

# Ein Physiker mit FERNWIRKUNG

Anton Zeilinger jongliert mit den Rätseln der Quantenwelt. Er lässt Makromoleküle interferieren, erzeugt verschränkte Photonen und überträgt damit Quantendaten kilometerweit.



Der Experimentalphysiker Anton Zeilinger (rechts) im Gespräch mit Spektrum-Mitarbeiter Michael Springer

## Von Michael Springer

**W**er Anton Zeilinger an seinem Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) in Wien besucht, betritt geschichtsträchtigen Boden. Der Gebäudekomplex in der Boltzmannngasse beherbergte schon in der Monarchie physikalische Institute, auf dem Dach prangt noch immer eine Krone, und über einem Eingang waren noch in den 1960er Jahren, als ich dort Theoretische Physik studierte, die Spuren der Lettern »k.u.k.« zu ahnen. Nur ein paar Schritte, und man steht am Kopf der Strudlhofstiege, nach der Heimito von Doderer seinen bekanntesten Roman benannte.

Als geschichtsträchtig erwies sich mein Besuch in Wien auch in einem engeren, biografischen Sinn. Wie sich im Gespräch herausstellte, studierte Zeilinger nicht nur am selben Institut, sondern hatte davor auch dasselbe Gymnasium besucht, und dort hatte uns derselbe Physiklehrer für die Naturforschung begeistert. Während es mich jedoch im späteren Leben in Richtung Strudlhofstiege zog, zu Literatur und Publizistik, konzentrierte sich Zeilinger beharrlich und äußerst erfolgreich auf eine Serie raffinierter Experimente zu Grundfragen der Quantenphysik, die weltweit Aufsehen erregt haben.

Die prinzipielle Originalität seiner Arbeiten besteht – abgesehen von ihrer handwerklichen Raffinesse – darin, dass sie reine Gedankenexperimente, mit denen sonst Theoretiker im Streit um die Interpretation der Quantentheorie zu argumentieren pflegen, tatsächlich zu realisieren vermochten. Dieser Brückenschlag zwischen Theorie und Experiment ist schon für sich bemerkenswert, denn innerhalb der Physik scheint es so etwas wie zwei Kulturen zu geben, eine theoretische und eine experimentelle. Die reine Theorie setzt

den Anspruch der *philosophia naturalis* fort, die im Untertitel von Newtons »Principia mathematica« vorkommt, dem Gründungsdokument der theoretischen Mechanik; da wird ein naturphilosophischer Anspruch mit Mitteln der Mathematik und Physik weiterverfolgt. Hingegen ist die Experimentalphysik naturgemäß praxisnah und technisch. Normalerweise sind Physiker entweder Theoretiker oder Experimentatoren – doch Zeilinger hat in seinen Versuchen so etwas wie experimentelle Theorie praktiziert.

**Insbesondere geht es um die Frage**, ob ein Phänomen wie die »Verschränkung« von Quantenzuständen über makroskopische Entfernungen hinweg im Rahmen der klassischen Physik erklärt werden muss – worauf Einstein und Schrödinger beharrten – oder ob es sich um ein spezifisch nichtlokales Quantenphänomen handelt, wie Bohr und Heisenberg behaupteten. Was Einstein in seiner legendären, mit Gedankenexperimenten ausgetragenen Debatte um die richtige Deutung der Mikrophysik abwehrend »spukhafte Fernwirkung« nannte, hat Zeilinger praktisch demonstriert. Es gelang seinen Teams, mit verschränkten Photonen Quanteninformation quer über die Donau und schließlich über mehr als hundert Kilometer zwischen zwei Inseln zu übertragen. Da identische Quantenteilchen anders als klassische Partikel prinzipiell ununterscheidbar sind, kommt dieser Informationstransfer einer Teleportation gleich oder dem »Beamen« aus der Fernsehserie »Raumschiff Enterprise«. Mit solchen Versuchen vermochte Zeilinger theoretische Debatten über das skurrile Verhalten der Quantenwelt in experimentelle und technisch nutzbare Praxis zu übersetzen. Wichtige Forschungsgebiete wie Quantenkryptografie und Quantencomputer profitieren von seinen Arbeiten.



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / JACQUELINE GODANY

**Spektrum:** Herr Professor Zeilinger, wie kamen Sie überhaupt auf die Idee, Naturforscher zu werden?

**Zeilinger:** Offenbar war ich immer schon so interessiert an den Dingen, dass sich andere Leute darüber wunderten. Wir wohnten auf dem Land, in Niederösterreich, und mein Vater war Lehrer an einer kleinen landwirtschaftlichen Schule. Er leitete dort ein chemisches Laboratorium und war ein so guter Wissenschaftler, dass er später Professor an der Hochschule für Bodenkultur wurde. Ich durfte gelegentlich zu ihm ins Labor kommen und habe als etwas Natürliches miterlebt, dass Leute forschen. Das machte mich neugierig.

Wir wohnten in einem Schloss – einer Dienstwohnung dort, wo auch die Schule war – in riesigen Zimmern, eines allein hatte 150 Quadratmeter. Das war im Winter nicht zu heizen, damals war dafür ja kein Geld da; es kam vor, dass ich morgens aufwachte, und das Wasser im Glas neben meinem Bett war gefroren. So was gibt's! (*lacht*)

Als Kind hatte ich den Blick aus dem zweiten Stock dieses Schlosses, und vis-a-vis lagen die Molkerei und eine große Stallung, die auch zu diesem Lehrbetrieb gehörten. Das Fenster war vergittert, und an diesem Gitter wurde ich angebunden, damit mir nichts passierte. Da

habe ich stundenlang hinausgeschaut – und zwar so lange, dass die Leute im Dorf sagten: Mit dem stimmt irgendetwas nicht. Diese Wurzel der Wissenschaft, das Staunen, das bekam ich offenbar von Anfang an mit.

**Spektrum:** So kommt ein Kind dazu, die Natur interessant zu finden – und die Menschen, die sie erforschen. Sie, Herr Zeilinger, sind Experimentator, doch für Ihre Arbeit ist gerade typisch, dass Sie Gedankenexperimente der Theoretiker praktisch realisieren.

**Zeilinger:** Ich habe früh begonnen zu basteln, aber nicht, um etwas zu machen, das funktioniert – das hat mich nie interessiert –, sondern um zu wissen, wie etwas funktioniert. Das ging bis zum Demontieren der Arme und Beine der Puppen meiner Schwester, weil ich genau wissen wollte, wie es da drinnen aussieht.

Im Gymnasium ist dieses fundamentale Interesse dann gefördert worden. Das war ein Humanistisches Gymnasium, und für mich gab es im Unterricht zwei Highlights. Das eine war Physik; ich hatte das Glück, einen wirklich begeisternden Physiklehrer zu haben. Heute ist ja Pädagogik ein großes Fach an den Universitäten, wo man entsprechende Techniken lernt, aber da ist es in meinen Augen oft schon zu spät. Man sollte Feldforschung machen und fragen: Welche Lehrer gibt es, die im Stande

**Anton Zeilinger** wurde 1945 in Ried im Innkreis (Österreich) geboren. Er studierte an der Universität Wien Physik und Mathematik und promovierte 1971 mit einer Arbeit über Neutronenphysik. Sein Team konnte erstmals Quanteninterferenz an großen Molekülen nachweisen. Seit den 1990er Jahren untersuchte er das Wesen von verschränkten Lichtteilchen und nutzte sie zur Übertragung von Quanteninformation (so genannte Teleportation). Zeilinger war Professor am Massachusetts Institute of Technology (MIT, Cambridge), der TU München, der TU Wien, der Universität Innsbruck und des Collège de France in Paris. Derzeit ist er Wissenschaftlicher Direktor am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) sowie Dekan der Fakultät für Physik der Universität Wien.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter [www.spektrum.de/talk](http://www.spektrum.de/talk)

## GLOSSAR

- ▶ Die klassische Physik umfasst die Theorien vor dem Aufkommen der Quantenphysik – die Newton'sche Mechanik, die Einstein'sche Relativitätstheorie und die Maxwell'sche Theorie des Elektromagnetismus.
- ▶ **Die Verschränkung** ist ein typisches »nicht-klassisches« Quantenphänomen. Unter bestimmten Bedingungen bilden beispielsweise zwei Photonen nach Verlassen ihres Erzeugungsorts ein zusammenhängendes System mit gemeinsamem Quantenzustand.
- ▶ **Der lokale Realismus** war für Einstein eine unabdingbare Voraussetzung jeder vernünftigen physikalischen Theorie. Physikalische Phänomene müssen demnach nicht nur »real« – unabhängig vom Beobachtungsvorgang – existieren, sondern auch »lokal« sein, das heißt prinzipiell separierbar von anderen Phänomenen.
- ▶ **Ockhams Rasiermesser**, benannt nach Wilhelm von Ockham (1285–1349), besagt: Unter konkurrierenden Theorien ist stets diejenige vorzuziehen, die mit den wenigsten Entitäten auskommt.

sind, die Schüler zu begeistern – und von diesen Lehrern lernen. Alles andere, bis zum computerprogrammierten Lernen, halte ich für sekundär. Ich bin zum Beispiel ein glühender Gegner von Skripten in Vorlesungen.

Das zweite Highlight war Griechisch. Wir lasen Antigone von Sophokles und die Verteidigungsrede des Sokrates; da erlebte ich ganz konkret, dass die menschlichen Probleme, die der Einzelne hat, vor zweieinhalbtausend Jahren haargenau die gleichen waren wie heute. Also auch hier stößt man auf fundamentale Fragen.

**Spektrum:** Wie ist es dazu gekommen, dass in Ihrem Fall Theorie und Experiment in einer Person so nahtlos vereint werden?

**Zeilinger:** Für mich gibt es nicht den Unterschied zwischen Theorie und Experiment, sondern den zwischen Leuten, die fundamentale Fragen stellen, und denen, die damit etwas ganz Bestimmtes machen wollen. Man könnte Letztere als Bastler bezeichnen – egal, ob sie ein Experiment aufbauen oder theoretisch etwas herleiten; es gibt unter Theoretikern genauso viele Leute, die sich nicht für fundamentale Fragen interessieren, wie unter Experimentatoren. Und das ist auch okay so.

Durch die Entwicklung im Zweiten Weltkrieg und danach kam es nicht nur zur Emigration der Physiker aus Europa, sondern auch dazu, dass sie in der militärischen Forschung so erfolgreich waren. Sie zeigten: Wir können etwas »basteln«, das kriegsentscheidend ist. Dadurch hat die pragmatische Seite der Physik ein viel stärkeres Gewicht bekommen, als es eigentlich sein sollte. In den USA gibt es zu wenige Physiker, die nicht diese pragmatische Seite verfolgen; aber neue Entwicklungen können nur von fundamentalen Positionen herkommen, aus tiefen, konzeptiv-philosophischen Fragestellungen. Wie wir wissen, haben sich Einstein, Schrödinger und Heisenberg sehr gründlich mit Philosophie auseinandergesetzt. Das Gegenbeispiel war Dirac, dem es gereicht hat, nur zu rechnen. Beide Positionen sind notwendig, aber momentan kommt mir die fundamentale Seite in der Physik etwas zu kurz.

**Spektrum:** Woher kommt Ihre spezielle Vorliebe für die Grundlagen?

**Zeilinger:** Ich war längere Zeit in den USA am Massachusetts Institute of Technology tätig, und dort habe ich erst bemerkt, was wir hier haben, weil es mir dort gefehlt hat. In Wien habe ich offenbar in der Ausbildung an der Uni das prinzipielle Interesse für Grundsatzzfragen mitbekommen – implizit, indirekt. Das geht letztlich zurück auf den Wiener Kreis, auf Ernst Mach und auf Ludwig Boltzmann, der 1903 »Principien der Naturphilosophie« verfasste, in dieser eigentümlichen Orthografie.

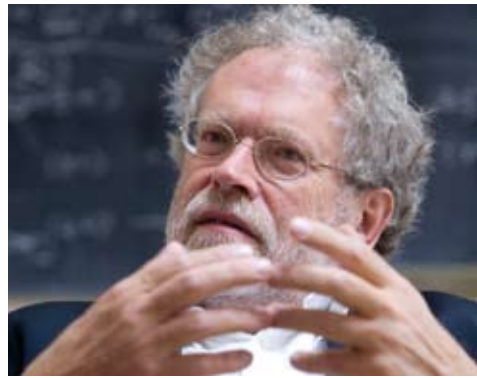
**Spektrum:** Zu unserer Studienzeit gehörte die Physik an der Wiener Uni ja noch zur Philosophischen Fakultät, und wir mussten ein Philosophikum absolvieren.

**Zeilinger:** Natürlich. Außerdem war damals der Studienplan sehr frei. Die Verschulung der heutigen Universitäten durch den Bologna-Prozess halte ich für infantil. Da wird bei jedem Wechsel genau geschaut: Hat der drei oder vier Stunden Quantenmechanik gehört. Das ist vollkommen überflüssig. Ich habe in meinem Studium keine einzige Stunde in einer Quantenmechanik-Vorlesung gesessen. Ich habe mir das selbst angeeignet aus Büchern, damals gab's noch kein Wikipedia – zum Glück, Bücher sind besser. Aber zum Prüfer im Rigorosum habe ich dann vorher gesagt, bitte prüfen Sie mich in Quantenmechanik, ich will das lernen.

**Spektrum:** Ihre Arbeiten, Herr Zeilinger, bestätigen ausnahmslos die Vorhersagen der Quantenmechanik und widerlegen alle Versuche, sie klassisch-realistisch zu erklären. Nun gibt es aber heute mehrere Ansätze, die Quantenmechanik adäquat zu interpretieren – die Kopenhagener Deutung, die Vielweltheorie und Dekohärenzmodelle. Wo liegt da Ihre Präferenz? Trägt der Eindruck, dass Sie ein Anhänger der »orthodoxen« Kopenhagener Deutung sind?

**Zeilinger:** Wir verfügen über eine theoretische Beschreibung der Natur, die unglaublich präzise ist. Es steht überhaupt nicht in Zweifel, dass wir da etwas gefunden haben, das richtig und wahrscheinlich ziemlich endgültig ist. Es kann durchaus eine Entwicklung geben, die eines Tages über die Quantenmechanik hinausgeht – so wie die Relativitätstheorie über die Newton'sche Mechanik. Wenn so etwas kommt, dann ist es wahrscheinlich konzeptiv noch verrückter als die gegenwärtige Quantenmechanik. Aber das Witzige ist, wir haben da eine fantastisch gute Beschreibung der Natur – und dann streiten sich die Leute über die Interpretation! Das heißt für mich, dass wir die konzeptive »Message« noch nicht richtig verstanden haben.

Wir sollten erstens von so wenigen Konzepten wie möglich ausgehen, und wir müssen zweitens alle klassischen Konzepte aufgeben. Die Vielweltheorie zum Beispiel will den klassischen Realismus retten, und zwar in einer etwas seltsamen Weise: Es gibt viele Realitäten, aber die Vorstellung von der Existenz einer unabhängig von uns gegebenen Wirklichkeit soll gerettet werden. Diese Annahme ist für mich ein klassisches Vorurteil, das wahrscheinlich nicht haltbar ist. Ähnlich die Bohm'sche Interpretation: Die will auch den klassischen Realismus retten. Meine Überzeugung ist, dass wir nur dann wirklich weiter-



kommen können, wenn wir uns fragen: Was sind die minimalen Annahmen, die wir brauchen – und da ist die Kopenhagener Interpretation »the most austere one«, wie ich einmal geschrieben habe, die sparsamste.

**Spektrum:** Was Mach Denkökonomie nannte.  
**Zeilinger:** Ja, oder das Prinzip von Ockhams Rasiermesser. Ein Teil unserer Experimente sucht zu identifizieren, welche Konzepte man in der Quantenmechanik beibehalten muss. Vor Kurzem haben wir eine spezielle Abart des nichtlokalen Realismus getestet. Und wie sich zeigt, geht auch das nicht.

**Spektrum:** Haben solche Versuche auch technisch-praktische Konsequenzen für das, was Sie Bastelei genannt haben?

**Zeilinger:** Diese Experimente, die wir und andere machen, sind aus philosophischer Neugier gestartet worden. In Wien begannen wir mit Neutroneninterferometrie, wo ich unter Leitung von Helmut Rauch an der Technischen Universität (TU) mitarbeiten konnte, und später mit verschränkten Photonen. Und zu unserer großen Überraschung stellte sich heraus, dass diese frühen Arbeiten grundlegend wurden für die Entwicklung eines ganz neuen Gebiets der Informationsverarbeitung und -übertragung.

Hätte mich jemand vor fünfzehn Jahren gefragt, wozu das Ganze gut ist, hätte ich offen und ehrlich geantwortet: zu nichts; das ist so sinnvoll wie Astronomie oder eine Beethoven-Symphonie. Das ist eben Wissenschaft, die wir aus Neugier machen. Und genau daraus entsteht jetzt eine neue Informationstechnologie – Schlagworte sind Quantenkryptografie, Quantenteleportation, Quantencomputer –, an der wir sehr intensiv mitarbeiten, bis zu rein technischen Anwendungen.

Das ist ein Lehrstück: In der Geschichte der Physik führten oft Fragen fundamentaler Natur zu Anwendungen, die den Leuten, die die ersten Schritte taten, nicht einmal bewusst waren. Heinrich Hertz machte seine berühmten Experimente zur Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen, um damit den Schlussstein zur Maxwell'schen Theorie zu setzen, ohne dass seine Geldgeber etwas von Anwendungen ahnten. Daraus wurden Radio, Fernsehen und Mobiltelefon. Das kann man den Politikern nicht oft genug sagen: Wenn ihr euer Land langfristig positionieren wollt, müsst ihr Grundlagenforschung fördern, unabhängig von möglichen Anwendungen.

**Spektrum:** Gut, kehren wir zu fundamentalen Fragen zurück. Wenn der lokale Realismus an der Quantenphysik scheitert, dann kann man daraus naturphilosophisch unterschiedliche Konsequenzen ziehen. Wie würden Sie Ihre Position in der Realismusfrage beschreiben?

**Zeilinger:** Nach meiner Meinung – und diese setzt sich immer mehr durch – ist nicht die Lokalität, sondern der Realismus das Problem. Wir können grundsätzlich nicht erklären, warum in einem Quantenexperiment gerade das spezifische Messresultat auftritt, das wir beobachten, und nicht ein anderes aus mehreren Möglichkeiten. Wenn ich eine Superposition von vielen Möglichkeiten habe und ich kopple das System an einen klassischen Apparat, dann kann ich die Kohärenz zwischen den verschiedenen Möglichkeiten wegstreichen. Was ich aber nicht erklären kann, ist, warum in einem bestimmten Experiment gerade dieses Resultat auftritt: Wenn ich den Spin in der z-Richtung messe, warum weist er in einem Fall nach oben und im anderen Fall nach unten? Dafür gibt es auch kein klassisches Bild – außer im trivialen Fall, wo der Spin schon vor der Messung in z-Richtung orientiert war.

Das ist für mich eine der wichtigsten Erkenntnisse der modernen Physik überhaupt. Da ist etwas, wofür es keine kausale Erklärung gibt. Ich kann nur für statistische Gesamtheiten etwas kausal erklären, aber nicht für das Einzelereignis. Im Festsaal der Österreichischen Akademie der Wissenschaften steht unter der Allegorie der Philosophie: *causarum investigatio*. Aber für das Einzelereignis gibt es keine *causa*, keine kausale Erklärbarkeit. Nur auf Grund des Messresultats gibt es nachher eine Wirklichkeit. Wenn ich den Spin messe, bekomme ich Spin nach oben, und ab dem Moment, in dem das Messresultat vorliegt, ist das wirklich in dem Sinn: Wenn ich das gleiche Experiment wiederhole, bekomme ich das gleiche Resultat.

Das ist eine zentrale Annahme jeder Naturbeschreibung: Wenn ich das Gleiche unmittelbar nacheinander messe, muss dasselbe herauskommen; sonst hätte der Wirklichkeitsbegriff überhaupt keinen Sinn mehr. Ich vermute, das ist ein ganz zentraler Punkt, der auch in einer Quantenmechanik, die über die jetzige hinausgeht, erhalten bleiben muss. Aber vorher war das nicht Wirklichkeit! Vorher hatte das System im Allgemeinen keinen wohldefinierten Spin!

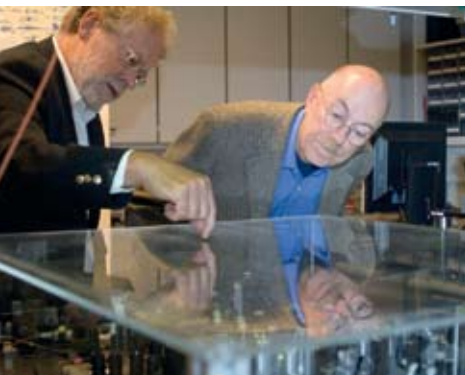
**Spektrum:** Gar keinen?

**Zeilinger:** Das System hatte einen quantenmechanischen Zustand. Es war in einer Superposition oder gar Mischung der verschiedenen Möglichkeiten. Im quantenmechanischen Einzelereignis entsteht erst die konkrete Wirklichkeit, die wir dann sehen – und zwar auf zufällige, in keiner Weise kausal beschreibbare Weise. Normalerweise wird aber gleichzeitig eine andere Wirklichkeit vernichtet. Wenn der Spin in der x-Richtung lag, und ich messe ent-

- **Die Kopenhagener Deutung**, formuliert vom dänischen Physiker Niels Bohr und anderen, bestreitet, dass der lokale Realismus in der Quantenwelt gilt. Der Messvorgang verändert demnach das Messobjekt derart, dass von einer beobachtungsunabhängigen Realität keine Rede mehr sein kann. Das Phänomen der Teilchenverschränkung demonstriert zudem die Nichtlokalität der Quantenwelt: Wird eines von zwei verschränkten Teilchen gemessen, so nimmt nicht nur dieses Teilchen einen definitiven Zustand an, sondern zugleich auch das verschränkte Partnerteilchen – sogar wenn beide beliebig weit voneinander entfernt sind.
- **Die Bohm'sche Theorie** versucht den Realismus zu retten und opfert dafür die Lokalität. Das Quantenverhalten von an sich klassisch-realen Teilchen wird durch »verborgene Parameter« und ein nichtlokales Führungsfeld erklärt.

- ▶ **Die Vielweltheorie** beschreibt den Messvorgang als eine Aufspaltung in so viele Welten, wie es mögliche Resultate der aktuellen Quantenmessung gibt. In jeder dieser Welten gibt es einen Beobachter, der eines der möglichen Resultate als wirklich feststellt.
- ▶ **Dekohärenzmodelle** beschreiben den Messvorgang als quantenphysikalische Wechselwirkung zwischen Umgebung und Messobjekt, wodurch dessen Zustand, eine »kohärente« Quantensuperposition, ihre Kohärenz einbüßt und in eine statistische Mischung klassischer Zustände übergeht.

Der Quantenphysiker erläutert sein Experiment.



lang z, dann bekomme ich ein eindeutiges Resultat, aber die Wirklichkeit entlang der x-Richtung wird durch die Messung vernichtet.

**Spektrum:** Wenn es so ist, dass uns die Quantenphysik eine nichtrealistische Interpretation nahelegt, heißt das, wir müssen uns an den Gedanken gewöhnen, dass die Wirklichkeit nicht rein materiell ist, sondern eine immaterielle, »geistige« Komponente enthält? Sie betonen oft, dass die Information, die eine Art Zwischenposition zwischen materiell und geistig einnimmt, darum der grundlegende Begriff sei.

**Zeilinger:** Ich bin überzeugt, dass Information das fundamentale Konzept unserer Welt ist. Sie bestimmt, was gesagt werden kann, aber auch, was Wirklichkeit sein kann. In der üblichen Auffassung des Physikers und im täglichen Leben existiert die Wirklichkeit draußen primär; durch diese Wirklichkeit spazieren wir wie über eine Bühne, und die Information, die wir darüber haben, ist ein sekundäres Konzept. In der Quantenphysik – zumindest in bestimmten Situationen – ist nach meiner Überzeugung die Information das Primäre: das, was gesagt werden kann.

Die Information, die ein Quantensystem trägt, ist beschränkt, ist endlich. Daraus kann man gute Gründe dafür herleiten, dass es den Zufall gibt, Unbestimmtheit, Verschränkung und solche Dinge. Ich habe in einem meiner Bücher geschrieben, dass wir die Trennung zwischen Information und Wirklichkeit aufgeben müssen. Als Physiker haben wir gelernt, dass wir Trennungen aufgeben müssen, wenn wir sie operativ nicht durchführen können – beispielsweise Raum und Zeit in der Relativitätstheorie, elektrisches und magnetisches Feld in Maxwells Theorie oder irdische und Himmelsmechanik in der Newton'schen Physik. Analog könnten Information und Wirklichkeit zwei Seiten derselben Münze sein. Ich kann über Wirklichkeit keine Aussage machen, ohne über Information zu reden. Beide sind ineinander verwoben. Was das letztlich bedeutet, wissen wir noch nicht.

**Spektrum:** Ist das so wie bei Kant, der sagt, unser Erkenntnisapparat präformiert, was wir überhaupt erkennen können? Das heißt, einiges von dem, was wir als »da draußen« identifizieren, ist eigentlich bei uns »da drinnen«.

Raum und Zeit sind nach Kant eigentlich Vorformen der Realitätswahrnehmung, die wir nicht da draußen beim Ding an sich suchen sollten, sondern in unserem Verstandesapparat.

**Zeilinger:** Er präformiert auch, was da draußen sein kann.

**Spektrum:** Ist dann überhaupt etwas da draußen? Hat es Sinn, nach so etwas zu fragen?

**Zeilinger:** Natürlich. Wenn ich sage, dass Information und Wirklichkeit zwei Seiten der-

selben Münze sind, dann bin ich nicht reiner Idealist. Ich darf weder ein idealistischer noch ein materialistischer Reduktionist sein.

**Spektrum:** Sie setzen Information nicht gleich mit Wirklichkeit? Sie sagen nicht: Was wir bisher als Wirklichkeit betrachtet haben, ist eigentlich Information?

**Zeilinger:** Nein, das wäre mir zu idealistisch.

**Spektrum:** Hat für Sie die Wirklichkeit im Licht der Quantenmechanik eine gleichsam spirituelle Komponente, wie etwa die Weltreligionen das seit jeher lehren? Darf ich die Gretchenfrage stellen: Wie hältst du's mit der Religion?

**Zeilinger:** Haben wir dafür ein paar Stunden Zeit? (*lacht*) Religion und Gott sind natürlich zu unterscheiden. Alle Religionen leiden darunter, dass sie weltliche Organisationen sind, dass sie glauben, Traditionen pflegen zu müssen. Ich habe viel mit Katholiken diskutiert – mit den Kardinälen König und Schönborn –, mit dem Dalai-Lama, mit Griechisch-Orthodoxen und Protestanten. Da gibt es zwei Klassen von Leuten: die einen, die im persönlichen Gespräch sehr wohl eigene Positionen vertreten, oder andere, die auch dann lieber zur offiziellen Linie halten.

Ich sehe auch in diesen spirituellen Traditionen einen Weg des Wissens, parallel zur Naturwissenschaft, auf dem man etwas lernen kann über die Welt. Jeder Konflikt zwischen Religion und Wissenschaft ist in meinen Augen ein Missverständnis. Die Diskussion über Evolution versus Kreationismus ist intellektuell erschreckend – sowohl, was von fundamentalistischen Vertretern der Religion gerade in den USA vertreten wird, als auch zum Teil von Seiten der Naturwissenschaftler; das Buch von Richard Dawkins, »The God Delusion«, ist so simplifizierend! Weder Religion noch Naturwissenschaften werden je die Existenz Gottes beweisen oder widerlegen können.

Das ist wie in dem berühmten Witz: Unter den Schriftgelehrten bricht Streit aus, welcher Gottesbeweis zulässig ist, und schließlich sagt der älteste, von allen respektierte Rabbi: Ich verstehe euren Streit nicht! Der Herr ist so groß, er hat es nicht nötig zu existieren!

Mir gefällt die Einstein'sche Position, dass Gott dasjenige Prinzip ist, von dem die Naturgesetze kommen – wobei ich mir durchaus einen Gott vorstellen kann, der in die Welt noch heute eingreifen kann ...

**Spektrum:** ... was Einstein nicht glaubte.

**Zeilinger:** Ja, soviel ich weiß, hat Einstein Gott nur am Anfang eine Rolle zugeordnet.

**Spektrum:** Ihm zufolge hat Gott dieses großartige Uhrwerk in Gang gesetzt, greift aber nicht in den Ablauf ein, etwa wegen eines Gebets.

**Zeilinger:** Ich weiß zumindest, dass die Welt kein Uhrwerk ist. Die Quantenmechanik

lehrt uns, dass jedes Uhrwerk-Bild falsch ist. Die Naturwissenschaftler haben uns ja weniger gesagt, wie wir die Welt sehen sollen, sondern, wie wir die Welt nicht sehen können. Kopernikus hat uns gezeigt, dass die Erde nicht im Mittelpunkt des Universums steht. Darwin hat uns gesagt: Der Mensch ist nicht etwas Besonderes.

**Spektrum:** Die haltbaren Aussagen sind Negativaussagen. Nach Einstein ist es unmöglich, träge und schwere Masse zu unterscheiden.

**Zeilinger:** Genau. Und genauso gilt: Die Welt ist kein Uhrwerk. Über die theologischen Konsequenzen möge man sich einmal den Kopf zerbrechen. (*lacht*)

**Spektrum:** Lassen Sie uns noch einmal zu dem zurückkehren, was Sie die Bastelseite der Naturwissenschaft genannt haben. Basteln ist eine ehrenwerte Beschäftigung. Sie sind ja kein Mensch wie Einstein, der mit Papier und Bleistift agiert hat, sondern ein Experimentator.

**Zeilinger:** Experimente sind mein Hauptgeschäft. Die philosophischen Fragen sind eine Nebenschiene, ein Hobby ...

**Spektrum:** ... obwohl Ihr Ausgangsinteresse ein fundamentales ist.

**Zeilinger:** Ja, das war damals eine Schlüsselentscheidung. Wir hatten einen sehr freien Studienplan, es gab kein Diplom. Ich finde, es ist ein Jammer, dass so viel Zeit in die Ausbildung gesteckt wird; die jungen Leute brauchen einfach viel zu lange, bis sie fertig sind. Da müssen sie eine Diplomarbeit schreiben, die ist zum Teil schon auf dem Niveau einer Dissertation. Das halte ich für überflüssig.

Als ich vor der Entscheidung stand, wo machst du deine Dissertation, habe ich etwas damals Unerhörtes gemacht: Ich habe herumgefragt, welche Physikprofessoren in Wien als die besten gelten. Da sind zwei Namen übrig geblieben, der Theoretiker Walter Thirring an der Uni und Helmut Rauch an der TU.

Rauch war ein Jungstar, der mit Neutroneninterferometrie experimentierte, und ich ging zu ihm an die TU, weil ich in der Physik nicht den Kontakt zur Wirklichkeit verlieren wollte. Ich wollte Experimente machen. Das rein theoretische Arbeiten war mir zu wenig. Es gibt nichts Schöneres, als im Labor zu stehen und ein Phänomen als Erster zu sehen. Das ist nicht Stolz, sondern ein Glücksgefühl; genauso muss es sein, wenn ein Komponist eine schöne Passage zu Stande bringt.

**Spektrum:** Da wird die Neugier des Kindes befriedigt, das damals am Fenstergitter hing.

**Zeilinger:** Ja, das ist die Freude des Entdeckens. Und jetzt die spannenden Experimente mit Quantenkommunikation über große Entfernungen – so etwas zu machen, ist einfach schön. Zwischen zwei Kanarischen Inseln, La

Palma und Teneriffa, kann man wirklich über 144 Kilometer hinweg einzelne Photonen übertragen und identifizieren, obwohl man die andere Insel nur mehr unklar im Dunst sieht – aber der quantenmechanische Zustand bleibt voll erhalten. Unser Ziel ist die satellitengestützte Quantenkommunikation; da sind wir nicht nur reine Experimentatoren, die philosophische Fragen stellen, sondern da entwickeln wir konkret die Hardware für Satellitenexperimente.

**Spektrum:** Verfolgen Sie noch andere Projekte?

**Zeilinger:** Wir forschen in Richtung mikromechanische Hebel. Winzige mechanische Hebel im Nanobereich oszillieren bei normalen Temperaturen. Man versucht sie nun so weit zu kühlen, dass man ihre Quantenzustände sehen kann. Gewissermaßen wird die Mechanik in die Quantenmechanik zurückgebracht. Das wäre das erste Mal, dass ein mechanisches System – ein Hebel – Quantenzustände zeigt. Man versucht, Verschränkung zwischen Hebeln zu zeigen, und vielleicht lässt sich das für Quantencomputer nutzen.

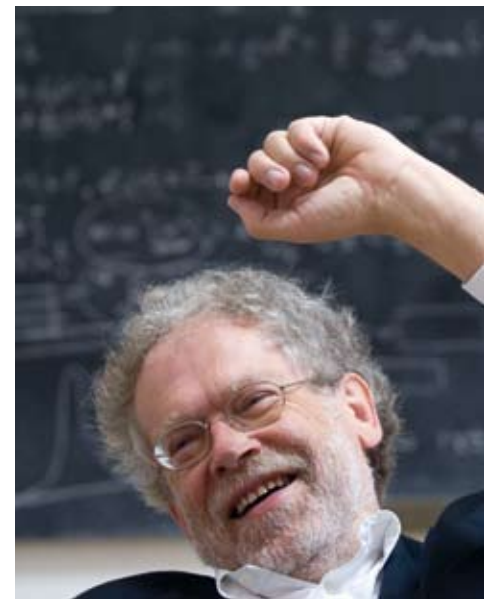
**Spektrum:** Sie haben ja auch Quanteninterferenz an Makromolekülen demonstriert und angekündigt, das mit Viren zu machen, also bis an die Grenze von Lebewesen.

**Zeilinger:** Ich bin überzeugt, dass man das auch mit Lebewesen machen kann. Es gibt keinen prinzipiellen Grund, warum das nicht funktionieren sollte. Dieses Arbeitsgebiet läuft weiter, aber ich habe es vollständig abgegeben an einen jungen Kollegen, Markus Arndt.

**Spektrum:** Was geben Sie Ihren Studenten als Quintessenz Ihrer experimentellen Praxis mit?

**Zeilinger:** Ich versuche immer, ein einzelnes Phänomen möglichst klar herauszuarbeiten und zu isolieren – es überzeugend zu machen. Man soll nicht erst über Zwischenschlüsse um zwei Ecken sagen können: »Das ist es!«, sondern es mit möglichst einfachen Mitteln klar identifizieren. Ich finde da eine Parallele zu den Künsten – in der Malerei die Dinge mit möglichst einfachen Mitteln darzustellen oder im Jazz mit möglichst wenigen Taktschlägen den Rhythmus rüberzubringen.

Ich gebe mich nicht zufrieden, wenn ein Experiment ungefähr vorliegt. Sondern jedem kleinen Detail wird nachgegangen, bis man es ganz versteht. Für die Experimente, die wir machen, soll nachher kein anderes Experiment mehr nötig sein. That's it! Nicht ein hastiger erster Beweis und dann sehen wir weiter – das ist nicht mein Stil. Das hat sich sehr bewährt: Die Dinge noch genauer zu machen, als es eigentlich notwendig scheint. Dadurch werden sie schöner, und dadurch kann man oft etwas im Experiment sehen, das man gar nicht vorhatte. ◀



»ÜBER DIE THEOLOGISCHEN KONSEQUENZEN MÖGE MAN SICH EINMAL DEN KOPF ZERBRECHEN«

**Michael Springer**, der die Fragen stellte, ist Wissenschaftsredakteur und freier Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

Einsteins Spuk. Von Anton Zeilinger. Goldmann, München 2007

Einsteins Schleier. Von Anton Zeilinger. Goldmann, München 2005

Quanten-Teleportation. Von Anton Zeilinger in: Spektrum der Wissenschaft 6/2000, S. 30

An experimental test of non-local realism. Von Simon Gröblacher et al. in: Nature, Bd. 446, S. 871, 2007

Experimental test of quantum-nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. Von Jian-Wie Pan et al. in: Nature, Bd. 403, S. 515, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/940409](http://www.spektrum.de/artikel/940409).