob und wie erlebt eine informationsverarbeitende Maschine oder ein Lebewesen Wahrnehmungen der Umwelt sowie Wahrnehmungen des eigenen Selbst (<Semantik>)?» unterscheiden. Solche subjektiven Erlebnisse bezeichnet man als Qualia [17, 18], die sowohl notwendig als auch hinreichend sind für das, was wir *Bewusstsein* nennen.

Könnte es sein, dass eine grössere Quanteneffektgrösse für die Botenstoffe, die massgeblich an der Leitung eines Signals *innerhalb oder zwischen* Zellen beteiligt sind, kaum zu erwarten wäre, da wir uns ansonsten subjektiv vorwiegend in einer Quantenwelt statt in einer klassischen Welt erleben würden, was uns in einen grossen psychologischen Widerspruch zu unserem alltäglichen, körperlichen Erleben führen würde? Man kann zum Beispiel anhand der Glia-Entwicklung im Gehirn des Kleinkinds bis zum Alter von ca. 18 Monaten und insofern, dass sich das Kleinkind bis zu ungefähr diesem Alter im Spiegel nicht selbst erkennt (Ich-Bildung), argumentieren, dass die Quantenwelt die subjektive Welt des Kleinkinds ist [19].

Im Sinne eines wissenschaftlich-spekulativen Erklärungsversuchs nehme ich an, dass Systeme, in denen die an den Signalleitungen *innerhalb oder zwischen* Zellen beteiligten Botenstoffe durchschnittliche Quanteneffektgrössen haben, die nicht im mesoskopischen Bereich liegen, nicht in der Lage wären, sich selbst zu reflektieren. Die Quantenphysik – richtig dosiert – scheint die Basis

des Bewusstseins zu sein. Veränderungen der anatomischen Verhältnisse auf mikroskopischer Ebene (z.B. Veränderung der Myelinschicht oder der ∂_s -Werte (Tab. 1)) würden eine Veränderung der «Dosis Quantenphysik» nach sich ziehen und das Bewusstsein beeinflussen.

Disclosure Statement

Der Autor gibt an, dass keine Interessenkonflikte bestehen.

Literatur

- 1 Aktionspotenzial. <https://de.wikipedia.org/wiki/Aktionspotenzial>.
- 2 Schmid GB: Entstehung des Bewusstseins: Hypothese zur Rolle von Gliazellen, verzweigten Nervenenden und Dendritenarmen. *Schweiz Z Ganzheitsmed* 2015;27:50–54.
- 3 www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/dendriten/2715.
- 4 Christian J: Testing gravity-driven collapse of the wave function via cosmogenic neutrinos. *Phys Rev Lett* 2005;95:160403.
- 5 Kartner FX, Haus HA: Quantum-nondemolition measurements and the 'collapse of the wave function'. *Phys Rev A* 1993;47:4585–4592.
- 6 Joos E, Zeh DW: The emergence of classical properties through interaction with the environment. *Z Phys B* 1985;59:223.
- 7 von Neumann J: Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Berlin, Springer, 1932.
- 8 Graziano MS, Kastner S: Human consciousness and its relationship to social neuroscience: a novel hypothesis. *Cogn Neurosci* 2011;2:98–113.
- 9 Graziano A: How the Light Gets out. Consciousness Is the 'Hard Problem', the One that Confounds Science and Philosophy. Has a New Theory Cracked It? Aeon Media Ltd., 2013. <https://aeon.co/essays/how-consciousness-works-and-why-we-believe-in-ghosts>.
- 10 Debanne D, Campanac D, Bialowas A, et al: Axon physiology. *Physiol Rev* 2011;91:555–602.
- 11 Heinz GK: Relativität elektrischer Impulsausbreitung – Schlüssel zur Informatik biologischer Systeme. www.gfai.de/~heinz/historic/intro/iwk_ilm.htm.
- 12 Caminiti R, Carducci F, Piervincenzi C, et al: Diameter, length, speed, and conduction delay of callosal axons in macaque monkeys and humans: comparing data from histology and magnetic resonance imaging diffusion tractography. *J Neurosci* 2013;33:14501–14511.
- 13 Innocenti GM, Vercelli A, Caminiti R: The diameter of cortical axons depends both on the area of origin and target. *Cereb Cortex* 2014;24:2178–2188.
- 14 Shear J (ed): Explaining Consciousness. The Hard Problem. Cambridge/MA, MIT Press, 1997.
- 15 Solms M: A neuropsychanalytical approach to the hard problem of consciousness. *J Integr Neurosci* 2014;13:173–185.
- 16 Searle JR: Introduction: addressing the hard problem. *J Integr Neurosci* 2014;13:vii–xi.
- 17 Korf J: Emergence of consciousness and qualia from a complex brain. *Folia Med (Plovdiv)* 2014;56:289–296.
- 18 Misselbrook D: Q is for qualia. *Br J Gen Pract* 2014;64:248.
- 19 Schmid GB: Die Quantenwelt ist die Welt des Kleinkinds. *Dtsch Z Zahnärztl Hypnose* 2015; 21:6–13.