Nobelpreis für Physik

Prof. Anton Zeilinger

Dr. Manfred Litzlbauer

Inhalt

1. Diametrale Erscheinungen 3
2. Hilfreiche Weltbilder 5
3. Wirkung ohne Verzögerung 7
4. Wahrscheinlichkeit und Quantenteleportation 8
5. Information ist Fundamentaler als Wirklichkeit 9
6. Erzwungene Antworten sind zufällig 11
7. Objekt Permanenz 12
8. Der Folgezustand ist nicht festgelegt 14
9. Ein Quantenereignis braucht keine Ursache 15
10. Zusammenfassung 17
Abbildungsverzeichnis: 18

Nobelpreis für Physik 2022 an Prof. Anton Zeilinger

Die Quantenmechanik ist ein Teilbereich der Physik, der sich mit der Beschreibung des Verhaltens von Teilchen auf der subatomaren Ebene befasst. Im Gegensatz zur klassischen Physik, die auf der Annahme von deterministischen Gesetzmäßigkeiten beruht, ist die Quantenmechanik probabilistisch. Das bedeutet, dass es unmöglich ist, das Verhalten von Teilchen auf der subatomaren Ebene mit 100%iger Sicherheit vorherzusagen.

Ein wichtiger Aspekt der Quantenmechanik ist die Superposition, bei der sich ein Teilchen in mehreren Zuständen gleichzeitig befinden kann. Ein weiteres wichtiges Konzept ist die Verschränkung, bei der zwei Teilchen miteinander verbunden sind und sich ihre Zustände gegenseitig beeinflussen können, unabhängig von der Entfernung voneinander.

Die Quantenmechanik hat viele praktische Anwendungen, wie z.B. die Entwicklung von Transistoren und Halbleiterbauelementen, die Grundlage von Computern und anderen elektronischen Geräten sind. Sie hat auch zur Entwicklung von Bildgebungstechnologien wie der Magnetresonanztomographie (MRT) beigetragen.

Jedoch hat die Quantenmechanik auch viele grundlegende Fragen aufgeworfen, wie z.B. das Verständnis der Natur der Realität auf der subatomaren Ebene und die Frage, ob es eine deterministische Erklärung des Verhaltens von Teilchen geben kann. Diese Fragen sind immer noch Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Diskussionen und Forschungen.

Anton Zeilinger 1945 in Ried i.I. (AT) geboren erhielt den Nobelpreis: *„für Experimente mit verschränkten Photonen und allgemein verschränkten Quantenzuständen, wobei er unter anderem Quanten Teleportation nachwies“*. Er gilt als ein Pionier der Quanten Informations Wissenschaft. Die erste Quantenteleportation realisierte er und sein Team bereits 1997. Anton Zeilinger gelang es neben der wissenschaftlichen Neuheit diese auch medial gut zu vermarkten. Letztendlich wurde er unter dem Namen „Mr. Beam“ einer weiten Bevölkerungsschicht bekannt.

1. Diametrale Erscheinungen

Zeilinger war und ist immer bemüht die Welt der Quantenphysik für Laien möglichst verständlich zu erklären. Im Rahmen der TV-Show „Science Talk“ hat er für sieben alltägliche Phänomene deren Äquivalenz in der Elementarteilchen Physik erläutert (Abbildung 1).

1. **Zeit** ist ein abstraktes Konzept, das die Abfolge von Ereignissen und die Dauer zwischen diesen Ereignissen misst. Zeit wird oft als eine unveränderliche Dimension betrachtet, die in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft unterteilt ist. Es ist ein fundamentales Konzept in der Physik, wo es eine wichtige Rolle in der Beschreibung von Bewegung und Veränderung spielt. In unserem täglichen Leben nutzen wir Zeit, um Termine zu planen, uns zu organisieren und um den Fortschritt von Ereignissen zu messen. Zeit ist jedoch auch eine subjektive Erfahrung und kann von Person zu Person unterschiedlichen werden.

2. **Raum** ist ein Begriff, der sich auf eine physische Ausdehnung bezieht, die von Objekten, Körpern oder Substanzen eingenommen wird oder eingenommen werden kann. Raum ist eine Grundvoraussetzung für die Existenz und Bewegung von Körpern und Objekten und kann in drei Dimensionen (Länge, Breite und Höhe) beschrieben werden. Der Raum kann auch als das Umfeld betrachtet werden, in dem sich Objekte und Ereignisse abspielen, und kann sowohl materiell als auch immateriell sein. Z.B. kann der Raum von Gedanken oder Konzepten

eingenommen werden. In der Physik wird der Raum auch als Teil des Raum-Zeit-Kontinuums betrachtet, das beschreibt Gesetze der Gravitation und Bewegung von Körpern genau.

Abbildung 1 Sieben Thesen

3. **Kausalität** ist ein Konzept, das sich auf die Beziehung zwischen Ursache und Wirkung bezieht. Es verrät die Art und Weise, wie eine Ursache ein bestimmtes Ergebnis oder eine bestimmte Wirkung hervorruft. Kausalität besagt, dass jede Wirkung durch eine bestimmte Ursache generiert wird und dass eine Ursache notwendig ist, um eine bestimmte Wirkung zu erzielen.

4. **Information** bezieht sich auf Daten oder Wissen, das kommuniziert oder erhalten wird. Es umfasst Wissen, Fakten oder Details, die eine Bedeutung oder einen Nutzen für den Empfänger haben können. Informationen können in verschiedenen Formen vorliegen, wie z.B. schriftlich, mündlich, visuell oder durch andere Kommunikationskanäle. In der Informationswissenschaft wird Information als strukturiertes oder unstrukturiertes Wissen betrachtet, das in einer bestimmten Form codiert ist. Es kann als eine Einheit von Daten oder Fakten betrachtet werden, die in einem Kontext organisiert und interpretiert werden kann, um Nutzen oder eine Bedeutung zu haben. Informationen können auch als Prozess der Erzeugung, Übertragung und Nutzung von Wissen betrachtet werden.

5. **Zufall** bezieht sich auf ein Ereignis oder eine Situation, die ohne Vorhersehbarkeit oder Kontrolle auftritt. Es ist ein Zustand, in dem kein Zusammenhang zwischen einer Ursache und einer Wirkung besteht oder in dem das Ergebnis nicht durch natürliche Entscheidungen oder Handlungen beeinflusst werden können.

6. **Zustand** bezieht sich auf die aktuelle Beschaffenheit von etwas. Es kann sich auf den physischen oder mentalen Zustand von Objekten, Systemen oder Menschen beziehen. In der Physik bezieht sich der Zustand auf die spezifischen Eigenschaften eines physikalischen Systems, wie z.B. seine Position, Bewegung oder Energie. Der Zustand eines Systems kann

durch eine Reihe von Parametern oder Variablen beschrieben werden, welche den aktuellen Zustand des Systems quantifizieren.

7. **Eigenschaft** bezieht sich auf eine spezielle Charakteristik oder Merkmal von etwas. Es kann sich auf körperliche Eigenschaften von Objekten oder auf Persönlichkeitseigenschaften von Menschen beziehen. Physische Eigenschaften beziehen sich auf die Eigenschaften von Objekten wie Größe, Form, Farbe, Gewicht, Härte oder Textur.

2. Hilfreiche Weltbilder

Bevor diese obigen Begriffe auf die Quantenmechanik übertragen werden, ist es erforderlich das Weltbild von Quantenphysikern halbwegs zu verstehen. Dazu kann man die Frage stellen: *„Welche Zugänge hat diese Welt“*. Als Erklärung dafür muss jetzt das Schnittstellen Modell herhalten. In Abbildung 2 sind drei verschieden Schnittstellen zu eigentlich unerreichbaren Welten dargestellt. Tastatur, Maus und Bildschirmsymbole sind das Interface von Computern. Damit ist es dem IT-Laien möglich äußerst komplexe Anwendungen aus seiner Domäne (Video-Cutter) zu betreiben, ohne zu wissen, wie eine CPU arbeitet. Es ist aber nahezu unmöglich darüber etwas über die tatsächliche Funktion von Computern zu erfahren. Dazu bräuchte es schon einen enormen Zufall. In Zeiten als es noch „Blue Screens“ bei Windows gab, konnten man auf die Idee kommen das binäre Technik dahintersteckt. Menschen benutzen dasjenige Werkzeug, welches den geringsten Energieaufwand erfordert. Einfacher Apps werden bevorzugt.

Ein anderes Modell verwendete Platon mit seinem Höhlengleichnis. Das Höhlengleichnis ist eine Metapher, die er in seinem Werk "Politeia" (Die Republik) beschrieben hat. Das Gleichnis beschreibt eine Gruppe von Menschen, die in einer Höhle gefangen gehalten werden und nur die Schatten auf einer Wand sehen können, die durch das Licht einer Feuerstelle hinter ihnen erzeugt werden. Diese Menschen nehmen die Schatten für die Realität und sind sich nicht bewusst, dass es eine Welt außerhalb der Höhle gibt.

Platon verwendet das Höhlengleichnis, um seine Philosophie der Ideenlehre zu veranschaulichen. Er argumentiert, dass die Schatten auf der Höhlenwand den materiellen Dingen in der physischen Welt entsprechen, während die wirkliche Realität jenseits der Höhle in der Welt der Ideen liegt. Er behauptet, dass die Menschen, die in der Höhle gefangen sind, wie die meisten Menschen in der physischen Welt leben und nicht erkennen, dass es eine höhere, transzendente Wirklichkeit gibt.

Das Höhlengleichnis stellt somit eine Kritik an der Wahrnehmung der physischen Welt und eine Aufforderung zur Suche nach Wissen und Erkenntnis dar. Es lädt dazu ein, das Bewusstsein zu erweitern, um die höhere Wirklichkeit der Ideen zu erkennen und zu verstehen, was das wahre Wesen der Dinge ausmacht. In den griechischen Denkschulen wurde das Schöne (Elegante) auch für das Wahre gehalten. Was gibt’s Schöneres als das pythagoräische Dreieck.

Die Denkweise von Quantenphysikern lässt sich ebenfalls gut mit diesem Schnittstellen Modell erklären. Der Zugang zur Realität erfolgt über die Wirklichkeit. Die Realität bezieht sich auf die tatsächliche Existenz von Objekten, Ereignissen oder Phänomenen in der physischen Welt. Es ist das, was objektiv existiert und unabhängig von menschlicher Wahrnehmung oder Vorstellungskraft ist. Die Realität kann durch empirische Beobachtungen, Messungen und Experimente bestätigt werden.

Abbildung 2 Schnittstellen Modell

Die Wirklichkeit hingegen bezieht sich auf die subjektive Erfahrung oder Interpretation der Realität durch den Menschen. Es ist das, was wir durch unsere Sinne, Wahrnehmungen und Vorstellungen wahrnehmen oder konstruieren. Die Wirklichkeit kann von Person zu Person unterschiedlich sein und durch Faktoren wie Kultur, Erziehung, Persönlichkeit und Emotionen beeinflusst werden.

Obwohl Realität und Wirklichkeit unterschiedlich sind, sind sie miteinander verbunden. Die Realität bildet die Grundlage für unsere Wahrnehmungen und Vorstellungen, während unsere Wahrnehmungen und Vorstellungen unsere Wirklichkeit formen. Unsere Vorstellungen von der Wirklichkeit können auch unsere Handlungen und Entscheidungen beeinflussen, was Auswirkungen auf die Realität haben kann. Das evolutionäre Grundgesetz vom: „Überleben des Fittesten“ besagt genau das aus. Nicht der Schönste oder das Einfachste überlebt, sondern dasjenige welches sich am besten an die Realität anpassen kann. Darin besteht auch der Erfolg der Naturwissenschaften.

Im Folgenden nun eine genauere Gegenüberstellung der obige siebe Begriffe in Wirklichkeit und Realität.

3. Wirkung ohne Verzögerung

Bei UND-Gattern (auch als AND-Gatter oder Konjunktionsgatter bezeichnet) handelt es sich um eine digitale Schaltung, die zwei oder mehr Signale erhält und ein Ergebnis erzeugt, das nur dann auf "1" gesetzt wird, wenn alle Signale "1" sind. Wenn eines oder mehrere Signale "0" sind, wird das Ergebnis auf "0" gesetzt. Zu einer Verzögerung zwischen Ein und Ausgang kommt es immer, auch wenn diese sehr kurz, im Nanosekunden Bereich liegen. Das erklärt sich in der Funktionsweise von Transistoren die eben eine gewisse Schaltzeit (Fluten der Halbleiterschicht) haben. Diese liegt bei wenigen Nanosekunden (3nS) und ist so für den Menschen nicht wahrnehmbar. Wenn allerdings für eine Bilderkennung dieses Gatter eine Milliarde Mal schalten muss, sind auch 3 Sekunden vergangen (Abbildung 3).

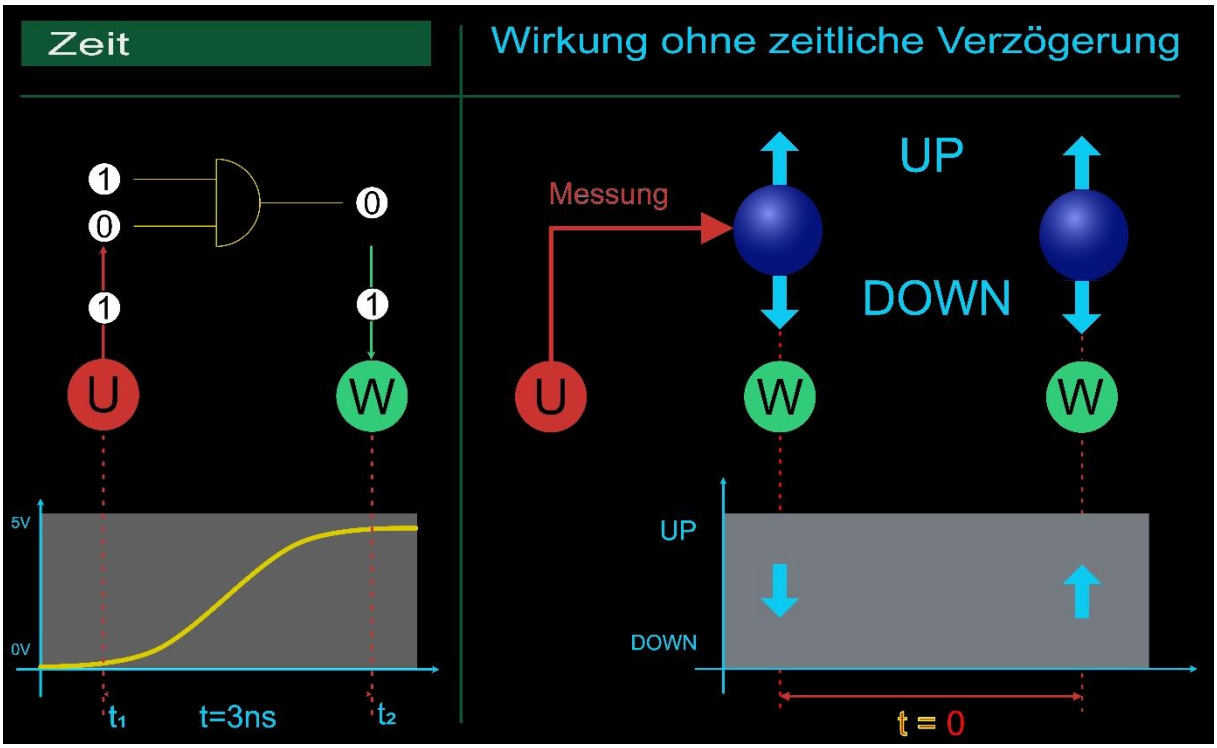

Abbildung 3 Verzögerung

Spukhafte Fernwirkung, auch als "Quantenverschränkung" oder "verschränkte Teilchen" bezeichnet, ist ein Konzept in der Quantenmechanik, das besagt, dass zwei Teilchen, die miteinander verschränkt sind, auf unerklärliche Weise miteinander verbunden bleiben, unabhängig davon wie weit sie voneinander entfernt sind. Das bedeutet, dass eine Veränderung an einem der verschränkten Teilchen sofort (ohne Verzögerung) eine Veränderung am anderen Teilchen hervorrufen kann, unabhängig davon, wie weit die Teilchen voneinander entfernt sind.

In Abbildung 3 rechts sind zwei Elektronen mit deren Spin – Eigenschaften dargestellt. Solange die Elektronen nicht gemessen werden, ist deren Spin auch nicht bekannt. Wenn nun diese beiden Elementarteilchen auch noch verschränkt sind, führt eine Messung an einem Elektron zu dessen zufälliger, polaren Ausrichtung aber auch gleichzeitig und ohne Messung beim anderen. Allerdings immer in der entgegengesetzten polaren Ausprägung.

Einstein hat zwar die Verschränkung mathematisch nachgewiesen, diese aber als spukhaft bezeichnet, weil sich nichts schneller als Licht bewegen kann. Einstein postulierte weitere versteckte physikalische Grundgesetzte, während die Kopenhagener Deutung (Nils Bohr) genau dieses Verhalten schon als Grundgesetz ankerkannten.

4. Wahrscheinlichkeit und Quantenteleportation

Die Informationstheorie bezieht sich auf die Messung und Übertragung von Informationen. In der Informationstheorie kann die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses oder einer bestimmten Nachricht als Maß dafür dienen, wie viel Information in der Nachricht enthalten ist.

Die Informationswahrscheinlichkeit kann als die Wahrscheinlichkeit definiert werden, dass eine bestimmte Nachricht oder ein Ereignis auftritt. Sie kann genutzt werden, um die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, mit der „Eine“ bestimmte Nachricht empfangen wird oder um die Menge an Unsicherheit oder Entropie in einer Nachricht zu quantifizieren.

In der Informationstheorie ist die Information, die in einer Nachricht enthalten ist, insbesondere höher, je wahrscheinlicher die Nachricht ist. Eine Nachricht, die mit hoher Wahrscheinlichkeit erwartet wird, enthält weniger Informationen als eine Nachricht, die mit geringerer Wahrscheinlichkeit auftritt. So hat die Nachricht *„Morgen geht die Sonne auf“* eine Informationswahrscheinlichkeit von H = 0 (Abbildung 3). Ein Münzwurf dagegen schon H = 1bit. Wobei hier bit eine Maßzahl ist und nicht ein binärer physikalischer Zustand. Die Informationswahrscheinlichkeit H eines Würfels liegt schon bei 2,6. Für ein besseres Verständnis stelle man sich einen Fußboden mit 5,3m^2 vor. Die Fliesen sind jedoch nur in Paketgrößen von 1m^2 erhältlich. Zwangsweise sind 6m^2 zu kaufen. Genauso braucht es 3bit, um die Würfelergebnisse von 2,6 darzustellen.

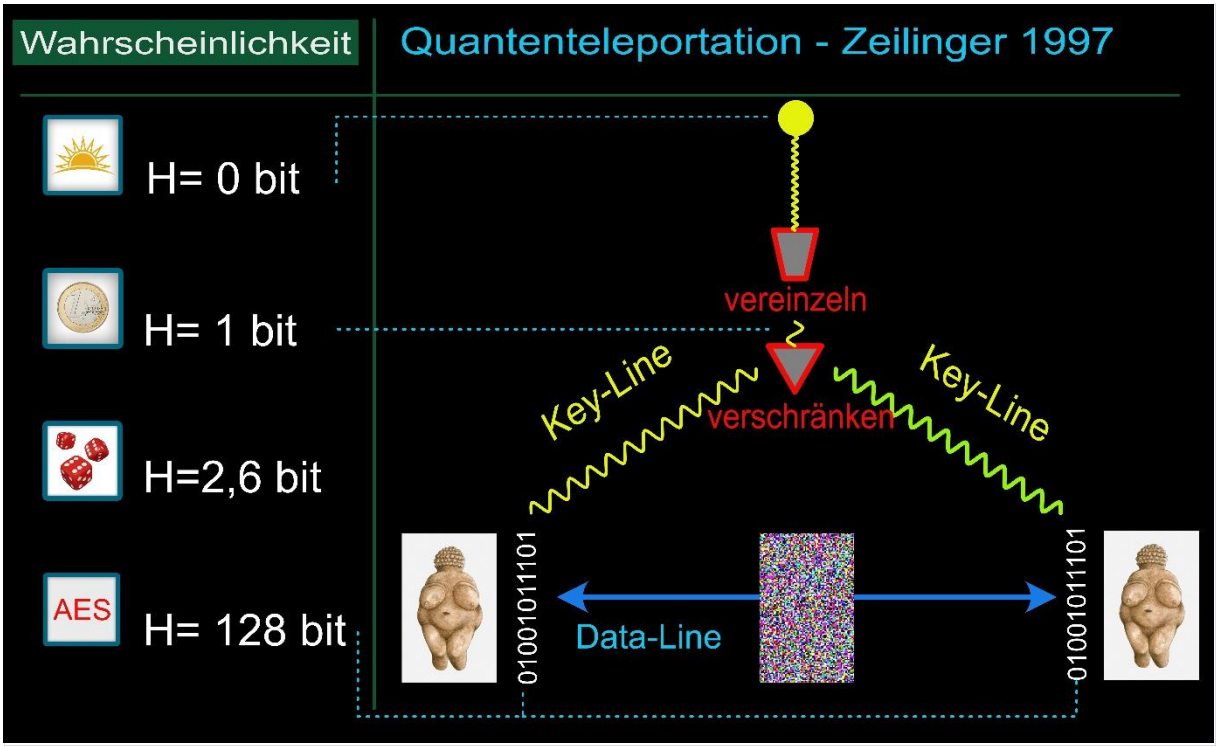

Abbildung 4 Informations Wahrscheinlichkeit

Der AES (Advanced Crypto Standard) hat eine Informationswahrscheinlichkeit von 128bit. Es ist also schon sehr unwahrscheinlich hier den richtigen Schlüssel zu finden. Eigentlich ein sehr sicheres Verfahren, wenn da nicht die „Spione“ entlang der Leitung wären, die erst den Schlüssel und dann die

Nachricht abhören würden. Die garantierte abhörsichere Übertragung von Schlüsseln ist eine praktische Anwendung der Quantenteleportation.

Quantenteleportation ist ein Konzept in der Quantenphysik, dass die Übertragung des Zustands eines Teilchens auf ein anderes Teilchen an einem anderen Ort ermöglicht, ohne dass die Teilchen auf traditioneller Weise interagieren müssen. Die Quantenteleportation nutzt die Eigenschaften der Quantenverschränkung, um Informationen über den Zustand eines Teilchens von einem Ort zum anderen zu übertragen.

Bei der Quantenteleportation wird zuerst ein Paar von verschränkten Teilchen erzeugt, die als "EPR-Paar" (Einstein-Podolsky-Rosen) bezeichnet werden. Eines der Teilchen des EPR-Paars wird dann an den Ort geschickt, an dem der Zustand des Teilchens teleportiert werden soll. An diesem Ort wird ein anderes Teilchen vorbereitet und mit dem anderen Teilchen des EPR-Paars verschränkt. Die Informationen über den Zustand des ursprünglichen Teilchens werden dann auf das verschränkte Teilchen übertragen, das an dem neuen Ort vorbereitet wurde. Der ursprüngliche Zustand des Teilchens wird dadurch "teleportiert".

Obwohl der Zustand des Teilchens tatsächlich teleportiert wird, wird keine tatsächliche Materie von Einem Ort zum anderen übertragen. Die Quantenteleportation hat wichtige Anwendungen in der Quanteninformatik und Quantenkommunikation, und wird auch von einigen Wissenschaftlern als wichtiger Schritt hin zur Quantencomputertechnologie angesehen.

Die "Venus von Willendorf" ist eine prähistorische Figur aus der späten Altsteinzeit, die etwa 25.000 bis 30.000 Jahre alt ist und in Österreich entdeckt wurde. Sie ist eines der bekanntesten Artefakte aus dieser Zeit und ist bekannt für ihre Darstellung einer weiblichen Figur mit stark betonten Merkmalen wie Brüsten, Hüften und Bauch.

Zeilinger gelang es im Jahre 2007 dieses Bild unter zu Hilfenahme der Quantenteleportation mittels AES-Schlüssel zu übertragen. Dazu wurden Photonen vereinzelt und verschränkt (EPR -Paar). Die Polarisation (horizontal, vertikal) der Photonen ist dabei absolut zufällig. Die erste Bedingung für einen sicheren Schlüssel ist damit erfüllt. Im weiteren Verfahren wird eines der beide Photonenpaare über eine Leitung zum Empfänger übertrage. Sollte es dabei zu einem nichtqualifizierten Abhören kommen, so entspricht das einer Quantenmessung und das Photon realisiert sich. Sender und Empfänger bemerken das unmittelbar und erkennen einen Angriff. Damit wäre auch die zweite Bedingung, nämlich der sichere Übertragungsweg, erfüllt. Dies wird als polarisationsabhängige Verschlüsselung (PDC) bezeichnet und ist eine wichtige Methode in der Quantenkommunikation und der Quantenkryptographie.

5. Information ist Fundamentaler als Wirklichkeit

Cornelia Parker ist eine bedeutende zeitgenössische Künstlerin, die sich durch ihre einzigartige Herangehensweise an Material und Konzept auszeichnet und die Grenzen der Kunst auf neue und innovative Weise erweitert hat.

Parker arbeitet mit alltäglichen Gegenständen wie Kleidung, Möbel und Haushaltsgeräten und transformiert sie in unerwartete Kunstwerke. Ein Beispiel für ihre Arbeit ist die Skulptur "*Cold Dark Matter: An Exploded View*", die aus dem Inhalt einer in die Luft gesprengten Gartenlaube besteht.

Parker sammelte die Überreste der Explosion und ordnete sie in einem raumfüllenden Kunstwerk an. Man könnte diese Arbeiten durchaus im Bereich der Entropie verorten – alles zerfällt.

Für den Betrachter ist es kaum möglich Information aus diesem Bild zu bekommen. Nach systemischer Theorie entsteht Information nur dann im Beobachter, wenn dieser auf Grund eines externen

Unterschiedes (im Kunstwerk) auch einen internen Unterschied (im Gehirn) generiert. In Abbildung 5 erkennt man eventuell eine Fahrradfelge und einen Fensterrahmen.

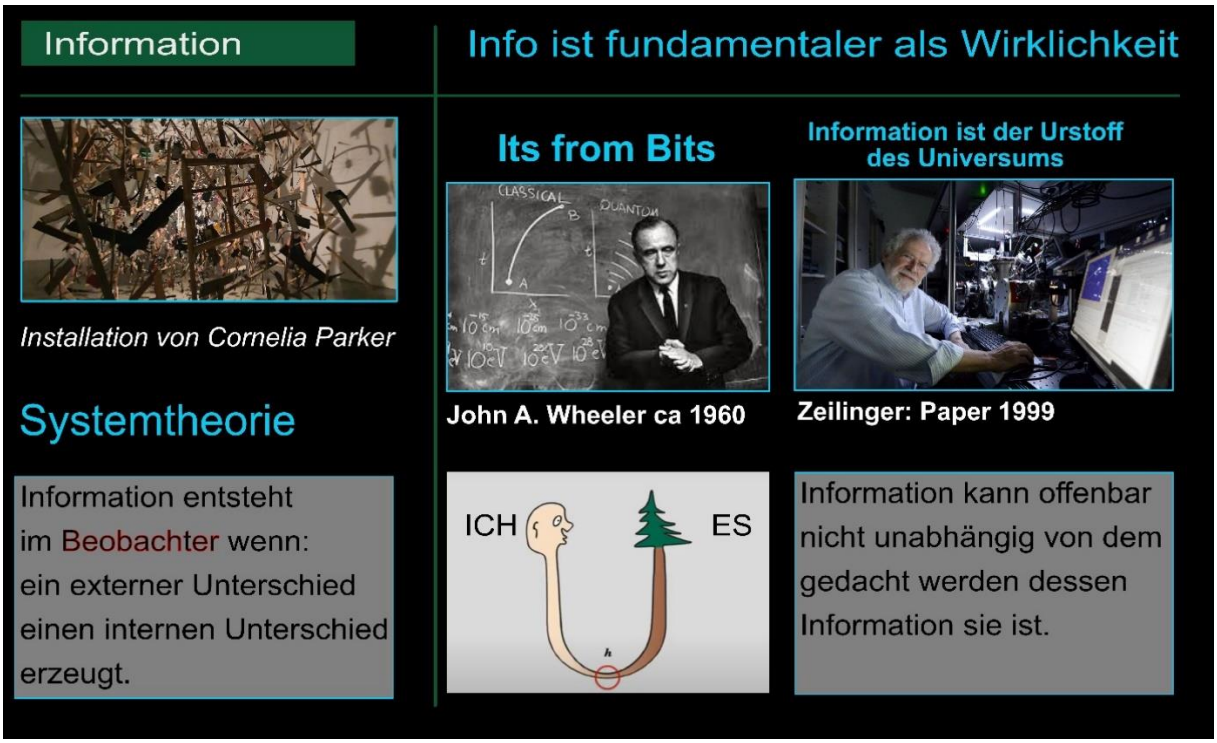

Abbildung 5 Information als Wirklichkeit

John Archibald Wheeler (1911-2008) war ein bedeutender amerikanischer Physiker, der für seine Arbeit in der Quantenphysik und Relativitätstheorie bekannt ist. Er war einer der führenden theoretischen Physiker des 20. Jahrhunderts und machte wichtige Beiträge zu vielen Bereichen der Physik, einschließlich der Kernphysik, Kosmologie und Geometrodynamik.

Von ihm stammt auch die Aussage „Its from bits“ was bedeutet, dass die gesamte Natur der Realität, einschließlich Raum, Zeit und Materie, auf Informationen zurückgeführt werden kann. Wheeler glaubte, dass Information der grundlegende Baustein unseres Universums ist und dass die physische Welt auf einer tiefen Ebene auf Informationen basiert.

Wheeler argumentierte, dass der Raum, die Zeit und die Materie, aus denen unser Universum besteht, auf quantenmechanischer Ebene auf Informationen reduziert werden können. Er glaubte auch, dass die Quantenverschränkung und der Verschränkungsbegriff auf fundamentale Weise mit der Information verbunden sind.

Eine weitere Aussage von Wheeler, "Information is physical", besagt, dass Information eine grundlegende physikalische Größe ist, die Energie, Entropie und andere physikalische Eigenschaften hat. Wheeler argumentierte, dass die Informationsverarbeitung ein wichtiger Teil der Physik ist und dass Information letztendlich zur Entropieerzeugung und zur Ordnung im Universum beiträgt.

Wheeler betonte auch die Bedeutung der Rolle des Beobachters in der Physik und argumentierte, dass das Universum nicht unabhängig vom Beobachter existiert. Stattdessen ist der Beobachter ein integraler Bestandteil der Natur und trägt zur Schaffung und Beobachtung der physischen Welt bei.

Die Gedanken von Wheeler *„Alles hängt mit allem zusammen“* wurden gerne von den 1968ern aufgenommen. Damit einhergehend drifteten seine Vorstellungen in das Reich der Esoterik ab und wurden von wissenschaftlichen Physikern in den weiteren Jahrzehnten gemieden. Erst Anton Zeilinger hat diese Ideen in seinem Paper von 1999 wieder aufgegriffen in dem er postulierte, dass: *„Information*

kann offenbar nicht unabhängig von dem gedacht werden dessen Information sie ist". Möglicherweise war das auch der Grund, warum Zeilinger so lange auf den Nobelpreis warten musste. Andererseits war diese Herangehensweise ein Türöffner für die österreichischen Universitäten bei der Erforschung der Theoretischen Grundlagen von Quantencomputer.

6. Erzwungene Antworten sind zufällig

Beim Würfeln gibt es eine gewisse Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines bestimmten Ergebnisses, aber die endgültige Entscheidung darüber, welches Ergebnis tatsächlich auftritt, ist zufällig und nicht vorhersehbar.

Dies liegt daran, dass das Würfeln ein probabilistischer Prozess ist, bei dem eine gewisse Anzahl von Möglichkeiten existiert, aber das Ergebnis nicht vorhergesagt werden kann, da der Wurf durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird, wie z.B. die Kraft und den Winkel des Wurfs, die Beschaffenheit des Würfels und die Beschaffenheit des Untergrunds, auf dem der Würfel landet.

Wären alle diese Faktoren (Ausgangsbedingungen) bekannt so kann das Ergebnis eines jeden Wurfes jedoch exakt berechnet werden. Bei einem derartigen Experiment würde man dann auch feststellen, dass die Verteilung der Ergebnisse eben nicht Gleichverteilt (16.67%) sind, sondern abhängig vom Würfel wären, wenn alle anderen Einflussgrößen konstant bleiben.

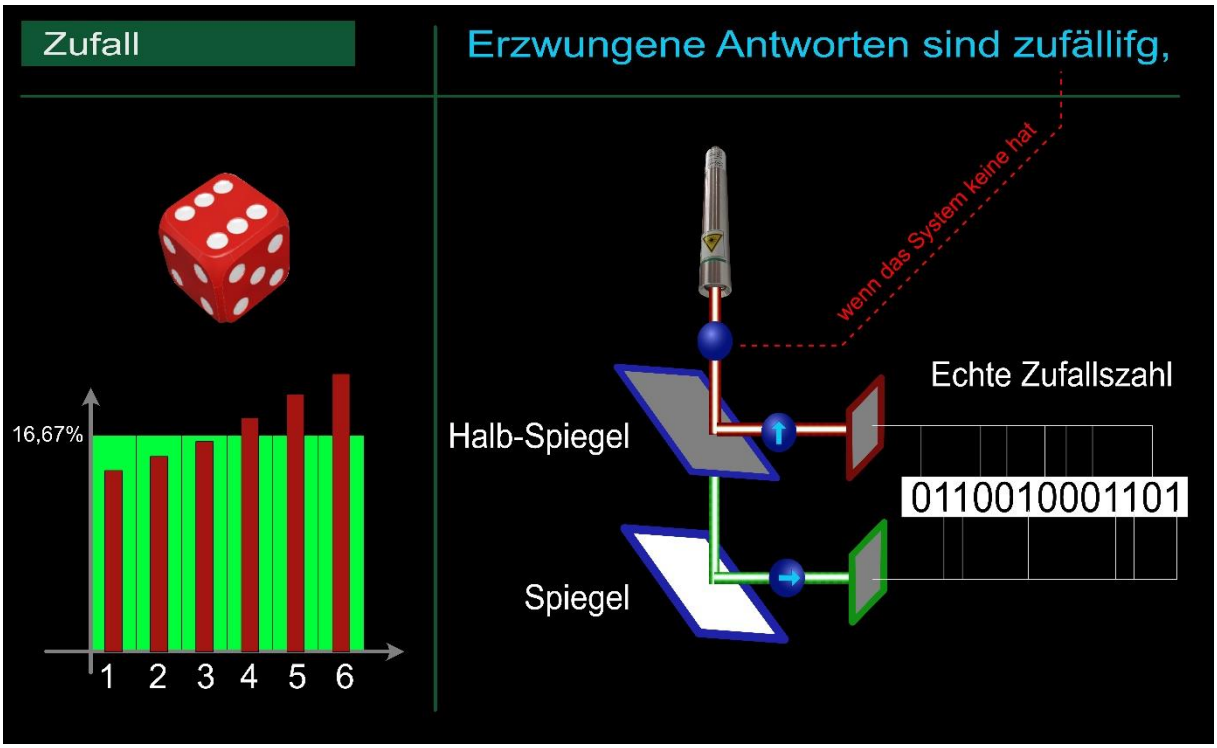

Abbildung 6 Zufall

Ein Würfel, bei dem die „Augen" leicht eingefräst sind, hat auf der Sechserseite eine geringere Masse was somit zu einer geringfügigen Schwerpunktverschiebung führt und als Folge davon den Sechser häufiger kommen lässt (Abbildung 6). Damit weicht die Zufälligkeit der „Wirklichkeit" einem Determinismus. Siehe Laplace'scher Dämon.

Der Laplace'sche Dämon ist ein hypothetisches Konzept, das von dem französischen Mathematiker und Philosophen Pierre-Simon Laplace im 18. Jahrhundert eingeführt wurde. Der Dämon ist eine metaphorische Figur, die als Wesen dargestellt wird, das alle physikalischen Gesetze kennt und alle

Details des Universums kennt, einschließlich der Position und Geschwindigkeit jedes Teilchens. Der Dämon ist in der Lage, jede zukünftige Entwicklung des Universums genau vorherzusagen.

Sabine Hossenfelder eine deutsche Physikerin und Wissenschaftsautorin, die sich mit der Philosophie der Physik und der Grundlagenforschung beschäftigt hat in ihren Werken die Idee des Determinismus und dessen Rolle in der Physik diskutiert.

Hossenfelder argumentiert, dass die Natur der Realität und die Naturgesetze, die sie beschreiben, nicht notwendigerweise deterministisch sein müssen. Sie schlägt vor, dass es auf der fundamentalen Ebene der Natur Gesetzmäßigkeiten gibt, die unvorhersehbar sind, und dass es auf dieser Ebene Grenzen der Vorhersagbarkeit gibt.

Ein Beispiel dafür ist die Quantenmechanik, die eine prinzipielle Unvorhersehbarkeit auf subatomarer Ebene aufzeigt. Hossenfelder betont jedoch auch, dass die Unvorhersehbarkeit auf der fundamentalen Ebene der Natur nicht notwendigerweise bedeutet, dass es keine Ordnung oder Regelmäßigkeit im Universum gibt.

Sie schlägt vor, dass das Universum eine Art Selbstorganisation aufweist, die auf komplexeren Ebenen der Naturgesetze und Ordnungen hervorbringt, ohne dass sie auf der fundamentalen Ebene vorhersehbar ist. Diese Idee der emergenten Ordnung und der selbstorganisierenden Systeme hat wichtige Auswirkungen auf unser Verständnis von Natur und Realität.

Zufallszahlen wie sie heute zur Verschlüsselung von digitalen Daten verwendet werden sind demzufolge nicht wirklich zufällig. Ein echte Zufallszahl kann demzufolge nur auf Basis quantenmechanischer Prozesse entstehen. Sehr „einfach“ lässt sich das mit Photonen und einem halbdurchlässigen Spiegel erzeugen (Abbildung 6). Nachdem Photonen einen Vereinzelner durchlaufen haben, treffen sie auf einen halbdurchlässigen Spiegel. Das kommt einer Quantenmessung gleich. Das Photon entscheidet absolut zufällig, ob es horizontal oder vertikal polarisiert ist. Dementsprechend wird es vom Spiegel abgelenkt oder durchgelassen. Letztendlich braucht es noch einen Konverter der horizontalen Polarisierung in 0 in vertikale Polarisierung 1 umwandelt.

7. Objekt Permanenz

Objektpermanenz ist das Konzept, dass ein Objekt weiterhin existiert, auch wenn es nicht mehr sichtbar ist oder nicht mehr im Bewusstsein einer Person präsent ist. Es ist ein wichtiger Meilenstein in der kognitiven Entwicklung von Kindern und wird als ein Zeichen dafür angesehen, dass ein Kind eine Vorstellung von einer stabilen und konsistenten physischen Welt entwickelt.

Babys und Kleinkinder haben zunächst Schwierigkeiten, Objektpermanenz zu verstehen, da sie glauben, dass ein Objekt verschwindet, wenn es nicht mehr sichtbar ist. Dies kann dazu führen, dass sie sich auf den Moment konzentrieren und sich nicht auf vergangene Ereignisse beziehen können. Im Laufe der Zeit lernen Kinder jedoch, dass Objekte weiterhin existieren, auch wenn sie nicht mehr sichtbar sind.

Die Quantenmechanik zeigt eine prinzipielle Unvorhersehbarkeit auf subatomarer Ebene auf und es auf dieser Ebene Grenzen der Vorhersagbarkeit gibt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Existenz von physischen Objekten wie dem Mond davon abhängt, ob sie von einem Beobachter beobachtet werden oder nicht. Dazu ist eine Anekdote aus der Diskussion zwischen Albert Einstein und Niels Bohr bekannt: „*Glauben Sie das der Mond nicht existiert, wenn ich nicht hinschaue*“ (Abbildung 7 links).

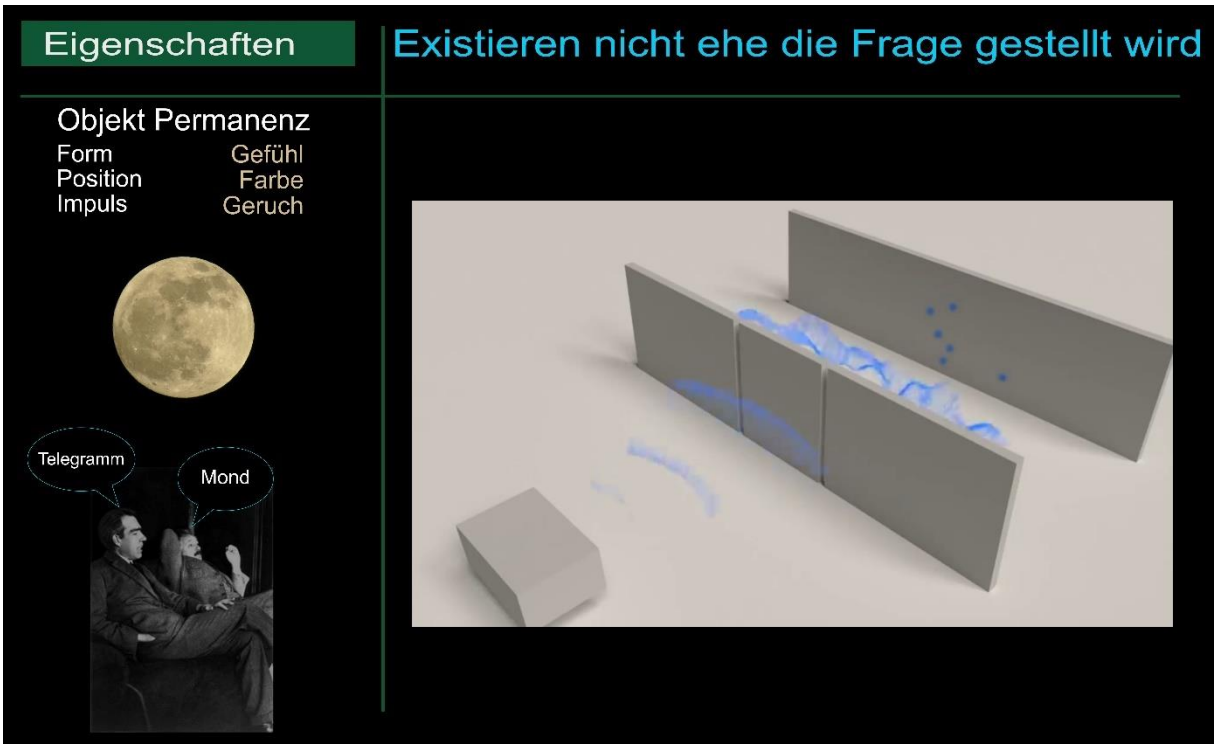

Abbildung 7 Objekt Permanenz

Nun zum wichtigsten Experiment der Quantenphysik dem Doppelspaltexperiment (Abbildung 7 rechts) Es ist ein berühmtes Experiment der Physik (millionenfach durchgeführt), das zur Untersuchung des Wellen-Teilchen-Dualismus von Licht und anderen subatomaren Teilchen wie Elektronen, Protonen und Neutronen verwendet wird.

Das Experiment wird durchgeführt, indem man eine Lichtquelle verwendet, die durch zwei dicht beieinander liegende Spalte geschickt wird, die auf einen Schirm projiziert werden. Wenn man das Licht durch die Spalte schickt, bildet sich auf dem Schirm hinter den Spalten ein Muster aus hellen und dunklen Streifen (Interferenz). Dieses Muster entsteht aufgrund der Überlagerung von Lichtwellen, die durch die beiden Spalte hindurchtreten.

Das Interessante am Doppelspaltexperiment ist, dass das Muster auf dem Schirm auch dann entsteht, wenn man die Lichtquelle auf eine sehr schwache Intensität reduziert und die Lichtteilchen einzeln durch die Spalte schickt. In diesem Fall verhält sich das Licht wie einzelne Teilchen und bildet dennoch das Muster von hellen und dunklen Streifen auf dem Schirm, was zeigt, dass das Licht sowohl als Welle als auch als Teilchen betrachtet werden kann.

Das Doppelspaltexperiment zeigt auch das Quanteneigenschaften erst dann auftreten und sichtbar werden, wenn man hinschaut, also eine Messung durchführt. Ein Elektron oder Photon nimmt seine Eigenschaften erst nach der Messung an. Vorher ist es eine Welle – Quantenwelle.

Die Schrödinger-Wellengleichung beschreibt das Verhalten von Quantenobjekten wie Elektronen und Photonen in der Quantenmechanik. Die Wellenfunktion, die von dieser Gleichung beschrieben wird, ist eine komplexe Funktion, die die Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen möglichen Zustände des Quantenobjekts darstellt.

Die Schrödinger-Wellengleichung beschreibt, wie sich die Wellenfunktion eines Quantenobjekts mit der Zeit verändert und wie sie von äußeren Einflüssen wie elektromagnetischen Feldern und anderen Kräften beeinflusst wird. Die Wellenfunktion eines Quantenobjekts gibt die Wahrscheinlichkeit an, das Objekt in einem bestimmten Zustand zu finden, wenn es gemessen wird.

Die Schrödinger-Wellengleichung hat wichtige Anwendungen in vielen Bereichen der Physik, insbesondere in der Quantenmechanik und der Quantenfeldtheorie. Sie ist ein zentrales Konzept in der Entwicklung von Quantentechnologien wie Quantencomputern und Quantenkryptographie.

Das berühmteste Beispiel, das oft mit der Schrödinger-Wellengleichung in Verbindung gebracht wird, ist das Schrödinger-Katzen-Paradoxon. Dieses Gedankenexperiment veranschaulicht die Konsequenzen der Interpretation der Wellenfunktion und des Superpositionsprinzips auf makroskopischer Ebene. Es stellt sich die Frage, ob ein Objekt in einem Superpositions-Zustand existieren kann, bis es gemessen wird, oder ob es in einem bestimmten Zustand vorhanden ist, bevor es gemessen wird.

8. Der Folgezustand ist nicht festgelegt

Eine Finite-State-Machine (FSM) ist ein mathematisches Modell zur Darstellung von Systemen mit endlich vielen Zuständen und Übergängen zwischen diesen Zuständen. Eine FSM besteht aus einer endlichen Anzahl von Zuständen, einem Satz von Eingabe-Symbolen und einem Satz von Regeln, die den Übergang zwischen den Zuständen basierend auf der Eingabe-Symbolsequenz bestimmen.

Eine FSM kann in verschiedenen Bereichen der Informatik und Elektronik verwendet werden, um Verhaltensmuster zu modellieren und zu steuern. Zum Beispiel kann eine FSM verwendet werden, um die Steuerung einer Verkehrsampel (Abbildung 8 links), die Verarbeitung von Daten in einem Computerprogramm oder die Steuerung eines Automaten in der Produktion zu modellieren.

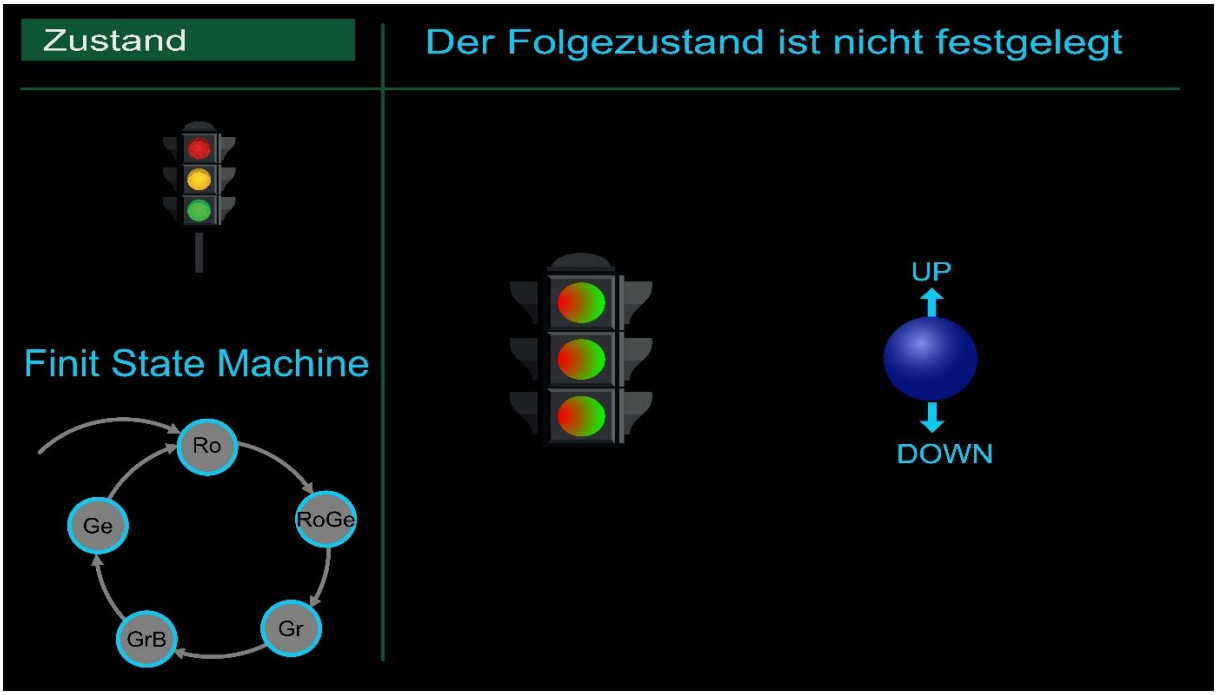

Abbildung 8 Folge Zustand

Eine FSM besteht aus einer endlichen Anzahl von Zuständen, die die möglichen Zustände des Systems darstellen, und einer Menge von Übergängen, die zwischen den Zuständen wechseln, wenn bestimmte Eingabesymbole empfangen werden. Eine FSM kann auch Ausgabe generieren, wenn sie einen bestimmten Zustand erreicht oder wenn bestimmte Übergänge ausgelöst werden.

Eine Verkehrsampel hat eine genau begrenzte Anzahl an Zuständen. Üblicherweise erfolgt der Übergang eines Zustands zum anderen zeitbedingt. Die Gelbphase ist deutlich kürzer als die Rot- und Grünphase. Fallweise reagieren Ampel auch auf einen externen Tricker. Immer dann, wenn ein Fußgeher auf die Taste drückt, wird der Querverkehr mit rot gestoppt.

Hingegen quantenmechanische Systeme können gleichzeitig in mehreren Zuständen existieren. Das bedeutet, dass ein quantenmechanisches Teilchen, wie z.B. ein Elektron, gleichzeitig in mehreren Positionen oder Energieniveaus existieren kann.

Wenn ein quantenmechanisches System in einem Superpositions-Zustand ist, kann es durch eine lineare Kombination der möglichen Zustände beschrieben werden. Diese Kombination wird als Wellenfunktion bezeichnet und gibt die Wahrscheinlichkeiten an, das System in einem bestimmten Zustand zu finden, wenn es gemessen wird.

Ein Beispiel für eine Superposition ist das Doppelspaltexperiment, bei dem ein Teilchen gleichzeitig durch beide Spalte hindurchgeht und auf dem Schirm dahinter ein Interferenzmuster erzeugt. Das Teilchen ist in einer Superposition von Zuständen, die durch die Überlagerung der Wellenfunktionen durch die beiden Spalte entstehen.

Superpositionen können auch zwischen verschiedenen Quantenzuständen bestehen, wie zum Beispiel dem Spin von Teilchen oder der Polarisation von Licht. Ein wichtiges Konzept der Quanteninformatik ist die Verwendung von Superpositionen in Quantencomputern, um komplexe Berechnungen durchzuführen.

9. Ein Quantenereignis braucht keine Ursache

Eine besondere Form des Ursache-Wirkungs-Zusammenhanges ergibt sich in komplexem System. Dabei treten Phänomen wie fern, neben, exponentielle und zeitversetzte Wirkungen auf (Abbildung 9 links).

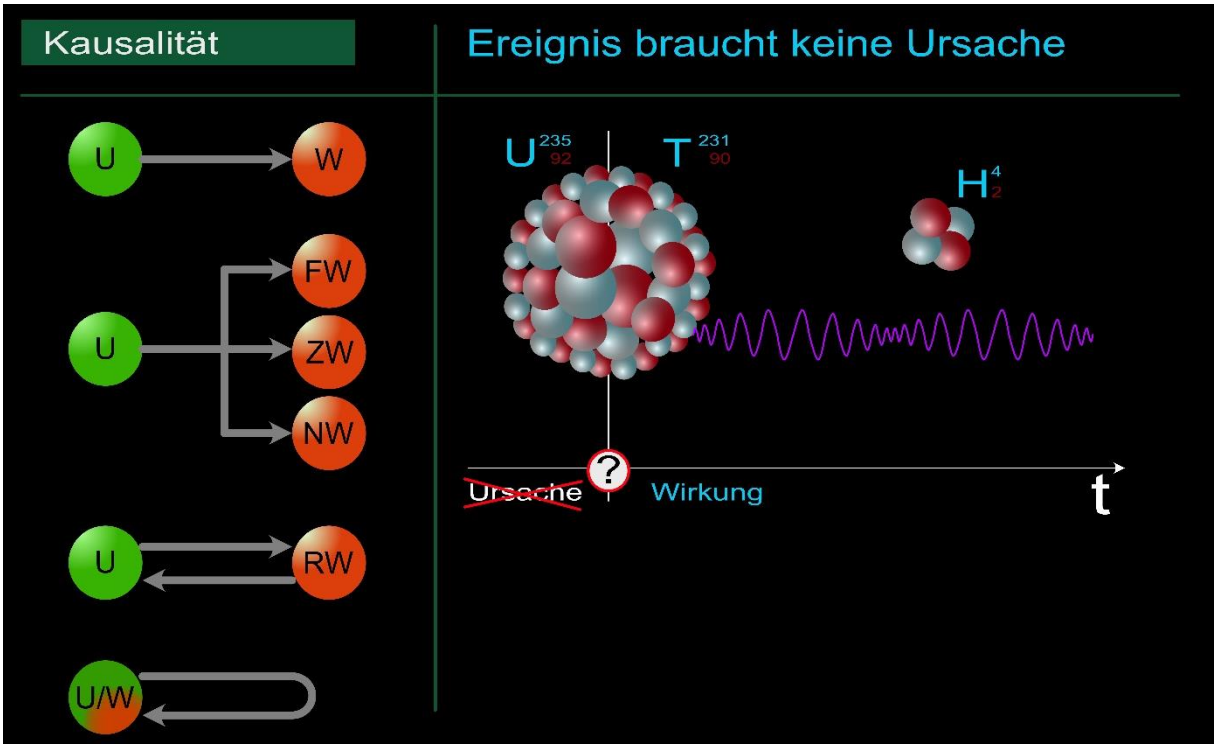

Abbildung 9 Ereignis ohne Ursache

Die **exponentielle Wirkung** bezieht sich auf eine Situation, in der eine kleine Veränderung in einem System zu einem signifikanten und unerwarteten Ergebnis führt. Die exponentielle Wirkung tritt auf, wenn der Effekt eines Ereignisses oder einer Veränderung im Laufe der Zeit verstärkt oder beschleunigt wird. Die exponentielle Wirkung kann sowohl positive als auch negative Auswirkungen haben. Eine

positive exponentielle Wirkung kann zu einem schnellen Wachstum und Fortschritt führen, während eine negative exponentielle Wirkung zu einer schnellen Verschlechterung oder Zusammenbruch führen kann.

Eine **zeitversetzte Wirkung** bezieht sich auf eine Verzögerung zwischen einer Ursache und ihrer Wirkung. Das bedeutet, dass der Effekt einer Handlung nicht unmittelbar eintritt, sondern erst zu einem späteren Zeitpunkt. Ein Beispiel für eine zeitversetzte Wirkung ist der Klimawandel. Die menschliche Aktivität verursacht die Emission von Treibhausgasen, die die Erderwärmung verursachen. Diese Erwärmung verursacht jedoch nicht unmittelbar dramatische Auswirkungen, sondern tritt allmählich über einen längeren Zeitraum auf. Die Auswirkungen des Klimawandels wie Meeresspiegelanstieg und verstärkte Wetterphänomene können daher erst Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte später spürbar werden.

Eine Nebenwirkung ist eine unerwünschte Wirkung, die als Ergebnis einer medizinischen Behandlung oder eines anderen Eingriffs auftritt. Eine Nebenwirkung kann auch als eine unerwartete oder unerwünschte Folge einer bestimmten Handlung oder eines bestimmten Ereignisses auftreten. Nebenwirkungen können auch in anderen Bereichen auftreten, wie z.B. in der Technologie oder der Umwelt. Beispielsweise können bestimmte Technologien oder Produkte unerwünschte Auswirkungen auf die Umwelt oder auf die Gesundheit von Menschen haben.

Fernwirkung bezieht sich auf die Übertragung von Energie oder Informationen über große Entfernungen, ohne dass ein direkter physikalischer Kontakt besteht. In der Physik gibt es verschiedene Arten von Fernwirkungen, wie z.B. die gravitative Fernwirkung, die elektromagnetische Fernwirkung und die quantenmechanische Fernwirkung. Die quantenmechanische Fernwirkung, auch bekannt als "spukhafte Fernwirkung", bezieht sich auf die Übertragung von Informationen oder Energie zwischen Teilchen, die sich aufgrund ihrer quantenmechanischen Eigenschaften in einer scheinbar nicht-lokalen Wechselwirkung befinden. Die quantenmechanische Fernwirkung ist ein Phänomen, das in der Quantenphysik beschrieben wird und noch nicht vollständig verstanden ist.

Rückkopplung bezieht sich auf den Prozess, bei dem ein Teil eines Systems eine Auswirkung auf einen anderen Teil des Systems hat und dadurch eine Veränderung im System hervorruft, die wiederum den ursprünglichen Teil des Systems beeinflusst. Rückkopplung tritt häufig in komplexen Systemen auf, in denen verschiedene Elemente miteinander interagieren. Das meistens dazu angeführte Beispiel ist die Rückkopplung eines Raumthermostates.

Ursache und Wirkung können eng **miteinander verbunden** sein, sodass es schwierig ist, zwischen den beiden zu unterscheiden. Einige Theorien, wie die Theorie der Relativität von Albert Einstein, haben gezeigt, dass das Konzept von Ursache und Wirkung in einigen Fällen relativ ist und von der Perspektive des Beobachters abhängt.

In der Quantenmechanik (Abbildung 9 rechts) gibt es Wirkungen die absolut ohne jede Ursache auftreten. Beispielsweise der radioaktive Zerfall. Der Zerfall von U-235 erfolgt durch den Prozess des Alpha- oder Betazerfalles. Beim Alphazerfall emittiert das U-235 ein Alphateilchen, das aus zwei Protonen und zwei Neutronen besteht, und wird dadurch zu einem Isotop eines anderen Elements. Beim Betazerfall gibt das U-235 ein Beta-Teilchen (ein Elektron oder Positron) ab und wird dadurch in ein Isotop eines anderen Elements (T231) umgewandelt. Die Halbwertszeit von U-235, d.h. die Zeit, die benötigt wird, um die Hälfte des ursprünglichen Materials zu zerfallen, beträgt etwa 703,8 Millionen Jahre. Das bedeutet, dass es etwa 4,5 Milliarden Jahre dauern würde, bis alle U-235-Atome in einem bestimmten Material zerfallen sind.

Die Quantenmechanik hat in den letzten Jahrzehnten viele Fortschritte gemacht und wird voraussichtlich auch in Zukunft weitere Entdeckungen und Anwendungen haben. Hier sind einige Ausblicke auf die Zukunft der Quantenmechanik:

1. **Quantencomputer**: Quantencomputer könnten eine revolutionäre Technologie sein, die bestimmte Berechnungen sehr viel schneller durchführen kann als herkömmliche Computer. Einige Unternehmen arbeiten bereits daran, leistungsstarke Quantencomputer zu entwickeln, und es wird erwartet, dass sie in Zukunft in vielen Bereichen eingesetzt werden, wie z.B. in der Kryptographie, der Materialforschung und der medizinischen Diagnostik.

2. **Quantenkommunikation**: Die Quantenmechanik bietet auch Möglichkeiten für sichere Kommunikationstechnologien, die auf der Quantenverschränkung basieren. Quantenverschlüsselungssysteme könnten die Sicherheit von elektronischen Übertragungen wie E-Mails, Banktransaktionen und Regierungskommunikation verbessern.

3. **Anwendungen in der Medizin**: Die Quantenmechanik könnte auch Anwendungen in der Medizin haben, wie z.B. bei der Entwicklung von leistungsfähigen Bildgebungstechnologien und der Entdeckung neuer Medikamente. Die Quantenmechanik könnte auch zur Diagnose von Krankheiten eingesetzt werden, wie z.B. der Alzheimer-Krankheit.

4. **Neue Entdeckungen**: Die Quantenmechanik könnte auch dazu beitragen, neue physikalische Phänomene und Eigenschaften zu entdecken, die bisher unbekannt waren. Durch die Erforschung der Quantenwelt könnten auch neue Erkenntnisse über die Natur der Realität gewonnen werden.

Insgesamt wird die Quantenmechanik voraussichtlich in vielen Bereichen der Wissenschaft und Technologie eine wichtige Rolle spielen und zu neuen Entdeckungen und Anwendungen führen.

10. Zusammenfassung

Anton Zeilinger, einer der führenden Forscher auf dem Gebiet der Quantenphysik und Quanteninformation, hat eine beeindruckende Karriere vorzuweisen. Mit seinem bahnbrechenden Beitrag zur Erforschung der Verschränkung hat er die Grundlagen der Quantenphysik erweitert. Seine Arbeit hat uns ermöglicht, die Verschränkung besser zu verstehen und ihre Anwendungen zu erforschen. Zeilinger hat gezeigt, dass die Verschränkung zwar auf den ersten Blick mysteriös erscheinen mag, jedoch keineswegs spukhaft ist.

Ein weiterer Meilenstein in Zeilingers Forschung ist seine Untersuchung der Messung quantenphysikalischer Phänomene. Trotz der Tatsache, dass Messungen scheinbar zufällige Werte ergeben, ist Zeilinger überzeugt, dass die zugrunde liegende Realität deterministisch ist. Diese Überzeugung hat er durch seine wegweisenden Experimente und Erkenntnisse gestützt.

Die Bedeutung von Zeilingers Arbeit wurde auch durch die Verleihung des Nobelpreises für Physik an ihn anerkannt. Diese prestigeträchtige Auszeichnung würdigt seinen Beitrag zur Quantenphysik und hat die Entwicklung von Quantencomputern vorangetrieben. Zeilinger hat maßgeblich dazu beigetragen, die Grundlagen für die Nutzung von Quantenphänomenen in der Informationsverarbeitung zu legen.

Zusätzlich zu seinen wissenschaftlichen Errungenschaften ist Zeilinger ein Befürworter der Idee, dass Information eine fundamentale Rolle im Universum spielt. Er unterstützt die Theorie der Information vor Materie (Information First), wie sie in der Integrated Information Theory (IIT) dargelegt wird. Diese Theorie versucht, das Phänomen des Bewusstseins anhand von informationsbezogenen Prinzipien zu erklären.

Anton Zeilinger ist zweifellos eine inspirierende Persönlichkeit auf dem Gebiet der Quantenphysik und Quanteninformation. Seine wegweisenden Erkenntnisse und sein unermüdlicher Einsatz haben die Grenzen unseres Verständnisses erweitert und die Entwicklung von Quantentechnologien vorangetrieben.

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1 Sieben Thesen 4
Abbildung 2 Schnittstellen Modell 6
Abbildung 3 Verzögerung 7
Abbildung 4 Informations Wahrscheinlichkeit 8
Abbildung 5 Information als Wirklichkeit 10
Abbildung 6 Zufall 11
Abbildung 7 Objekt Permanenz 13
Abbildung 8 Folge Zustand 14
Abbildung 9 Ereignis ohne Ursache 15