

Das Gehirn ist das mit Abstand komplexeste System, das bekannt ist. Seine Erforschung konzentriert sich seit Jahrzehnten auf das, was mit den Methoden der klassischen Physik messbar ist und erfasst werden kann. Seit in den 1950-er Jahren die Analogie des Gehirns zu einem neuronalen Netz aufgekommen ist und mit neuronalen Netzen beachtliche technologische Erfolge erzielt worden sind, so kam es in den 1990-er Jahren zu einer gewissen Erleichterung der Forschung und Entwicklung von künstlichen neuronalen Netzen.

Bis dahin versuchte man im Grunde zwei Grundtypen der neuronalen Netze anzuwenden: eine eher sequentielle Logik bei Kohonen-Netzen sowie eine parallele und distributive Logik der Informationsverarbeitung bei Hopfield-Netzen sowie ihre Kombination bei Elman-Netzen. Weitere Komponenten bei neuronalen Netzen wurden ergänzt, um das biologische Netz zu imitieren, etwa die berühmte Hebb'sche Korrelationsregel, wonach die Dynamik der neuronalen Aktivität unmittelbar die neuronale Architektur beeinflusst u.a.m. Die Forschung und Entwicklung ging erst weiter, als im Rahmen des Maschinennlernens neben dem überwachten und nicht überwachten Maschinennlernen ein sich selbst verstärkender und adaptiver Mechanismus Ende der 00-er Jahre eingeführt wurde: das sog. Reinforcement-Learning. Doch auch hier kommt die Forschung und Entwicklung an ein allmähliches Ende, und das trotz euphorischer Prognosen bis zur Verkündung des lang ersehnten Sieges der Transhumanisten, die die nächste Evolutionsstufe der Menschheit in dessen Annihilation und Aufhebung in einer artifiziellen Intelligenz sehen.

Was also tun? Man könnte noch weitere Netzwerkmodelle ausbauen, wie etwa das Petri-Netz der späten 1960-er Jahre, das die Nebenläufigkeitsrelation konstitutiv einführt, was zu deutlichen Vorteilen bei bestimmten Formen der Problembehandlung führt. Oder man konzentriert sich auf das Quantum Computing, das im Grunde ein Netzwerk von Qubits anstelle von Prozessoren darstellt, das für eine sehr eingeschränkte mathematische Problemklasse (die NP-spezifischen Probleme) eine Art von superschneller Parallelverarbeitung in nicht exponentieller, sondern in algorithmischer Zeit erlaubt.

Doch was ist damit gewonnen, um das biologische Gehirn zu verstehen? Immerhin so viel, dass der Blick frei gemacht wird auf einen völlig neuen Modus der Informationsverarbeitung: auf die sog. Quanten-Informationsverarbeitung. Quantensysteme sind in der Lage, Information auf eine klassisch undenkbar Weise zu verarbeiten, indem nicht mehr Bits, sondern Quantenbits ihren Zustand in fest definierter und kontrollierter Weise verändern. Schade nur, dass bis dato niemand genau weiß, was in einem Quantensystem passiert bzw. wie der Fluss der Information modelliert werden kann – wobei dieses genaue Wissen bei einer bestimmten Klasse von Quantencomputern, bei sog. adiabatischen Quantencomputern wie der Firma D-Wave irrelevant ist, da es hier nur auf die zuverlässige Minimierung der Energie des Quantensystems ankommt und das Meßergebnis – das sog. Read-Out des veränderten Quantenzustands – mit dem energetisch günstigsten Zustand identisch ist.

Das Problem des Nicht-Wissens dessen, was genau im Quantensystem mit den QuBits passiert, führt zu einem enormen Aufwand an Fehlerkorrekturverfahren, das die Zahl der rech-

nenden QuBits stark limitiert – derzeit liegt der Rekord bei über 70 QuBits von IBM, nicht mehr! Das sog. Quantenvolumen, das die Effizienz eines Quantencomputers ausdrückt, bleibt damit immer noch hinter der Effizienz klassischer Supercomputer zurück. Hinzu tritt die Problematik mit der Isolation des Quantenzustands, der nur wenige Sekunden aufrecht erhalten werden kann, bevor er zerfällt und zum Verlust der Kohärenz dieses Quantenzustands führt.

Was hat das mit dem biologischen Gehirn zu tun? – Auch hier wird scheinbar komplexe Information als Quanteninformation verarbeitet. Und das nicht mit so wenigen QuBits wie beim Quantum Computing, sondern mit sehr viel mehr QuBits. Das würde die Geschwindigkeit und Energieeffizienz des Gehirns erklären, ebenso seine Fähigkeit der ultraschnellen Parallelverarbeitung. Es scheint sich daher beim Gehirn um ein biologisches Quanten-Netzwerk resp. ein komplexes Quantensystem zu handeln. Auch die Fähigkeit zur vollständigen Projektion mathematisch-unendlicher Räume in sog. Unterräume kann die Quantentheorie verständlich machen, wodurch Reflexion und Selbst-Reflexion bis zum Bewusstsein ansatzweise plausibilisiert werden kann.

Ferner könnte vor der Dekohärenz, der den zentralen Einwand gegen eine Quantum Mind – Theorie bedeutet, eine topologische Informationsverarbeitung schützen: eine topologisches Muster ist gegen Dekohärenz so gut wie immun. Werden QuBits durch Photonen kodiert und bilden so etwas wie photonische Quantencomputer, so würde das Quantensystem ebenfalls vor Dekohärenz bewahrt werden. Hier bietet es sich an, im elektromagnetischen Feld des Gehirns Ausschau nach topologischen komplexen Mustern zu halten, die eine entsprechend komplexe Information kodieren. Was auch entscheidend ist: ein Quantensystem erlaubt die Emergenz von immer komplexeren Schichten innerhalb des Quantensystems – zumindest theoretisch. Das erlaubt die Kodierung äußerst komplexer Muster, die sich im Muster der messbaren neuronalen Aktivität sowie im Muster der neuronalen Architektur widerspiegeln.

Man darf auch nicht vergessen, dass das biologische Gehirn auf unterschiedlichen Skalen realisiert ist – von der Skala der kleinsten Wirkung (Plancksches Wirkungsquantum) über Atome, Moleküle und Zellen bis zum Organ des Gehirns. Sämtliche Skalen bilden eine Ordnung, sie greifen ineinander ein, sie koordinieren sich sowohl bezogen auf die jeweilige Skala als auch untereinander. Es kommt zu äußerst vielfältigen Synergien und Wechselwirkungen, die allesamt nicht chaotisch, sondern geordnet sind bzw. aktiv sich selbst ordnen. Hier rücken wir dem zentralen Punkt immer näher: wie kommt in biologischen Systemen, besonders im biologischen Gehirn, Selbstordnung und Selbstorganisation zustande?

Hier wird in entfernter Anlehnung an Werner Heisenberg von einem „zentralen Ordner“ ausgegangen. Er sollte aus o.g. Gründen seinen ontologischen Ort in der Wirklichkeitsschicht haben, die die Quantentheorie beschreibt. Das könnte sogar eine höher-dimensionale Wirklichkeit sein. Der zentrale Ordner könnte komplexe Dynamiken ermöglichen und daher selbst eine komplexe Struktur bzw. ein Muster darstellen. Auch sollte dieser zentrale Ordner die

Möglichkeiten definieren, welche komplexe Konfigurationen und Muster erlaubt sind und welche nicht bzw. welche chaotisch und ungeordnet bleiben. Das komplexe Muster selbst bildet eine dynamische Topologie, die ihrerseits ein komplexes Netzwerk darstellt, das in sich veränderlich und transformierbar ist.

Ein gewichtiger Vorteil der Konzentration auf Muster ist die dadurch erreichbare Formalisierung der Inputs, die das Gehirn durch die sinnliche Perzeption erhält. Schließlich wird jeder Sinn – das Sehen, Hören, Tasten etc. – in dieselbe elektromagnetische Hirnsprache übersetzt. Auch hier gibt es also eine universale Formalisierung und Abstraktion der Inputs. Das erklärt etwa auch die Synästhesie, d.h. etwa die Fähigkeit, das Gesehene hören zu können u.a. Das biologische Gehirn wäre nicht nur ein klassisches neuronales Netzwerk, sondern hätte zusätzlich eine essentielle und konstitutive Quantenschicht, in der parallel zur klassischen Informationsverarbeitung eine Quanten-Informationsverarbeitung realisiert wird. Die Quanteninformationsverarbeitung setzt die genannte Ordnung voraus, da sie ja nicht chaotisch geschieht. Daher sollte jeder Input im Gehirn eine signifikante Signatur hinterlassen, die sich als Muster manifestiert.

Was passiert dann bei der Kodierung und Speicherung von Information durch das biologische Gehirn? – Die Information über ein Input wird abstrakt durch formale und komplexe Muster gespeichert, d.h. als sog. komplexe und topologische Information. Das Muster erstreckt sich dann klassisch über verschiedene Regionen des Gehirns und wird dann, wenn man sich an etwas erinnert, durch das synchrone Feuern von Neuronen-Ensembles aktiviert – und dadurch vergegenwärtigt und in das Bewusstsein befördert. Ein gespeichertes Muster ist demnach durch die Stellung von unterschiedlichen QuBits, deren Träger Moleküle und Atome sind, kodiert, indem verschiedene QuBits ein Netzwerk bilden, um sich auf immer höheren Quanten-Ebenen miteinander zu sog. V-Bits (Verschränkungs-Bits) zu verschränken.

Das Ergebnis wäre die genannte komplexe Information. Sie bildet eine Ordnung bzw. eine Struktur, die wie die Saite eines Streichinstruments dadurch aktiviert und ausgelesen werden kann, indem die Saite „zum Schwingen“ gebracht wird und einen komplexen „Ton“ erzeugt. Dieser Ton wird nach der vorliegenden These nicht leicht zu hören sein, da er sich in eine höhere Dimension hinein erstreckt, die relativ jenseits von Raum und Zeit verortet ist – hier kommt das quantentheoretische Instrumentarium ins Spiel, wobei man sich nicht auf ein bestimmtes mathematisch-theoretisches Instrumentarium festlegen muss (etwa nur auf Hilbert-Räume anstelle einer Transaktionalen Interpretation der Quantenfeldtheorie u.a.). Die höhere Dimension braucht man, um den Grad der Komplexität der Information zu gewährleisten, indem immer komplexere Symmetrien und somit immer differenzierte (durch immer mehr Differenzen vermittelte) Einheiten abgebildet werden müssen.

Die Quanten-Informationsverarbeitung erfolgt, indem solche höher-dimensionalen Muster ineinander transformiert werden i.S. einer topologischen Informationsverarbeitung. Damit wäre das biologische Gehirn kein konventioneller Quantencomputer, der mit QuBits als die Superposition des binären Zustands 0 und 1 rechnet, sondern eher ein topologischer Quan-

tencomputer, der komplexe Information transformiert. Dass die komplexe Information binär übersetzt werden kann, ist anzunehmen – doch ist das nicht entscheidend zum Verständnis der Funktionsweise des Gehirns. Vielmehr kann eine topologische Informationsverarbeitung ferner die hochgradige Adaptivität des Gehirns abbilden, indem die abstrakten Operatoren resp. Transformatoren dem evolutiven Postulat der Mutabilität untergeordnet werden und sich damit in einem vorgegebenen Rahmen immer wieder verändern können.

„Ordnung“ erzeugt in diesem Sinn also dynamische Ablaufmuster in komplexen Netzwerken. Das geschieht dadurch, dass sich die höhere Dimension dieser komplexen Ordnung bricht und verschiedene analogen Abbildungen und Projektionen zulässt: die analogen Abbildungen bilden zeitlich aneinander gereiht („Mapping“ der Abbildungen) eine Kette, die als Ganzes das höher dimensionale Muster analog abbildet. So resultiert die zeitliche Dynamik aus der Analogie der Abbildung und kann auf das höher-dimensionale Muster als Ermöglichungsgrund zurück geführt werden – wobei es verschiedene analoge Korrelate zum selben höher-dimensionalen Muster gibt.

Interessanterweise ergibt sich hier ein gravierender Unterschied eines komplexen biologischen Quantensystems zu einer klassischen Software: die Software ist determiniert durch die Hardware und bildet ihrerseits eine streng deterministische Struktur. Die biologische Quanten-Software, wenn man das so nennen mag, ist adaptiv und nicht determiniert. Außerdem subsistiert die höher-dimensionale Ordnung, da neben der „von unten nach oben“ Auslösung der Emergenz eines Quantensystems zugleich „von oben nach unten“ ein Ordner angenommen werden muss (!), der das Zustandekommen chaotischer Muster, die das Gehirn speichert, verhindert. Es ist ferner klar, dass diese subsistierende und persistierende Ordnung, die in einer höheren Dimension verborgen ist, selber wiederum einer Referenz-Ordnung bedarf. Diese Referenz-Ordnung sollte ihrerseits dem gesamten Universum zugrunde liegen, was somit auch erklären würde, warum das menschliche Gehirn in der Lage ist, durch pures Nachdenken die reale Struktur der Wirklichkeit zu entschlüsseln.

Unter den verschiedenen top-down Abbildungen der höheren Ordnung erfolgt dann eine (Auto-)Selektion, so dass sich das am besten angepasste Muster im jeweiligen biologischen Netz ausdrücken und exprimieren kann. „Ordnung“ bedeutet somit auch Steuerung, und insofern diese Ordnung primär eine Ordnung in der Quantenschicht der Wirklichkeit bezeichnet, wäre das eine Quanten-Steuerung biologischer – und vielleicht eines Tages auch künstlicher – Systeme. Das, was im komplexen Quantensystem des biologischen Gehirns passiert, wäre demnach nicht wie beim aktuellen Quantum Computing eine „Black Box“, sondern wäre durch höher-dimensionale Muster geordnet und durch eine topologische Informationsverarbeitung stabilisiert und vor Dekohärenz geschützt.

Entscheidend nun ist das Verständnis des Ineinander-Greifens des komplexen Quantensystems sowie des komplexen klassischen Systems „Gehirn“: beide sind zueinander analog, so dass eine analoge Projektion zwischen beiden in einem „vertikalen“ Sinn, also i.S. einer informationellen Interaktion zwischen klassischer und quantischer Schicht der Wirklichkeit,

vorausgesetzt werden kann. Permanent erfolgt somit im biologischen Gehirn primär eine reine und relativ jenseits von Raum und Zeit erfolgende komplexe Informationsverarbeitung, sowie sekundär die klassische Informationsverarbeitung i.S. eines flexiblen und hochgradig adaptiven neuronalen Netzes, dessen elektrochemische Aktivität ko-reguliert wird durch biochemische Regulatoren (Gliazellen, psychoaktive Substanzen) – dabei werden verschiedene Skalen von miteinander vernetzter Wechselwirkungen ausgeblendet.

D.h. die höher-dimensionale geist-analoge Wirklichkeit, die die Quantentheorie in Ansätzen skizziert und die übrigens auch von der allgemeinen Relativitätstheorie tangiert wird – man denke nur an höher-dimensionale Ansätze bereits in den 1920-er Jahren bei Kaluza und Klein – wirkt relativ jenseits von Raum und Zeit. Es gibt demnach mit Erwin Schrödinger und David Bohm eine verborgene Quantenordnung, so dass Leben Ordnung aus Ordnung bedeutet. Damit wird ein geordnetes Up-Scaling von Quanteneffekte ebenso behauptet wie mit Koncsik die Existenz makroskopischer komplexer Quantensysteme (MCQS).

Zwischen dem klassischen und dem quantischen System besteht nun ein Reverse Feedback: durch kontrollierte Emergenz des komplexen Quantensystems, das an spezifischen Quantenpunkten (Quantum Dots) an Nahstellen der neuronalen Architektur und damit durch die Architektur und die zeitliche Synchronisation und räumliche Koordination der Präparation von Qubits emergiert, kommt es auch zur Emergenz innerhalb des immer komplexer werdenden Quantensystems, das damit zur Verarbeitung (Erzeugung, Vernichtung, topologische Transformation) immer komplexerer Information befähigt wird. Dieses MCQS wirkt permanent zurück auf die Dynamik und Architektur des komplexen klassischen Systems usw. So gibt es beim reversen Feedback sowohl eine top-down als auch eine bottom-up Wirkung, die nicht energetisch, sondern informationell ist und eine analoge Wechselwirkung charakterisiert, die im Detail noch nicht verstanden ist.

Kollabiert übrigens das MCQS vollständig, so ist das identisch mit dem Tod des Lebewesens. Daher impliziert die Analogie der (holografischen?!) Projektion auch die nur analoge Abbildung von komplexen Quantenmustern und Ordnungen, die in Subräumen kodiert sind. Ihnen kann eine indirekte Quantenmessung entsprechen bzw. die Verwirklichung eines gemischten Zustandes eines Subraums. Die Quanten-Informationsverarbeitung ist davon relativ isoliert und vollzieht sich durch komplexe Transformationsprozesse und durch topologische Informationsverarbeitung, die sich auf den verschiedenen Ebenen der Meta-Information ereignet, die ihrerseits durch sog. V-Bits (Verschränkungsbits) kodiert ist.

In diesem Sinn wäre nun das menschliche Gehirn ein biologischer Quantencomputer. Der menschliche Geist seinerseits wäre ein relational subsistierendes komplexes Quantensystem, das ebenso eine höher-dimensionale Ordnung und Struktur als auch eine entsprechende Dynamik der analogen Entfaltung dieser Ordnung aufweist. Die höher-dimensionale Ordnung wäre der Attraktor der Dynamik des komplexen Systems.

Der menschliche Geist hat seinen ontologischen Ort dann relativ jenseits von Raum und Zeit bzw. relational bezogen auf Raum und Zeit. Durch seinen relationalen Bezug zu Raum und Zeit subsistiert er (relationale Subsistenz des menschlichen Geistes). Damit gelangt der menschliche Geist zur Wirklichkeit durch seine Relation zu Raum und Zeit – und zum Gehirn in Raum und Zeit. Die Relation des menschlichen Geistes manifestiert sich dabei nicht unmittelbar zum Gehirn, sondern zur Aktivität und Dynamik neuronaler, biochemischer und bioelektrischer Prozesse – ein Gehirn ohne neuronale Aktivität ist bekanntlich „tot“, auch wenn der eigentliche Tod nicht das Erlöschen der neuronalen Aktivität als Interface und Verbindung des Geistes zum Gehirn ist, sondern die grundsätzliche Eliminierung und Verunmöglichung der Interrelation mit dem Geist.

An dieser Stelle glauben verschiedene Religionen übrigens, dass der menschliche Geist nicht nur „Geist“, sondern eine Geist-Seele ist. Die „Seele“ wird in klassischer Theologie als „forma corporis“, als „Form des Körpers“ betrachtet. D.h. das eigentliche Sein des Menschen ist somit seine Geistseele. Sie wird kraft ihrer relativen Unabhängigkeit vom Körper als potentiell fähig geglaubt, einen anderen Modus eines passenden Körpers zu beseelen.

Doch was bedeutet „zu beseelen“?! Die Geistseele wirkt ordnend und informativ im Sinne einer holistischen Informationsmatrix, die Ordnung in den gesamten Körper und insbes. in das neuronale Chaos bringt. Wird im Folgenden von „Geist“ gesprochen, so meint das die Geistseele in direkter Interrelation mit dem Gehirn. Umgekehrt emergiert der Geist aus der elektrochemischen Wechselwirkung der Neuronen(-Ensembles) in einer durch das synchrone Feuern von Neuronen kontrollierten Weise, die eine nicht-zufällige, nicht-chaotische, sondern eben geordnete räumliche Verteilung aufweisen. So gibt es ein permanentes Reverse-Feedback zwischen Gehirn und Geist, das wiederum eine daraus abgeleitete „Technologie des Lebendigen“ als „echter“ künstlicher Intelligenz erahnen lässt.

Eine solche Technologie besitzt die Aufgabe, die Ordnung des Materiellen durch die Ordnung des Geistigen zu ermöglichen und umgekehrt: die Ordnung des Geistigen aus der Ordnung des Materiellen „analog“ hervorgehen zu lassen i.S. einer geordneten Emergenz. So besteht eine mutuale Interaktion zwischen Gehirn und Geist, die permanent aufeinander ein reverses Feedback ausüben und auf diese Weise miteinander zusammen wirken (Synergie zwischen Geist und Gehirn).

Das ist genau die These, die im Folgenden entfaltet wird. Eine kleine philosophische Reflexion beschließt das Buch.

Das Gehirn als ein nichtlinearer Quantencomputer

Das Gehirn kann als ein Quantencomputer verstanden werden, wenn die Quantensoftware nicht binär, sondern – in einem noch zu definierenden Sinn – nichtlinear und *komplex* ist, und wenn diese komplexe Informationsverarbeitung relativ stabil ist, d.h. wenn sie kraft Verarbeitung komplexer Information in sich „persistiert“.

Das setzt eine Selbstbezüglichkeit der Quantensoftware voraus, die Reflexion, Projektion und die Erzeugung neuer Zustände (Innovation) voraussetzt. Folglich verändert sich die Quantensoftware, indem etwa Operatoren spontan aktiviert werden, um komplexe Information zu verändern und topologisch zu verarbeiten. So ist eine verborgene Ordnung der Quantensoftware Ziel, Mittel und Grund der Ordnung elektro-chemischer Aktivitäten des Gehirns.

Quantum Computation

Das Quantum Computing ist derzeit ein intensiv gefördertes Gebiet. Das Besondere ist das Rechnen mit sog. Quantenbits resp. QuBits. Ein QuBit ist eine binäre Alternative (ein Bit), die eine Superposition zwischen zwei Zuständen 0 und 1 erlaubt. Damit sind 0 und 1 lediglich die sog. Basiszustände des superponierten Zustandes eines QuBits. Im Akt der Messung kollabiert demnach der superponierte Zustand auf einen der beiden Basiszustände mit einer Wahrscheinlichkeit, die durch eine komplexe Zahl angegeben wird.

Anschaulich lässt sich ein QuBits durch die sog. Riemann-Sphäre darstellen: eine dreidimensionale Kugel, die die Veränderung des reellen Betrags einer komplexen Zahl $x + iy = r e^{i \phi}$ visualisiert. Das QuBit wäre der Zeiger, der auf einen beliebigen Punkt der Riemann-Sphäre deuten kann.

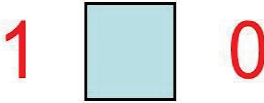
Konkret kann daher die zeitabhängige Zustandsänderung eines QuBits als Bewegung eines Zeigers in der Riemann-Sphäre interpretiert werden. Der Zeiger wiederum gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass bei einer Messung der erfolgten Änderung des Quantenzustandes eben dieser Zustand auch tatsächlich gefunden wird. Der Zeiger ist der Eigenvektor und seine Länge ist der Eigenwert, der auf 1 normiert ist.

Eine Operation bzw. Quanten-Informationsverarbeitung ist gleichbedeutend mit der definierten Bewegung des Zeigers. Bei der Messung geht das Quantensystem von einem „reinen“ in einen „gemischten“ Zustand über, der nicht mehr durch die Wellenfunktion, sondern durch die sog. Dichte-Matrix beschrieben wird.

Quantum computation

Bit & Qubit

• Two states classical bit



• Two levels quantum system (qubit)



Polarization vector:

$$S = (S_x, S_y, S_z) = \text{const}$$

Density matrix:

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} \\ \rho_{21} & \rho_{22} \end{pmatrix}$$

• Equalities

$$\boxed{1} \equiv \text{Bloch sphere with vector at } \rho = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \Rightarrow |1\rangle$$

$$\boxed{0} \equiv \text{Bloch sphere with vector at } \rho = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow |0\rangle$$

• Single qubit operations



$$\rho(t) = e^{-iHt/\hbar} \rho(0) e^{iHt/\hbar}$$

5

Der Vorteil des Rechnens mit Quantenbits ist, dass bereits QuBits nicht auf eine 0 oder 1 festgelegt sind, sondern miteinander eine *Superposition* bilden:

$$|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$$

D.h. diese beiden QuBits repräsentieren bereits $2^2 = 4$ Zustände – zwei klassische Bits hingegen können nur zwei Zustände repräsentieren. So nimmt die Zahl der Zustände, die durch QuBits repräsentiert werden können, nichtlinear zu. Generell kann man daher mit einem sog. *Quantenregister* als geordnete Summe von N QuBits theoretisch (!) 2^N Zustände repräsentieren. Das Rechnen mit solchen komplexen Quantenzuständen braucht daher auch nur algorithmische und keine nichtlinearen Ressourcen!

Das ist der entscheidende Geschwindigkeitsvorteil eines Quantencomputers, der jedoch nur auf eine bestimmte mathematische Problemklasse zutrifft.

Auch können Qubits miteinander zusätzlich *verschränkt* werden: eine Verschränkung liegt dann vor, wenn durch die Superposition mind. zweier Zustände der ursprüngliche Zustand *nicht* mehr definit vorliegt, d.h. verloren geht (sog. „reiner“ Zustand):

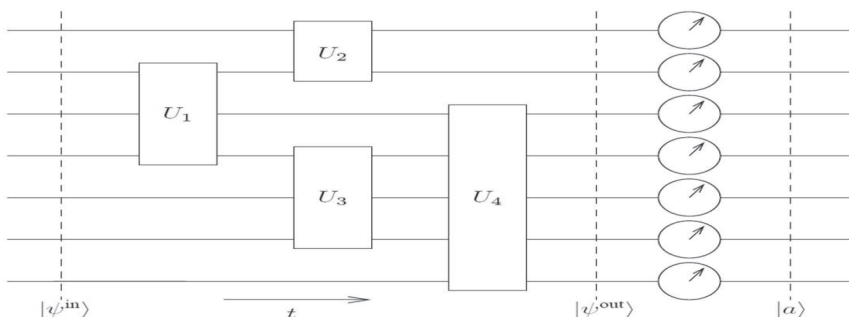
$$\Psi := \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle)$$

Die **Wahrscheinlichkeit** erhält man, indem man die Wellenfunktion mit ihrem komplex Konjugierten multipliziert, da das Quadrat einer komplexen Zahl immer eine reelle Zahl ergibt.

Ein *Quantenalgorithmus* wiederum ist ein Quantenzustand, der einen anderen Quantenzustand verändert bzw. unitär transformiert. Verschiedene Schreibweisen dafür sind üblich, die hier jedoch nicht interessieren. Verschiedene Quantenalgorithmen wiederum bilden ein **Quantengatter**: durch die geschickte *Kombination* von Quantenalgorithmen also können verschränkte Quantenzustände *instantan*, d.h. auf einmal, verändert werden. Die Veränderung wiederum korrespondiert einer Rechnung. Da verschiedene Qubits parallel verändert werden, so wirkt sich die Veränderung *eines* Qubits auf das *gesamte* Netzwerk von Qubits aus: so verwirklicht ein paralleler Rechenschritt in einem Quantencomputer viele sequentielle Rechenschritte gleichzeitig.

Die *technische* Realisierung eines Quantenregisters inkl. Quantenalgorithmen, die einen Quantengatter definieren, sieht in einer Schemazeichnung etwa so aus:

- die linke Säule (senkrechte gestrichelte Linie) repräsentiert das Quantenregister,
- die Mitte ($U_1, U_2 \dots$) ein Quantengatter als Kombination von einzelnen Quantenalgorithmen („U“ steht für eine unitäre Transformation, die bestimmte Symmetrieeigenschaften eines Quantenzustandes bewahrt),
- die rechte Säule repräsentiert die Messung des Quantenzustandes, also das „klassisch“-Werden, was durch die jeweilige Zeigerstellung angedeutet wird.



Womit wird nun in der physikalischen Realität gerechnet? Üblich sind binäre Zustände, etwa die binäre Polarisation eines Elektrons, eines Protons oder auch eines Photons. Damit die



binären Zustände miteinander zur Superposition gebracht und verschränkt werden können, müssen sie durch maximale Isolierung von der Umgebung mühsam präpariert werden (**Präparation**).

Doch was geschieht, wenn „gerechnet“ wird in der physikalischen Realität? Das weiß im Grunde genommen niemand, da man auf diesen kleinen Skalen unmöglich visuelle Repräsentationen erhalten kann. Man kann sich miteinander vernetzte QuBits als das Reich der Möglichkeiten verstehen, genauer: als einen **anderen Modus von Realität**, in der Möglichkeiten der Verwirklichung auf eine „virtuelle“ Weise *real* ausprobiert werden. Will man nun die Zustände der QuBits kontrollieren – das setzt jedes Quantum Computing voraus –, so muss man diesen Zustand entsprechend vor dem thermischen Rauschen (Thermodynamik) schützen. Immer wieder „kippen“ QuBits spontan und unkontrolliert um. Dadurch verändern sie natürlich jedes andere QuBit, das mit ihnen verschränkt ist, instantan – der Fehler breitet sich aus. Auch die Superposition mit anderen QuBits nimmt eine andere Gestalt an.

Aufgrund der Nicht-Einsehbarkeit von komplexen Quantenzuständen versucht man, mit erheblich mehr QuBits als zur Rechnung erforderlich eine sog. Fehlerkorrektur umzusetzen. Die Idee dazu basiert im Grunde auf der Vorstellung einer **indirekten Quantenmessung**, d.h. der Veränderung eines Quantenzustandes, ohne ihn komplett und vollständig Realität werden zu lassen, d.h. ohne ihn vollständig zu messen bzw. dazu zu zwingen, klassisch und somit konkret-real werden zu müssen. Vielmehr wird ein Quantenzustand in einen anderen überführt, so dass der Quantenzustand und damit der o.g. „andere Modus von Realität“ aufrecht erhalten wird.

Die konkrete Rechnung erfolgt physikalisch etwa dadurch, dass die Energie des gesamten Quantensystems sukzessiv minimiert wird. Ein sog. adiabatischer Quantencomputer wird in den Zustand der niedrigsten Energie überführt. Ob es nun wirklich der Zustand der niedrigsten Energie ist, bleibt jedoch unklar: der Zustand niedrigster Energie wird lediglich approximiert. Anschaulicher formuliert: ob das lokale Minimum einer Funktion auch das globale Minimum dieser Funktion ist, kann nicht bewiesen noch widerlegt werden. Die Funktion, um die es sich dabei handelt, ist die Funktion, deren Gradient abnimmt (**gradient descent**). Ob ein Gradient ab- oder zunimmt, bedarf einer Referenz, d.h. einer sog. *Bewertungsfunktion*.

Eben diese Bewertungsfunktion muss a priori vom Quanten-Ingenieur physikalisch realisiert und vom Programmierer formalisiert *vorgegeben* werden. Hier gibt es demnach **keine Selbst-Bewertung** quasi aus Nichts – wie das jedoch bei lebendigen Systemen und biologischen Lebensformen der Fall ist. Anders formuliert: das künstlich von außen nur mühsam *stabilisierte* Quantensystem stabilisiert sich *nicht* selbst von innen heraus.

Eine Anpassung des Quantensystems gelingt somit prinzipiell *nur im Rahmen* der a priori vorgegebenen Bewertungsfunktion von Aktionen bzw. Outputs des Systems. Dieser Rahmen ist nicht veränderbar bzw. diese Meta-Regel ist wie ein Dogma, das absolut gesetzt und nicht modifizierbar ist. Auf Inputs, die diesen Rahmen sprengen würden und das System mit sol-