

SÜDWESTRUNDFUNK
SWR2 AULA – Manuskriptdienst
(Abschrift eines frei gesprochenen Vortrags)

Die zweite Quantenrevolution
Wie Physiker über die Wirklichkeit, den Zufall und die Zukunft denken

Autor und Sprecher: Professor Anton Zeilinger *
Redaktion: Gabor Paal
Sendung: Sonntag, 12. Mai 2013, 8.30 Uhr, SWR 2

Bitte beachten Sie:

Das Manuskript ist ausschließlich zum persönlichen, privaten Gebrauch bestimmt. Jede weitere Vervielfältigung und Verbreitung bedarf der ausdrücklichen Genehmigung des Urhebers bzw. des SWR.

Mitschnitte auf CD von allen Sendungen der Redaktion SWR2 Wissen/Aula (Montag bis Sonntag 8.30 bis 9.00 Uhr) sind beim SWR Mitschnittdienst in Baden-Baden für 12,50 € erhältlich.

Bestellmöglichkeiten: 07221/929-26030

Kennen Sie schon das neue Serviceangebot des Kulturradios SWR2?

Mit der kostenlosen SWR2 Kulturkarte können Sie zu ermäßigten Eintrittspreisen Veranstaltungen des SWR2 und seiner vielen Kulturpartner im Sendegebiet besuchen. Mit dem Infoheft SWR2 Kulturservice sind Sie stets über SWR2 und die zahlreichen Veranstaltungen im SWR2-Kulturpartner-Netz informiert. Jetzt anmelden unter 07221/300 200 oder swr2.de

SWR2 Wissen/Aula können Sie auch als Live-Stream hören im SWR2 Webradio unter www.swr2.de oder als Podcast nachhören: <http://www1.swr.de/podcast/xml/swr2/wissen.xml>

Manuskripte für E-Book-Reader

E-Books, digitale Bücher, sind derzeit voll im Trend. Ab sofort gibt es auch die Manuskripte von SWR2 Wissen/Aula als E-Books für mobile Endgeräte im sogenannten EPUB-Format. Sie benötigen ein geeignetes Endgerät und eine entsprechende "App" oder Software zum Lesen der Dokumente. Für das iPhone oder das iPad gibt es z.B. die kostenlose App "iBooks", für die Android-Plattform den in der Basisversion kostenlosen Moon-Reader. Für Webbrowser wie z.B. Firefox gibt es auch Addons oder Plugins zum Betrachten von E-Books. <http://www1.swr.de/epub/swr2/wissen.xml>

Ansage:

Vor mehr als hundert Jahren haben Physiker angefangen zu entdecken, dass die Welt "gequantelt" ist. Seitdem hat die Quantenphysik allerlei Phänomene entdeckt, die dem gesunden Menschenverstand widersprechen: Dass das Licht sich sowohl wie eine Welle als auch wie ein Teilchen verhalten kann, dass Teilchen immer "unscharf" sind und dass sie sich in vielen Zustände gleichzeitig befinden können. Oder dass Teilchen in entlegensten Gebieten der Welt auf spukhafte Art miteinander verknüpft sein können. Lange hatten diese Fragen nur eine naturphilosophische Bedeutung. Doch diese Phänomene werden vermutlich die Grundlagen künftiger Techniken sein. Dazu gehören der Quantencomputer ebenso wie die Quantenteleportation, die dem „Beamern“ in Science-Fiction-Filmen ähnelt.

Der Wiener Quantenphysiker Anton Zeilinger hat für seine aufsehenerregenden Experimente zur Quantenphysik zahlreiche Preise bekommen, darunter die Isaac-Newton-Medaille des britischen *Institute of Physics*. Er ist zugleich Präsident der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Titel seines Vortrags: Die zweite Quantenrevolution – Wie Physiker über die Wirklichkeit, den Zufall und die Zukunft denken.

Anton Zeilinger:

Die Quantenphysik begann auf eine ganz unerwartete Weise: Ende des 19. Jahrhunderts war eine der großen offenen Fragen, wie die Farbe glühender Körper zu verstehen ist. Man wusste, dass die Beantwortung dieser Fragen nicht im Rahmen der damals bekannten Physik, die man heute die „klassische Physik“ nennt, möglich wäre. Die Lösung fand der Max Planck in Berlin. Er erklärte die Farbe glühender Körper, genauer ausgedrückt: das Spektrum des Lichts, das aus einer Quelle emittiert wird, dadurch, dass das Licht nur in kleinsten Teilchen ausgetauscht werden kann. Die Energie wird also nur in Klumpen ausgetauscht, und nicht in beliebig feiner Einteilung. Damit konnte Max Planck mathematisch das Spektrum erklären, er hat seine Idee jedoch selbst nicht wirklich ernst genommen. Der erste, der die Quantenhypothese wirklich ernst nahm, war Albert Einstein. Er schlug 1905 vor – er war damals ein Sachbearbeiter dritter Klasse am Eidgenössischen Patentamt in Bern – dass Licht aus Energiequanten besteht, die man heute Lichtteilchen – Photonen nennt.

Das war eine Revolution des Denkens. Einstein selbst bezeichnete diese Arbeit, in der er diese Lichtteilchen vorschlug, als revolutionär. Es war seine einzige Veröffentlichung, von der er sagte, dass sie revolutionär war. Er hat für diese Arbeit übrigens auch den Nobelpreis bekommen und nie für die Relativitätstheorie, weil die Relativitätstheorie damals doch etwas gewagt war und noch nicht genügend experimentell fundiert. Albert Einstein hat auch sofort realisiert, dass die Quantenphysik es schwer macht, verschiedene Phänomene anschaulich zu verstehen. Zum einen sah er, dass es Schwierigkeiten gibt, das so genannte Doppelspalt-Experiment zu verstehen. Das ist im Prinzip sehr einfach: Ich sende Licht durch zwei Spalten, zwei Öffnungen und beobachte auf einem Interferenzschirm dahinter helle und dunkle Streifen. Diese Streifen sind leicht verstehbar, wenn man weiß, dass Licht eine Welle ist. Dann kommt es hinter dem

Spalt zu einer „Überlagerung“ von Wellen. Man nennt das „Interferenz“. Wenn Licht jedoch ein Teilchen ist, sollte es nur durch einen der Spalte gehen, auch wenn der andere ebenfalls offen ist. Einstein sagte deshalb voraus, dass für schwache Lichtintensitäten, also für einzelne Teilchen diese Interferenzstreifen nicht auftreten.

Hier lag Einstein falsch. Heute wissen wir, dass ein Teilchen sozusagen durch zwei Spalte gleichzeitig gehen kann. Einstein lag aber richtig, indem er den Finger darauf legte, wo die wirklich offenen Fragen liegen. Diese Fragen wurden damals noch spannender, nachdem die Quantentheorie damals völlig ausformuliert war als mathematische Theorie – 1925 durch Werner Heisenberg und 1926 durch Erwin Schrödinger.

Unmittelbar nach Formulierung dieser Theorie kam es zu dem, was man heute die erste Quantenrevolution nennt. Aufgrund dieser physikalischen Gesetze war es plötzlich möglich, eine Vielzahl von verschiedenen Phänomenen genau zu verstehen, zum Beispiel die Farbe glühender Körper, die Farbe des Lichts, das von Atomen ausgesendet wird. Es war möglich zu verstehen, was Magnetismus ist, man konnte auch verstehen, was Festkörper machen bei verschiedensten Temperaturen und das hat zur Halbleiterphysik geführt, zu den modernen Computern usw. Eine weitere Konsequenz der Quantenphysik war später die Erfindung des Lasers, die eine unmittelbare Anwendung dieser Grundideen ist.

Das Wesentliche dabei ist, dass in dieser ersten Quantenrevolution bestimmte Phänomene auftreten, weil viele Teilchen gleichzeitig vorhanden sind. Auf der anderen Seite hat man aber damals bereits gesehen, dass das Verhalten einzelner Teilchen Eigenschaften zeigt, die unserer Intuition widersprechen. Einen Fall hatte ich schon erwähnt: einzelne Teilchen im Doppelspalt-Experiment. Es gab auch andere Vorhersagen, z. B. die Tatsache, dass das Verhalten einzelner Teilchen auf eine Weise zufällig ist, die nicht reproduzierbar ist. Was meint man damit? Wenn ich mir ein radioaktives Atom ansehe, wird es nach einer gewissen Zeit zerfallen. Dieser Zerfall wird durch die Halbwertszeit beschrieben. Das heißt, nach der Halbwertszeit werden die Hälfte der Atome einer größeren Probe zerfallen sein, die andere Hälfte nicht. Was macht aber das einzelne Atom? Es wird irgendwann zerfallen; aber der Zeitpunkt des Zerfalls ist rein zufällig. Und zwar zufällig auf eine Weise, dass wir nur nicht wissen, warum das Atom zu diesem Zeitpunkt zerfällt. Es gibt dafür keine Erklärung.

Das ist eine neue Rolle des Zufalls, die Werner Heisenberg als „objektiven Zufall“ bezeichnet – im Gegensatz zum subjektiven Zufall, wo wir einfach nur nicht genug wissen würden. Dieser Zufall ist etwas, das Einstein gestört hat. Er hat 1926 in einem Brief geschrieben, er ist überzeugt, dass Gott nicht würfelt. In meinen Augen ist das eine der wichtigsten Erkenntnisse der Physik im 20. Jahrhundert, dass es diesen reinen Zufall gibt, dass es also einzelne Ereignisse gibt, die man nicht mehr nach dem Ursache-/Wirkungsprinzip erklären kann. Ich möchte anmerken: Ich hatte öfter Gespräche auch mit dem Dalai Lama, und das war ein Punkt, der am stärksten der Auffassung der ungebrochenen Ursache-/Wirkungsketten im Buddhismus widerspricht. Hier meinte der Dalai Lama, wenn wir das wirklich beweisen können, dann würde der Buddhismus seine Lehre ändern. Das zeigt eine große weltanschauliche Offenheit.

Zurück zur Situation: Wir sind also nach wie vor ungefähr in den 1930er Jahren, da setzte die Debatte ein. Der Höhepunkt war eine Reihe von Diskussionen, die sich über mehrere Jahre hinzogen, zwischen Albert Einstein und dem dänischen Physiker Niels Bohr, darüber, was uns die Quantenmechanik erzählt, was sozusagen die weltanschauliche, philosophische Bedeutung der Quantenmechanik ist. Die Positionen der beiden Gegenspieler lassen sich relativ einfach zusammenfassen: Albert Einstein war der Meinung, dass die Physik und damit auch die Quantenphysik immer eine von uns unabhängig existierende Wirklichkeit beschreiben soll, eine physikalische Wirklichkeit, die durch klare Kausalgesetze beschrieben wird. Niels Bohr war der Auffassung, dass Gegenstand der Physik nur sein kann, was über die Welt gesagt werden kann. Das ist ein ganz wesentlicher Unterschied: Bei Bohr ist es sozusagen Information, bei Einstein ist es die physikalische Wirklichkeit.

Die Frage ist, wie sich diese beiden Positionen unterscheiden bzw. wie weit die Auffassung einer unabhängig von uns in allen ihren Eigenschaften, das ist wichtig, existierenden Wirklichkeit haltbar ist. Und da kam es 1935 zu einer gewaltigen Idee durch Albert Einstein, gemeinsam mit zwei jungen Kollegen – Podolsky und Rosen, damals in Princeton. (Einstein war schon vor den Nationalsozialisten in die USA geflüchtet). In dieser Arbeit, die man heute die EPR-Arbeit nennt, sprechen die Autoren über zwei Systeme, die miteinander in Wechselwirkung standen. Man kann sich das durchaus als zwei Billardkugeln vorstellen, die zusammenstoßen und auseinanderfliegen. Quanten-Billardkugeln allerdings fliegen zwar auch auseinander, aber in welche Richtungen sie fliegen, ist aber nicht festgelegt. Wenn ich jedoch eine der beiden Kugeln beobachte, und ich finde sie an einer Ecke meines Quanten-Billardtisches, dann wird die andere Kugeln genau gegenüber sein. Sie war aber vorher nicht dort, sondern erst die Beobachtung an dem einen System hat bewirkt, dass dieses System rein zufällig einen Ort annimmt und das zweite wird dann gezwungen, ganz egal wie weit weg sie ist, ebenfalls einen entsprechenden Ort anzunehmen.

Einstein nannte das „spukhafte Fernwirkung“. Das mochte er nicht, er wollte eine Physik ohne diese „spukhafte Fernwirkung“. Diese Debatte galt lange als rein philosophisch, bis man in den 60er Jahren feststellte, dass die Position Einsteins, die annehmen würde, dass die beiden Kugeln sehr wohl an bestimmten Positionen sind, bevor ich sie beobachte – und ich sie nur nicht kenne - dass diese Position im Widerspruch zu gewissen Experimenten ist, die man machen könnte. Man spricht heute in dieser Situation von „Verschränkung“ – ein Begriff, der von Schrödinger eingeführt wurde. Das heißt, zwei Systeme hängen über große Entfernung miteinander auf eine unauftrennbare Weise zusammen, die unabhängig ist von Raum und Zeit. Das ist ganz wichtig.

Zu Beginn der 70er Jahre konnte man solche Experimente machen. Man konnte viele dieser frühen Gedankenexperimente, die in diesen Debatten verwendet wurden, tatsächlich durchführen. In all diesen Experimenten wurde die Quantenmechanik bestätigt. Nicht nur das – man hat viele neue Phänomene entdeckt. Diese Experimente in den 70er, 80er Jahren waren motiviert rein durch philosophische Neugier. Man wollte einfach wissen, ist die Welt auch auf dem Niveau einzelner Teilchen tatsächlich so eigenartig, so verrückt, wie es ein amerikanischer Kollege mal gesagt hat? Die Quantenmechanik zwingt das anzunehmen. Zur großen Überraschung aller Leute, die damals bei diesen frühen Experimenten dabei waren,

hat sich herausgestellt, dass man auf diesen Ideen, also der Idee des Zufalls, dem Konzept der Tatsache, dass ein Teilchen sozusagen durch zwei Spalte gleichzeitig gehen kann (Überlagerung, Superposition) oder auf dem Konzept der Verschränkung von zwei Teilchen über größere Entfernungen – das kann man übrigens ausdehnen auf drei und vier, das wird noch interessanter – dass auf diesen Konzepten aufbauend Ideen entwickelt wurden für eine neue Informationstechnologie.

Das war eine ganz große Überraschung, damit hat niemand gerechnet. Diese neue Informationstechnologie verspricht uns Methoden der Datenübertragung, die absolut sicher sind, und verspricht uns Computer, die so schnell sind, dass man sie gar nicht mit bestehenden Computern vergleichen kann. Man spricht hier von der „zweiten Quantenrevolution“, im Gegensatz zur ersten Quantenrevolution in den 1930er Jahren. Das ist ein Forschungsgebiet, das sich in den letzten Jahren explosionsartig vergrößert hat. Die Schlagworte in dieser zweiten Quantenrevolution sind: Quantenkryptografie (Verschlüsselung geheimer Nachrichten unter Zuhilfenahme von Quantenmethoden), Quantenteleportation (Übertragung eines Quantenzustands von einem System auf ein anderes über beliebige Entfernungen) und der Quantencomputer.

Sprechen wir kurz über diese Konzepte: In der Quantenkryptografie möchte man eine Nachricht sicher von A nach B übertragen. Dass das möglich ist, kennen wir aus Spielen aus unseren Kindertagen – man kann eine Nachricht verschlüsseln. Man verschlüsselt sie zum Beispiel dadurch, dass man Buchstaben nach einem bestimmten Schlüssel durch einen anderen ersetzt. So wird die Nachricht unlesbar. Das Problem ist, dass so ein Schlüssel relativ leicht geknackt werden kann, außer er ist rein zufällig. Das heißt, wenn ich einmal ein „e“ durch ein „u“ ersetze und dann durch ein „p“, das nächste Mal durch ein „a“ usw. und das jeweils zufällig ausgewürfelt wird, dann ist dieser Schlüssel nicht zu knacken. Aber woher bekomme ich diesen zufälligen Schlüssel? Außerdem müssen natürlich Sender und Empfänger der Nachricht den gleichen Schlüssel haben. Das nennt man das „Schlüsselübertragungsproblem“, ich benötige also eine sichere Methode, den Schlüssel zu übertragen. Und das löst die Quantenphysik.

Es gibt verschiedene Methoden der Quantenkryptografie, die eigentlich eleganteste ist die der „Verschränkung“. Um das kurz zu erklären: Nehmen wir an, ich habe zwei Photonen, zwei Lichtteilchen, mit denen ich einen Schlüssel erzeugen möchte. Nehmen wir weiter an, zwei Menschen, Alice und Bob, möchten miteinander kommunizieren, Alice will Bob eine Nachricht schicken. Dann nimmt man ein verschränktes Paar Photonen, schickt ein Photon zu Alice, das andere zu Bob, und die machen jetzt eine Messung an den Photonen, zum Beispiel eine Messung der Polarisation. Polarisation kennt jeder von den Polarisationsbrillen oder Fotografen von den Polarisationsfiltern. Man misst also, ob das Photon horizontal oder vertikal polarisiert ist. Wenn beide, also Alices und Bobs, Photone verschränkt sind, dann bekommen Alice und Bob das gleiche Resultat, weil durch die Verschränkung sicher gestellt wird, dass sie, wenn sie gemessen werden, die gleichen Eigenschaften tragen. Das einzelne Ergebnis ist jedoch rein zufällig, das heißt, wenn man viele Paare der Reihe nach misst, bekommt man eine Zufallsfolge von horizontal und vertikal oder von 0 oder 1. Diese Zufallsfolge kann Alice verwenden, um die Nachricht zu verschlüsseln, Bob kennt die Zufallsfolge und kann die Nachricht entschlüsseln.

Warum ist dieses Verfahren sicher? Es ist sicher, weil die beiden Photonen, da sie verschränkt sind, die Polarisation noch nicht haben, ehe sie gemessen werden. Wenn ein Abhörer sich irgendwo in die Leitung schaltet, muss er die Polarisation messen, und das merkt man sofort an einem veränderten Zustand des Quantenzustands. Alice und Bob würden daher den Schlüssel nicht mehr verwenden, so dass der Abhörer an die Nachricht nicht herankommt.

Das Verfahren ist im Prinzip absolut sicher, und die Entwicklung läuft jetzt in die Richtung, das über große Entfernungen zu machen und mit großen Datenraten. Die größte Entfernung, über die das gelungen ist, waren Experimente von uns von der kanarischen Insel La Palma nach Teneriffa, wo wir einen Schlüssel mit Hilfe von Verschränkung etabliert haben und eine Nachricht übertragen. La Palma und Teneriffa haben wir ausgesucht, weil dort auf etwa 2.500 Meter Höhe auf beiden Inseln jeweils ungefähr ein Dutzend Teleskope sind. Das heißt, man hat dort Infrastruktur, um Licht zu messen; man kann ein Teleskop auch dazu verwenden, Licht wegzuschicken. Wir schicken also mit Hilfe eines Teleskops auf La Palma eines der beiden verschränkten Photonen rüber nach Teneriffa, dort steht ein Teleskop, das dieses Photon auffängt und misst. Beide Photonen werden gemessen, das auf La Palma, das auf Teneriffa, man bekommt die gleiche Antwort. Man schickt viele Photonen-Paare nacheinander und bekommt dann genau diese Zufallsfolge, die man zum Verschlüsseln verwenden kann. Die Entwicklung läuft dahin, dass wir in Kooperation mit der chinesischen Akademie der Wissenschaften daran arbeiten, dass wir einen Satelliten in eine Erdumlaufbahn schicken, wo dann auf diesem Satelliten die verschränkten Photonen erzeugt und an zwei verschiedene Bodenstationen geschickt werden. So können zwischen den beiden Stationen Informationen sicher übertragen werden.

Die Quantenkryptografie gilt als die sicherste Informationsübertragungsmethode. Die zweite Methode, die ebenfalls Datenübertragung betrifft, ist Quantenteleportation. Das erinnert ein bisschen an „Scotty, beam me up!“ bei „Raumschiff Enterprise“, wobei es nicht um die Übertragung von Materie geht, sondern um die Übertragung von Information. Das heißt, wir haben ein Photon, ein Quantenteilchen, und wir können mit Hilfe von Verschränkung die Information, die dieses System trägt, seine Eigenschaften diesem Photon entziehen. Das ist etwas völlig Skurriles: ein Photon sozusagen nur über seine eigenen Eigenschaften zu einem anderen Photon übertragen, das beliebig weit weg ist. Das geht instantan, ohne dass zwischen diesen beiden Photonen zum Zeitpunkt der Übertragung eine Verbindung da sein muss. Diese Informationsübertragungsmethode funktioniert im Laboratorium, über kurze Distanzen wurde auch zwischen den kanarischen Inseln La Palma und Teneriffa gezeigt, wo wir die Information, den Zustand eines Photons teleportiert haben zu einem Photon auf einer anderen Insel 144 km weg.

Die Frage, die oft gestellt wird, lautet: Ist das nicht nur Faxen, ist das Kopieren? Die Antwort ist: Nein, denn das Original-Photon verliert seine Eigenschaften. Teleportation funktioniert so, dass ich ein Originalteilchen habe, das einen bestimmten Zustand hat, und zusätzlich verwende ich ein verschränktes Paar. Eines der beiden verschränkten Photonen wird zum Empfänger geschickt, das andere Photon wird mit dem, dessen Zustand ich teleportieren möchte, verschränkt. Was heißt das? Das heißt, dass das Original-Photon seine eigenen Eigenschaften verliert;

und auf der anderen Seite bedeutet das wegen der ursprünglichen Verschränkung, dass die Eigenschaften des ersten Photons übertragen werden auf das zweite verschränkte, das jetzt schon längst weggeflogen ist und irgendwo beliebig weit weg ist. Ich habe am Empfängerort ein Photon, das in allen Eigenschaften mit dem Original übereinstimmt. Rein philosophisch gesehen ist das dann das Original, denn wenn es alle Eigenschaften besitzt, und wenn es nur ein Stück gibt auf der ganzen Welt, warum soll es nicht das Original sein? Das heißt, es zeigt wieder mal, dass Information wichtiger ist als Substanz sozusagen. Das gilt ja auch für unseren Körper: Die Atome in unserem Körper werden ständig ausgetauscht und trotzdem bleiben wir dieselben Personen, die wir sind.

Teleportation gilt als die ideale Übertragungsmethode zwischen künftigen Quantencomputern, und da haben wir das nächste Schlagwort: der Quantencomputer.

Der Quantencomputer ist sozusagen der erste Computer in der Geschichte, der ganz anders funktioniert als alle anderen. Von einer gewissen fundamentalen Sichtweise sind die bestehenden Hochleistungscomputer genau dasselbe wie der Abakus, der Unterschied ist nur die Datenmenge und -schnelligkeit. Warum sind die das Gleiche? Weil in beiden Fällen Information als physikalische Eigenschaft von einem System dargestellt wird. Das heißt, in einem Fall sind es die Kugeln – rechts oder links, in einem Computer ist es eine gewisse elektrische Spannung oder eine Ladung oder eine Magnetisierung, auf jeden Fall eine fixe Eigenschaft, wobei 0 einem physikalischen Zustand und 1 der andere physikalische Zustand entspricht.

Bei Quantencomputern ist das ganz anders. Quantencomputer können in einer Überlagerung von 0 und 1 sein, genauso wie das Teilchen, das durch beide Spalte gehen kann. Man spricht dann vom Q-Bit, vom Quanten-Bit, das in einer Überlagerung von 0 und 1 existiert, wobei es viele verschiedene Überlagerungen gibt. Das heißt, hier ist schon ein gewaltiges Potential an neuen Möglichkeiten an Informationsdarstellung vorhanden. Außerdem können Quanten-Bits in einem Quantencomputer miteinander verschränkt sein. Das ermöglicht jetzt wieder neue Arten der Informationsübertragung innerhalb eines Quantencomputers. Auch der Quantencomputer kann sich in einer Überlagerung von vielen Informationen befinden. Das heißt, er kann sozusagen Probleme, die ein klassischer Computer hintereinander abarbeiten müsste, sozusagen gleichzeitig machen. Denn alle Informationen sind gleichzeitig vorhanden. Das ist natürlich eine enorme Beschleunigung, die besonders dann wichtig ist, wenn ich nach gemeinsamen Eigenschaften verschiedener Inputs suche. Man kann sich jetzt fragen, welche Dinge wir mit dem Quantencomputer machen können, die mit dem klassischen Computer nicht möglich sind. Da gibt es einige, am berühmtesten ist die Zerlegung großer Zahlen in ihre Primzahlen, in ihre Faktoren. Das ist insofern wichtig, weil die Schwierigkeit der Zerlegung großer Zahlen in heutigen klassischen Verschlüsselungssystemen verwendet wird. Ein Quantencomputer könnte das knacken, die Quantenkryptografie könnte dann aber wieder Sicherheit produzieren. Es gibt auch andere Dinge, die ein Quantencomputer viel schneller erledigen würde, wobei ich der Meinung bin, dass wenn es mal Quantencomputer geben sollte und die technische Entwicklung so weiter geht, wie ich es hoffe, dass Quantencomputer vielleicht überall sein werden und dann auch durchaus Alltagsgeschäfte viel schneller erledigen werden, als wir es heute machen können.

Wie sieht die technische Situation aus? Wie steht es um die Verwirklichung? Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten, die elementaren Bauteile eines Quantencomputers, also die logischen Gatter, die Speicher usw. zu verwirklichen. Das geht entweder über einzelne Atome bzw. Ionen, über Photonen, Lichtteilchen, Quantenpunkte, also Halbleiter, die so klein sind, dass sie Quantenphänomene zeigen und einiges mehr. Bei all diesen Verfahren ist man so weit, dass man Mini-Quantencomputer realisieren kann, die aus einigen wenigen Quanten-Bits bestehen und derzeit noch nicht Probleme lösen können, die ein klassischer Computer nicht auch und dazu schneller lösen könnte. Jedoch gibt es keinerlei Grund, warum diese Entwicklung irgendwo an eine Feuermauer stoßen sollte, warum es nicht möglich sein sollte, viel mehr dieser Quanten-Bits in einem Netzwerk gemeinsam zusammen zu schalten und damit letztlich zu Systemen zu kommen, die klassische Computer im Prinzip schlagen können. Man spricht davon, dass, wenn wir 30 bis 50 Quanten-Bits auf diese Weise erzeugen, zusammenschalten und verschränken können, die ersten Probleme bereits realisiert oder gelöst werden können, die für einen klassischen Computer nicht möglich sind.

Wenn wir langfristig in die Zukunft denken, ist es meine persönliche Meinung, dass wir sehr wohl eine Quanteninformationstechnologie haben, eben weil es keinen fundamentalen Grund gibt, warum das nicht funktionieren sollte. Natürlich wird es sehr viele Arbeitsstunden und Ideen benötigen, um das wirklich ins Laufen zu bringen. Wahrscheinlich sind die Anwendungen, für die man die Quanteninformation verwenden wird, uns wahrscheinlich heute noch gar nicht klar. Doch so etwas gab es in der Geschichte der Technologie sehr oft. Ein berühmtes Beispiel: Als Heinrich Hertz – ich glaube, es waren die 1870-er Jahre – die ersten Experimente zu den Radiowellen machte, was man heute Radiowellen nennt, hat niemand daran gedacht, dass diese elektromagnetischen Wellen zur Informationsübertragung verwendet werden könnten. Er hat sein Geld bekommen, weil das fundamental wichtig war. Ein Zitat aus seinem damaligen Antrag lautet „... obwohl es wohl nie zu einer praktischen Anwendung kommen wird.“ Das heißt, bei jeder hinreichend neuen Technologie ist es unmöglich, vorher zu sagen, wozu sie verwendet werden wird, aber sie wird große Änderungen bringen. Ich persönlich bin überzeugt, dass es mit der zweiten Quantenrevolution genauso sein wird.

*** Zum Autor:**

Zeilinger wurde 1945 in Ried im Innkreis (OÖ) geboren und studierte in Wien Physik. Er hatte Positionen am Massachusetts Institute of Technology (MIT), an der Technischen Universität München, der Technischen Universität Wien (TU), der Universität Innsbruck, der Universität Melbourne und am College de France (Paris) inne und führte Forschungsarbeiten im Los Alamos National Laboratory (USA) und am Merton College der Oxford University durch. Seit 1999 ist er Professor für Experimentalphysik an der Universität Wien, seit 2004 wissenschaftlicher Direktor des Instituts für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW), seit 2006 stellvertretender Vorsitzender des

Board of Trustees des IST Austria in Klosterneuburg und seit der Gründung 2010 Board Member des Vienna Center for Quantum Science and Technology (VCQ). Zeilinger wurde im März 2013 zum neuen Präsidenten der Österreichischen Akademie der Wissenschaften gewählt.

Bücher (Auswahl):

- Anton Zeilinger (100 Notes – 100 Thoughts / 100 Notizen – 100 Gedanken). Hatje Cantz Verlag. 2012
- (zus. mit Friedrich Griesse). Einsteins Spuk. Teleportation und weitere Mysterien der Quantenphysik. Goldmann Verlag. 2007.