



# FESTVORTRAG

ANTON ZEILINGER

ER WÜRFELT DOCH –  
ZUFALL UND INFORMATION IN DER  
QUANTENWELT

---

Ehe wir die Zukunft der Quantenphysik besprechen, sei dem klassischen Weltbild, dem Weltbild der klassischen Physik, Reverenz erwiesen. Dies ist, würde ich meinen, auch das Weltbild unseres Alltagsverständnisses. Ein berühmtes paradigmatisches Beispiel für dieses Weltbild ist der Laplace'sche Dämon (1):

*Eine Intelligenz, die in einem gegebenen Augenblick alle Kräfte kennt, mit denen die Welt begabt ist, und die gegenwärtige Lage der Gebilde, die sie zusammensetzen, und die überdies umfassend genug wäre, diese Kenntnisse der Analyse zu unterwerfen, würde in der gleichen Formel die Bewegungen der größten Himmelskörper und die des leichtesten Atoms einbegreifen. Nichts wäre für sie ungewiß, Zukunft und Vergangenheit lägen klar vor ihren Augen.*

Wir haben also hier ein vollkommen deterministisches Weltbild, ein Weltbild, wie es etwa durch ein Uhrwerk repräsentiert werden könnte. Es hat wohl seine Urwurzel darin, daß die Astronomie als Mutter der modernen Physik angesehen werden kann. Dieses Weltbild wird gerne als schön bezeichnet. Ich empfinde es im Gegenteil

erschreckend, da es keine Freiheit zuläßt. Objektive Undeterminiertheit hat in diesem Bild keinen Platz.

Anders in der Quantenphysik. Diese begann 1900 hier in Berlin, in berühmten Experimenten in der damaligen Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Sie wurde auf Anregung von Werner von Siemens gegründet, und ihr erster Direktor war der Physiker Hermann von Helmholtz. Die Frage, die zur Quantenphysik führte, war die Erklärung der Strahlung des Hohlraumes. Man stelle sich einen Hohlraum vor, dessen Wände glühen. Nach einiger Zeit wird sich ein Gleichgewicht der Strahlung einstellen. Es wird also gleich viel Strahlung von den Wänden absorbiert wie wieder emittiert. Durch ein winziges Loch, das klein genug ist, daß es das Strahlungsgewicht nicht stört, kann Strahlung aus dem Hohlraum austreten und untersucht werden.

Es war damals bereits seit längerer Zeit bekannt, daß das Spektrum der Hohlraumstrahlung unabhängig von der Form, der physikalischen Beschaffenheit oder dem Material der Wände des Hohlraums ist. Das Spektrum hängt ausschließlich von der Temperatur der Wände ab, wie schon Gustav Kirchhoff 1859 erkannt hatte. Max Planck hatte zum Problem der Erklärung der Hohlraumstrahlung 1894 bemerkt (2):

*Diese ... stellt also etwas Absolutes dar, und da die Suche nach dem Absoluten mir stets als die schönste Forschungsaufgabe erschien, so machte ich mich mit Eifer an ihre Bearbeitung.*

Die entscheidenden Präzisionsexperimente wurden von Rubens und Kurlbaum hier in Berlin durchgeführt. Von Max Planck, der übrigens auch von 1930 bis 1951 Kanzler unseres Ordens Pour le mérite war, kam die Erklärung. Diese war, daß er zumindest für die Emission und Absorption des Lichts die Kontinuität der klassischen Physik aufgeben mußte. Wie er in seiner Rede zum Nobelpreis 1922 ausführte, mußte er sich zu einem *Akt der Verzweiflung* zwingen,

nämlich dem, die statistische Methode Boltzmanns auch für die Abzählung der Zustände des Strahlungsfeldes zuzulassen.

Der nächste wesentliche Schritt erfolgte durch Albert Einstein im Jahr 1905 in seinem berühmten *annus mirabilis*. In diesem Jahr stellte er ja auch seine Spezielle Relativitätstheorie vor, erklärte die Braun'sche Bewegung der Moleküle und entdeckte die berühmteste Gleichung der Physik,  $E=mc^2$ . Im März desselben Jahres veröffentlichte er die einzige Arbeit, von der bekannt ist, daß er sie selber – übrigens in einem Brief an seinen Freund Habicht – als »sehr revolutionär« bezeichnet hatte. Der Titel dieser Arbeit ist »Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt« (3). Aus einem Vergleich der Entropie des Strahlungsfeldes mit der Entropie des idealen Gases schlug Einstein vor, daß Licht genauso aus Teilchen besteht wie ein Gas. Diese Lichtteilchen werden heute als Photonen bezeichnet. Es ist wohlbekannt, daß Einstein dafür den Nobelpreis bekam, und nicht für die Relativitätstheorie.

Einsteins Idee von den Lichtquanten wurde lange Zeit nicht akzeptiert. Dazu ein Zitat aus dem Jahr 1913. Einstein wurde von Max Planck, Walther Nernst, Heinrich Rubens und Emil Warburg für die Mitgliedschaft in der Preußischen Akademie der Wissenschaften vorgeschlagen (4). In diesem Schreiben heißt es jedoch auch:

*Daß er in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z. B. in seiner Hypothese der Lichtquanten ,wird man ihm nicht allzu schwer anrechnen dürfen; denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, läßt sich auch in der exaktesten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.*

Und so ist es tatsächlich. Ohne Risiko läßt sich keine wirkliche Neuerung einführen, und Einsteins Risiko der Hypothese von Lichtquanten hat tatsächlich zu enormen Neuerungen geführt. Zu Neuerungen, die heute auch technologische Bedeutung haben (5). Es ist

übrigens sehr bemerkenswert, daß Einstein im Jahr 1922 den Nobelpreis des Jahres 1921 für die Lichtquantenhypothese erhielt. Zwischen der Ablehnung aus dem Jahr 1913 und der höchsten Anerkennung im Jahr 1922 liegen also wenige Jahre. Daß die allgemein verbreitete wissenschaftliche Ansicht in einer so grundlegenden Angelegenheit sich so schnell ändern kann, ist eine der Stärken der Naturwissenschaft.

Einstein selbst hatte bemerkt, daß diese Lichtteilchen sich auf eine fundamental völlig andere Weise verhalten, als es klassische Teilchen tun. Und hier kommen wir nun zur neuen Rolle des Zufalls. Albert Einstein drückte auf der Tagung der Deutschen Naturforscher und Ärzte in Salzburg im Jahr 1909 sein »*Unbehagen*«, wie er sagte, über die neue Natur des Zufalls in der Quantenphysik aus. In der klassischen Physik ist es eben so, daß man Laplace folgend für jedes Ereignis eine Kausalkette zumindest denken kann. Eine solche Kausalkette, auch wenn sie uns im Detail nicht bekannt ist und vielleicht nicht einmal bestimmbar ist, steht nicht im Widerspruch zu den Gesetzen der klassischen Physik. Im Gegensatz dazu ist es in der Quantenphysik so, daß für das Einzelereignis im Allgemeinen keine solche Kausalkette konstruiert werden kann. Die Annahme einer Kausalkette, die uns vielleicht nur unbekannt ist, führt in gewissen Fällen zu Widersprüchen. Berühmt ist ja Einsteins Zitat aus einem Brief an Max Born vom 4. Dezember 1926 (6): »*Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der Alte nicht würfelt*« Nach einem solchen Bild darf es in der Welt nichts geben, was nicht wenigstens im Prinzip kausal erklärbar ist. Es darf den reinen Zufall nicht geben.

Ein berühmtes Beispiel für den reinen Zufall ist der sogenannte Quantensprung. In einem Atom kann ein Elektron durch Aufnahme von Energie in eine höhere Bahn gehoben werden. Nach einiger Zeit wird das Elektron spontan wieder zurückfallen auf die niedrigere Bahn. Dieser Übergang ist ein Quantensprung. Das Wesentliche ist, daß der Zeitpunkt, wann dieser Übergang genau stattfindet, zufällig ist. Dafür gibt es keine kausale Erklärung, nur für den Mit-

telwert vieler solcher Übergänge. Genau hier setzt Einsteins Kritik an.

*Der Gedanke, daß ein Elektron aus freiem Entschluß den Augenblick wählt, in dem es fortspringen will, ist mir unerträglich. Wenn schon, dann möchte ich lieber Schuster oder gar Angestellter in einer Spielbank sein als Physiker. (7)*

Das Letztere wäre er in übertragenem Sinn heute. Warum könnte er heute Angestellter in einer Spielbank sein? Wir besitzen heute Quantenzufallszahlengeneratoren, die zum Teil sogar in Spielautomaten eingesetzt werden.

Überlegen wir uns nun ein Beispiel, wie man sich den quantenmechanischen Zufall etwas genauer vorstellen kann. Eine schwache Lichtquelle sendet Licht aus. Schwach stellen wir sie uns deshalb vor, weil wir dann die einzelnen Lichtteilchen, die einzelnen Photonen, getrennt betrachten können. Dieser aus Photonen bestehende Lichtstrahl trifft nun auf einen sogenannten halbreflektierenden Spiegel. Ein solcher Spiegel läßt die Hälfte des Lichts durchtreten, die andere Hälfte wird reflektiert. Was wird jedoch ein einzelnes Teilchen tun? Wir sagen in der Quantenphysik, daß es dafür, ob ein einzelnes Teilchen reflektiert wird oder durch den Spiegel durchtritt, keinerlei kausale Erklärung gibt, keine Ursache für das Einzelereignis, sondern hier herrscht der reine Zufall. Wenn wir jedoch viele Teilchen auf den Spiegel senden, werden etwa 50 % reflektiert und 50 % durch treten, natürlich mit einer gewissen statistischen Streuung.

Die einzelnen Teilchen werden nun in je einem Detektor nachgewiesen. Wir ordnen der Messung im reflektierten Strahl nun den Bitwert »0« zu und dem Meßwert im durchtretenden Strahl den Bitwert »1«. Wenn wir also viele Teilchen auf den Spiegel senden und messen, bekommen wir Zufallszahlenfolgen. Diese Folgen von Zufallszahlen sind nach allem, was derzeit bekannt ist, die besten Zu-

fallszahlenfolgen, die man produzieren kann. Sie sind besser als alle rein mathematisch hergestellten Zufallszahlenfolgen. Es ist eine Vermutung, daß die einzigen wirklichen Zufallszahlenfolgen nur durch quantenmechanische Prozesse erzeugt werden können.

Analysieren wir die Situation jedoch etwas genauer. Wir wissen ja erst nachdem das Teilchen entweder in dem einen oder in dem anderen Detektor registriert wurde, ob es reflektiert wurde oder durchgetreten ist. Das heißt, erst dann ist eine Aussage darüber möglich. Die Quantenphysik trägt dieser Tatsache Rechnung. Sie sagt, daß nach der Wechselwirkung mit dem halbreflektierenden Spiegel, jedoch vor der Messung, das Lichtteilchen in einer Überlagerung, einer Superposition von »durchgetreten« und »reflektiert« ist. Oder, mathematisch ausgedrückt, stellt man das durch die Superposition  $|\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + |1\rangle$  dar. Nach der Messung wird einer der beiden Werte, 0 oder 1, tatsächlich registriert, je nachdem, welcher Detektor das Teilchen mißt. Dieser quantenmechanische Zustand des Photons ändert sich also durch die Messung spontan und instantan. Nach der Messung ist er entweder  $|0\rangle$  oder  $|1\rangle$ , je nach dem zufällig ansprechenden Detektor. Die Erklärung dieses Meßvorgangs ist außerhalb der Quantenphysik.

Die Superposition, die wir eben hingeschrieben haben, stellt ein Qubit dar, ein Quantenbit, die Verallgemeinerung des klassischen Bits. Ein Qubit kann also in einer gewissen Weise gleichzeitig 0 und 1 einnehmen. Das oben dargestellte Qubit sagt, daß bei einer Messung jeder der beiden Werte mit 50 % Wahrscheinlichkeit auftreten wird. Es sind natürlich auch Qubits mit anderen Wahrscheinlichkeiten möglich. Die Superposition ist einer der wesentlichen Gründe, warum wir sagen, daß ein Quantenbit mehr an Information tragen kann als ein klassisches Bit. Dies ist ein wesentlicher Grund, warum wir bei Verwendung von Qubits anstatt klassischen Bits in Quanteninformationssystemen von einer Quanteninformationstechnologie sprechen können, die völlig neue Methoden der Informationsverarbeitung und Informationsübertragung verspricht.



Überlegen wir uns noch einmal die Superposition nach dem Strahlteiler. Das Teilchen befindet sich also in einer Überlagerung von 0 und 1. Welcher von beiden Detektoren ansprechen wird, ist reiner Zufall. Es kann auch nur einer von beiden ansprechen, denn Quanten sind unteilbar. Ich habe vorgeschlagen (8), daß der reine Zufall deshalb auftritt, weil das System nur endlich viel Information tragen kann und daher bei Messungen, die an das Qubit Fragen stellen, für die es nicht die Information trägt, das Ergebnis nur zufällig sein kann. Das Interessante ist, daß wir wahrscheinlich, so wie wir derzeit annehmen, in der Physik nie werden erklären können, warum ein ganz bestimmtes Lichtteilchen gerade in dem einen Ausgangsstrahl registriert wird und nicht in dem anderen.

Nun noch eine kurze Argumentation, warum wir sagen, daß das Teilchen nach der Wechselwirkung mit dem halbreflektierenden Spiegel in einer Überlagerung von 0 oder 1 ist. Der Grund ist ganz einfach. Wir können nämlich die beiden Strahlen wieder zusammenbringen und an einem weiteren 50/50 Spiegel überlagern. Dann wird man feststellen, daß die beiden Strahlen miteinander interferieren. Hinter diesem zweiten Strahlteiler werden bei richtiger Vorgangsweise die Lichtteilchen nur bei einem der beiden Strahlen herauskommen und nicht beim anderen. Blockieren wir jedoch einen der beiden Strahlen zwischen den Strahlteilern, so haben sie wieder eine 50/50 Chance, hinter dem zweiten in jedem der beiden Strahlen aufzutreten. Das heißt, der Quantenzustand des Teilchens hinter dem zweiten Strahlteiler hat Information darüber, ob beide Teilstrahlen hinter dem ersten Strahlteiler offen waren oder nicht. Wenn nur ein Teilstrahl offen war, wenn wir also annehmen können, daß das Teilchen einen bestimmten Weg verfolgt hatte, dann kann es bei beiden Ausgangsstrahlen auftreten. Der Zustand kann also nur der einer Superposition sein. Man sagt, daß diese Überlagerung der beiden Teilstrahlen dann geschieht, wenn keinerlei Information existiert, irgendwo im Universum darüber, welchen Weg das Teilchen genommen hat. Genau solche Überlegungen sind wichtig für den Quantencomputer.

Ich möchte nun kurz der Diskussion von Werner Heisenberg folgen. Werner Heisenberg war auch Träger des Ordens Pour le mérite, und es ist ein großes Privileg und eine große Freude, daß ich das Ordenszeichen tragen darf, das auf der Rückseite den Namen »Werner Heisenberg« eingraviert trägt. Die Ordenszeichen werden nämlich von Generation zu Generation weitergegeben. Mit entsprechender Freude und mit Respekt möchte ich jetzt die Analyse des Zufalls durch Heisenberg diskutieren.

Heisenberg spricht von einem subjektiven Zufall gegenüber einem objektiven Zufall. Der subjektive Zufall ist der Zufall, der dadurch auftritt, daß wir nicht genug über das System wissen. Zum Beispiel, wenn wir einen Würfel werfen, welche Zahl der Würfel zeigen wird. Dennoch können wir annehmen, und es ist im Einklang mit den physikalischen Gesetzen, daß für das einzelne Ereignis immer eine kausale Erklärung möglich ist. Dies ist die Alltagswelt, in der wir leben, und diese ist eine abgeschlossene Welt. Sie ist eine Welt, in der eigentlich nichts Neues geschehen kann, wenn jedes Ereignis durch eine Ursache hervorgerufen wurde, diese Ursache wieder durch eine Ursache und immer so weiter, in einer eindeutigen Kausalkette.

Im Gegensatz dazu, nach Heisenberg, können wir den objektiven Zufall nennen. Eben beispielsweise in denjenigen Fällen, die ich erwähnt habe, dem Quantensprung und dem Verhalten eines Lichtteilchens an einem halbreflektierenden Spiegel. Beim objektiven Zufall haben wir es mit einem Unwissen der Natur zu tun, wenn man das so nennen darf. Auch die Natur weiß nicht, welches Ergebnis herauskommen wird. Auch die Natur weiß nicht, wann der Quantensprung stattfinden wird oder in welchem Strahl ein einzelnes Teilchen nach einem Strahlteiler gefunden wird. Wir haben keine Kausalität für einzelne Ereignisse mehr. Nur noch für Ensembles. Dies tritt nur in der Quantenwelt auf. Es resultiert eine offene Welt. Laplaces Aussage, daß sein Dämon, diese überragende Intelligenz, Zukunft und Vergangenheit klar vor Augen haben würde, weil er die Gegenwart kennt, ist nicht mehr zulässig. Das

einzelne quantenmechanische Meßergebnis ist ja rein zufällig. Eine Kausalkette für sukzessive Messungen läßt sich nicht mehr konstruieren. Den nächsten entscheidenden Schritt, was die neue Natur des Zufalls betrifft, machte Einstein gemeinsam mit seinen Kollegen Boris Podolsky und Nathan Rosen im Jahr 1935 (9). In ihrer Arbeit beschrieben sie zwei Systeme, die miteinander in Wechselwirkung treten und sich dann auseinanderbewegen. Eine spätere Messung, eine Beobachtung an einem der beiden Systeme, ändert dann den Zustand des anderen Systems, ganz egal, wie weit die beiden voneinander entfernt sind. Dieser Effekt tritt ohne Zeitverzögerung auf, also auch nicht durch die Lichtgeschwindigkeit beschränkt. Obwohl Einstein mit seinen jungen Kollegen diese theoretische Entdeckung machte, wollte er sie im Grunde nicht wahrhaben. In einem Brief an Max Born schrieb er am 3. Dezember 1947 (10), daß es solche »spukhaften Fernwirkungen«, wie er sie nannte, eigentlich nicht geben dürfe.

Die Einstein-Podolsky-Rosen Arbeit wurde über viele Jahre hinweg im Wesentlichen ignoriert. Sie galt als rein philosophische Spekulation und als eigentlich uninteressant. Erst in den 60er Jahren wurde der wissenschaftlichen Welt langsam bewußt, daß in der Arbeit eben doch wesentliche Erkenntnisse über die Beschaffenheit der Welt steckten. Und in den 2000er Jahren explodierte die Zahl der Zitationen. Man entdeckte, daß die der Arbeit zugrundeliegenden Konzepte wichtig für eine neue Informationstechnologie sind.

In den 60er Jahren machte der irische Physiker John Bell eine Entdeckung, die unsere Sicht der Grundlagen der Quantenphysik erneut revolutionierte. Das nach ihm benannte Bellsche Theorem beschreibt Folgendes: Eine Quelle sendet zwei Lichtteilchen aus. Wir messen die Polarisation dieser Photonen, also die Schwingung ihrer elektrischen Felder, die entweder horizontal oder vertikal sein kann. Nun stellen wir fest, daß, für eine bestimmte Art von Quelle, immer beide Photonen entweder horizontal oder vertikal polarisiert sind. Dies stimmt mit der Situation überein, die Einstein 1935 diskutiert

hatte. John Bell traf nun die theoretische Annahme, daß diese Eigenschaften bereits bei der Geburt der Teilchen lokal festgelegt sind. Es ist das Weltbild des sogenannten lokalen Realismus. John Bell entdeckte einen Widerspruch für Vorhersagen für gewisse Experimente zwischen dem lokalen Realismus und der Quantenphysik. Viele Experimente bestätigten seither die Vorhersagen der Quantenphysik und lieferten Resultate im Konflikt mit der Sichtweise des lokalen Realismus. Die Photonen können also ihre Polarisation noch nicht vor der Messung gehabt haben. Beide Teilchen nehmen ihre identische Polarisation erst in dem Moment an, in dem eines von beiden gemessen wird, dessen Messung ein zufälliges Resultat ergibt. Wir haben also den gleichen Zufall für räumlich beliebig weit getrennte Systeme.

Erwin Schrödinger, auch Träger des Ordens Pour le mérite, brachte die Sache letztendlich auf den Punkt, als er den Begriff der *Verschränkung* einführte. Nach ihm ist dieses Phänomen das wesentliche Charakteristikum der Quantenphysik. Ich möchte es mit dem Bild zweier Quantenwürfel erklären. Diese Würfel, die es natürlich heute noch nicht gibt, seien miteinander verschränkt. Wenn sie geworfen werden, zeigen beide immer die gleiche Zahl, bei jedem Wurf aber eine zufällige. Wie ist das möglich? Gibt es eine verborgene Ursache, oder kommunizieren die beiden Würfel irgendwie miteinander? Beides können wir heute durch Experimente ausschließen. Wir müssen also diesen nichtlokalen Zufall als ein Grundphänomen der Welt betrachten.

Wenn nun die beiden Würfel, die beiden Systeme, wirklich ohne Zeitverzögerung immer das gleiche Resultat liefern, so müßte es doch möglich sein, mit Hilfe dieses Effektes Information zu übertragen. Können wir die von Einstein entdeckte Maximalgeschwindigkeit für Informationsübertragung, die Lichtgeschwindigkeit, so überwinden? Dies ist genau deshalb nicht möglich, weil das Resultat auf jeder Seite rein zufällig ist und das einzelne Meßergebnis nicht beeinflußt werden kann. Eine spannende Situation: Einstein meinte

ja, daß Gott nicht würfelt. Die Existenz des Zufalls verhindert jedoch, daß das Phänomen der Verschränkung, diese spukhafte Fernwirkung, die Einstein auch nicht akzeptierte, in Konflikt mit seiner Relativitätstheorie steht. Dazu Einsteins Reaktion zu hören, das wäre wirklich sehr interessant. Leider konnte er diese Diskussion nicht mehr führen.

Obwohl wir die Verschränkung nicht direkt zur Informationsübertragung nutzen können, gibt es zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten. Dahingehende Experimente begannen in den 1970er Jahren. Diese Experimente haben auch das Tor für neue Kommunikationstechnologien geöffnet. Eine davon ist die sogenannte Quantenteleportation (11) (12). Mit ihrer Hilfe kann der Zustand eines Teilchens, also all seine Eigenschaften, auf ein anderes, im Prinzip beliebig weit entferntes Teilchen übertragen werden. Und zwar so, daß das neue Teilchen mit dem Original identisch wird. Dabei verliert jedoch das Original seine Eigenschaften. Wenn ich nun ein Teilchen teleportiere, so hat das teleportierte Teilchen alle Eigenschaften des Originals, allerdings nach dem Zufallsprinzip verschlüsselt. Zusätzlich ist ein »klassisches« Signal notwendig, das mit Lichtgeschwindigkeit übertragen wird, um endgültig den korrekt teleportierten Zustand herzustellen. Auch hier wird Einsteins Relativitätstheorie aus dem- selben Grund wie oben nicht verletzt: der Zufall ist nicht reduzier- bar, nicht beseitigbar.

Seit den ersten Experimenten in den 70er Jahren hat sich einiges getan. Derzeit ist ein Ziel, zu zeigen, daß diese Informationsübertragung, die für künftige Quantencomputer wichtig wäre, auch auf einer weltweiten Skala funktioniert. Dazu führt meine Gruppe seit einigen Jahren Experimente zwischen den Kanarischen Inseln La Palma und Teneriffa durch. Auf diesen beiden Inseln befinden sich Cluster von Teleskopen, die sogenannte europäische Nordsternwarte. Wir dürfen diese Infrastruktur nutzen, um Quantenkommunikationsexperimente durchzuführen, von einer Insel zur anderen. Der nächste Schritt ist, Quantenkommunikationssysteme auf Satelliten

zu installieren, um den Grundbaustein für ein globales Quantenkommunikationsnetzwerk zu legen. Eine solche Technologie wäre wegen des quantenmechanischen Zufalls besonders sicher, aber auch besonders effizient, da wir pro Bit an Information im Grunde nur ein einziges Lichtteilchen, ein einziges Photon benötigen. Eine effizientere Informationsübertragung ist kaum möglich. Derzeit arbeitet meine Gruppe in Wien gemeinsam mit der Chinesischen Akademie der Wissenschaften an einem Satellitenprojekt. Wir hoffen in zwei, vielleicht drei Jahren zum ersten Mal zeigen zu können, daß Quantenkommunikation auf weltweiter Skala funktioniert. Eine konkrete Anwendung ist die Quantenkryptographie.

Wenn wir heute über Datensicherheit sprechen, denken wir auch an Situationen, wo ein zentraler Server ein Problem für einen Kunden ausrechnen soll. Der Kunde möchte, daß nicht nur die Daten, die er eingibt, und das Ergebnis nur ihm selbst zugänglich sind sondern auch die Information darüber, welche Art Fragestellung der Kunde bearbeitet. Wenn nun nicht einmal der Betreiber des Servers irgendeine Möglichkeit hätte, herauszufinden, welches Problem sein Computer gerade bearbeitet, dann wäre dies ein unglaublich großer Vorteil, egal, ob es sich um Börsenkurse oder um Spiele handelt.

Es gelang kürzlich zu zeigen, daß der Quantencomputer, der ja unter Zuhilfenahme von Superposition, Verschränkung und auch dem Zufall funktioniert, genau diese Möglichkeit bietet. Keine andere Technologie läßt dies zu. Da der Kunde dem Server die Daten und auch das Programm im Wesentlichen als Quantenbits schickt, die ja die Eigenschaft haben, daß jede Messung, jede Beobachtung ihren Wert und damit die von ihnen getragene Information zerstört, ist die Prozedur sicher. Die Idee stammt aus dem Jahr 2009 (13), und eine erste Demonstration gelang im Jahr 2012 in Wien (14).

Eine weitere futuristische Idee betrifft die Teleportation von Information in die Vergangenheit. Nehmen wir an, wir erhalten eine bestimmte Information, beispielsweise Börsenkurse, zu einem be-

stimmten Zeitpunkt, und wollen möglichst schnell das Resultat einer Kalkulation mit diesem Input wissen. Wenn selbst der schnellste Quantencomputer dafür mehr Zeit benötigt, als wir zur Verfügung haben, haben wir ein Problem. Die Lösung ist, den Input in die Vergangenheit zu teleportieren, und zwar zum Input eines Quantencomputers, der seine Kalkulation bereits zu einem früheren Zeitpunkt startet als der Input vorliegt. Da der Quantencomputer auf diese Weise in der Vergangenheit rechnet, erhalten wir das Ergebnis in dem Moment, wo der Input tatsächlich vorliegt. Der Quantencomputer startet gewissermaßen aufgrund dieser Verschränkung mit einem Wert, der noch nicht feststeht. Weil wegen des Zufalls der Empfänger in der Vergangenheit nicht weiß, was die Nachricht bedeutet, bleibt die Gültigkeit von Einsteins Relativitätstheorie auch hier wieder gewahrt. Erst wenn die Nachricht in der Gegenwart ankommt, wird das Resultat als Information interpretierbar.

Zuletzt möchte ich Ihnen einige Gedanken zum Zusammenhang zwischen Zufall und Wirklichkeit nahebringen. Der Zufall des Einzelereignisses, wie wir ihn diskutiert haben, ist meiner Meinung nach unser stärkster Nachweis für die Existenz einer unabhängig von uns existierenden Welt. Und zwar deshalb, weil der Zufall außerhalb unserer Kontrolle liegt. Er beschränkt unsere Möglichkeiten, die Welt zu kontrollieren.

In manchen Interpretationen wird behauptet, daß nach der Quantenphysik die Beobachtung die Wirklichkeit festlegt. Das trifft jedoch so nicht zu. Unsere Kontrolle der Welt beschränkt sich auf die Wahl des Meßapparates. Die Antwort der Natur, das Meßergebnis, ist jedoch frei, ist zufällig. Es gibt hier also interessanterweise zwei Arten von Freiheit, einerseits die Freiheit des Beobachters in der Wahl des Meßapparats und andererseits die Freiheit der Natur in der Antwort.

Ich komme zum Ende, mit einem schönen Zitat von Anatole France:

*Der Zufall ist vielleicht das Pseudonym Gottes, wenn er nicht unterschreiben will.*

Da wir ein preußischer Orden sind, darf ich auch noch Friedrich den Großen, den Gründer des Ordens Pour le mérite, zitieren:

*Je mehr man altert, desto mehr überzeugt man sich, daß Seine Heilige Majestät der Zufall gut  $\frac{3}{4}$  der Geschäfte dieses miserablen Universums besorgt.*

Meine Überzeugung, und die vieler Physiker, ist: Gott würfelt doch. Einem on dit zufolge sagte das auch Niels Bohr, wenn er Einstein antwortete:

*Hören Sie doch endlich auf, dem Herrgott Vorschriften zu machen.*

### *Literatur*

- (1) Laplace, Pierre Simon. *Essai philosophique sur les probabilités*. Paris: Bachelier, 1840.
- (2) Planck, Max. Wissenschaftliche Selbstbiographie. (Hg.) Hans Roos und Armin Hermann. *Max Planck. Vorträge, Reden, Erinnerungen*. Heidelberg: Springer, 2001, S. 64.
- (3) Einstein, Albert. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*. 1905, Bd. 322, 6, S. 132-148.
- (4) Planck, Max, et al. Brief an die Preußische Akademie der Wissenschaften. *Archiv der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, Bestand Preußische Akademie der Wissenschaften*. 1913. Bde. II-III-36, Bl. 36-37.
- (5) Zeilinger, Anton. Vom Bohr-Einstein-Dialog zur Quanteninformation. *Orden Pour le mérite für Wissenschaften und Künste. Reden und Gedenkworte. Vierzigster Band 2011-2012*. Göttingen: Wallstein, 2013, Bd. 40, S. 199.
- (6) Einstein, Albert. Brief an Max Born. (Buchverf.) Alice Calaprice. *Einstein-Archiv*. München: Piper, 1996, S. 143.
- (7) –. Brief an Max Born. (Buchverf.) Albert Einstein und Max Born. *Albert Einstein und Max Born, Briefwechsel*. Reinbek: Rowohlt, 1969, S. 67.



- (8) Zeilinger, Anton. A Foundational Principle for Quantum Mechanics. *Foundations of Physics*. 1999, Bd. 29, 4, S. 631-643.
- (9) Einstein, A., Podolsky, B. und Rosen, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Phys. Rev.* 1935, Bd. 47, S. 777.
- (10) Einstein, Albert. Brief an Max Born. (Buchverf.) Albert Einstein und Max Born. *Albert Einstein, Max Born. Briefwechsel 1916-1955*. München: Nymphenburger, 1955, S. 210.
- (11) Bennett, Charles H., et al. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. *Phys. Rev. Lett.* 1993, Bd. 70, S. 1895-1899.
- (12) D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter & A. Zeilinger. Experimental quantum teleportation. *Nature*. 390, 1997, S. 575-579.
- (13) Broadbent, Anne, Fitzsimons, Joseph und Kashefi, Elham. Universal blind quantum computation. *Proceedings of the 50th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS 2009)*. 2009, S. 517-526. arXiv: 0807.4154 [quant-ph].
- (14) Barz, Stefanie, et al. Demonstration of Blind Quantum Computing. *Science*. 2012, Bd. 335, 6066, S. 303-308.