



Sendung vom 30.12.2009, 20.15 Uhr

Prof. Dr. Anton Zeilinger
Quantenphysiker
im Gespräch mit Iska Schreglmann

Schreglmann: Ganz herzlich willkommen beim alpha-Forum. Bei uns ist heute der Quantenphysiker Professor Anton Zeilinger zu Gast. Herr Professor Zeilinger, schön, dass Sie aus Wien zu uns hier nach München gekommen sind.

Zeilinger: Guten Tag, Frau Schreglmann.

Schreglmann: Herr Professor Zeilinger, von einer britischen Zeitung namens "New Statesman" wurden Sie einmal als einer von den "ten people who can change the world" bezeichnet, also als einer von den zehn Menschen, die die Welt verändern können. Das hat sicherlich mit Ihren aufsehenerregenden Experimenten rund um die Quantenteleportation zu tun. Vielleicht können wir darüber gleich als Erstes sprechen.

Zeilinger: Ja, die Quantenteleportation ist das, was am meisten Aufsehen erregt hat von den Dingen, die wir gemacht haben. Da geht es darum, dass man die Eigenschaften eines Systems, wenn ich das so abstrakt sagen darf – in diesem Fall sind das Lichtteilchen –, auf ein anderes System überträgt, ohne dass die Information, und das ist ganz witzig, einen bestimmten Weg zurücklegt. Stattdessen verschwindet sie an einer Stelle und taucht an anderer Stelle dann wieder auf.

Schreglmann: Wie kann, wie darf man sich das vorstellen? Das sind zwei Lichtteilchen A und B, also Photonen, die Informationen austauschen. Was läuft da genau ab?

Zeilinger: Das Wesentliche dabei ist ein Konzept, das von Einstein in die Physik eingeführt wurde und das der österreichische Physiker Erwin Schrödinger dann "Verschränkung" nannte. Einstein hatte das nämlich noch "spukhafte Fernwirkung" genannt: Er mochte die Quantenphysik nicht und hat sie auch immer wieder sehr kritisiert. Es handelt sich dabei jedenfalls um den Fall, dass man zwei Teilchen hat, die miteinander in irgendeiner Form in Wechselwirkung getreten sind. Das kann durchaus ganz gewöhnlich über einen Stoß passiert sein: Nachdem sie zusammengestoßen sind, fliegen sie eben wieder auseinander. Das Interessante ist dabei: Im Falle der Verschränkung hat nachher keines von den beiden irgendwelche Eigenschaften.

- Schreglmann:** Wie kann denn etwas keine Eigenschaften haben? Das ist doch etwas, das uns irritiert aufgrund dessen, was wir aus der klassischen Physik kennen.
- Zeilinger:** Das ist etwas, das in der klassischen Physik in der Tat nicht möglich ist. In der Quantenphysik jedoch tritt das – man kann das unter verschiedenen Blickwinkeln sehen – deshalb auf, weil z. B. Information endlich ist, weil man sie nicht beliebig fein einteilen kann oder weil es eben diese berühmte Heisenbergsche Unschärfebeziehung gibt. Diese Unschärfebeziehung besagt: Man kann nur eine Größe wissen und eine andere dazu passende Größe ist dann unbestimmt, ungenau festlegt.
- Schreglmann:** Sie sagen also, diese Teilchen haben keine Eigenschaften, aber da wird doch offensichtlich etwas übertragen, oder?
- Zeilinger:** Sie haben keine eigenen Eigenschaften, stattdessen ist alles nur gemeinsam festgelegt. Wenn ich das mit einem einfachen Beispiel erklären darf: Das wäre wie bei eineiigen, also identischen Zwillingen, bei denen es, bevor jemand hinsieht, so ist, dass sie keine Haarfarbe haben, keine Augenfarbe usw. Und in dem Moment, in dem man sich einen von den beiden Zwillingen ansieht, nimmt er spontan irgendeine Haarfarbe an, meinetwegen schwarz – und dann bekommt der andere, ganz egal wie weit er in diesem Moment entfernt ist, ebenfalls diese schwarze Haarfarbe. Das heißt, die beiden verschränkten Systeme müssen gleich sein, wenn sie beobachtet werden, aber was ihre Eigenschaften bei dieser Beobachtung sein werden, das weiß niemand. Ich sage immer, dass das auch der liebe Gott nicht weiß.
- Schreglmann:** Wir brauchen also schon ziemlich viel Vorstellungskraft, um uns darauf einlassen zu können. Sie haben aber gesagt, dass da etwas übertragen wird: von dem einen Zwillingsteilchen auf das andere. Das heißt also, da findet etwas statt, ohne dass man diesen Weg nachvollziehen kann, ohne dass da etwas fließt.
- Zeilinger:** Das ist so. Wenn ich an dem einen messe, dann ist die Information über das Resultat dieser Messung sofort beim anderen da – ganz egal, wie weit sie voneinander entfernt sind. Die beiden könnten sogar auf verschiedenen Sternen sein, das ist völlig egal.
- Schreglmann:** Innerhalb des Universums gibt es quasi keine räumlichen Grenzen, die man nicht mittels dieses Effekts überbrücken könnte?
- Zeilinger:** Das Wort "überbrücken" ist hier sehr interessant, denn damit direkt, also instantan Informationen übertragen, das kann man nicht. Da gibt es Probleme.
- Schreglmann:** Aha, das werden wir uns gleich noch genauer anschauen.
- Zeilinger:** Da wird es halt doch schon etwas kompliziert.
- Schreglmann:** Ja, auf jeden Fall. Als Sie dieses Experiment 1997 mit der Teleportation der Quantenteilchen, der Photonen gemacht haben, waren Sie noch an der Universität in Innsbruck. Damals schlugen die Wellen in der Presse ziemlich hoch und es riefen alle: "Dem Professor Zeilinger ist es gelungen, etwas zu beamen!" Das ist etwas, was wir eigentlich nur aus der Sciencefiction kennen wie z. B. vom Raumschiff Enterprise, wo es immer wieder geheißen hat: "Scotty, beam mich hoch!" So hat man in dieser Fernsehserie die

Menschen von einem Ort zum anderen gebeamt und so ähnlich ist es mit den Lichtteilchen ja auch, oder?

Zeilinger: Ja und nein.

Schreglmann: Fühlten Sie sich da missverstanden?

Zeilinger: Ich sage immer, die Teleportation der Quantenphysik ist noch spannender als dieses Beamen. Das Beamen wurde in dieser Serie übrigens nur erfunden, um Produktionskosten zu sparen! Denn es ist einfach billiger, die Leute irgendwohin zu beamen, als den Start und die Landung eines Raumschiffs zu simulieren, und das Ganze auch noch immer auf einem anderen Planeten. Das Spannende an der quantenphysikalischen Teleportation ist ja, dass wir nur die Eigenschaften eines Systems übertragen und nicht die Materie, aus der das System besteht. Und trotzdem können wir behaupten, dass das, was man dann an diesem Ort hat, an den man das hinteleportiert, das Original ist. Das weckt natürlich ganz tiefe philosophische Fragen.

Schreglmann: Vor allen Dingen auch deshalb, weil es offensichtlich zeitgleich passiert, dass das andere Teilchen die Eigenschaften des Ersten annimmt, also ohne dass dabei Zeit vergeht.

Zeilinger: Das ist ganz witzig, die Eigenschaften werden tatsächlich in Null-Zeit übertragen. Aber diese Eigenschaften können noch verschlüsselt sein. Den Schlüssel, um diese Eigenschaften herauszuholen, muss man mit normaler Lichtgeschwindigkeit zum Empfänger schicken – und das dauert halt seine Zeit.

Schreglmann: Sie sagen "normale Lichtgeschwindigkeit", aber die Lichtgeschwindigkeit ist ja eigentlich die Grenze dessen, was an Geschwindigkeit erreicht werden kann laut Albert Einstein. Wie kann es dann möglich sein, dass dennoch so ein Effekt auftritt und zwar über jegliche Entfernung hinweg?

Zeilinger: Die moderne Sichtweise ist, dass diese Grenze der Lichtgeschwindigkeit nur gilt für Übertragung von Information im Sinne dessen, dass man wirklich eine Nachricht senden kann. Es gibt nun aber in der Physik bereits ein paar Phänomene, wo Dinge schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen werden. Das ist aber immer nur dann der Fall, wenn damit nicht die Möglichkeit verbunden ist, beeinflussen zu können, was übertragen wird. Wenn man also keine Nachricht senden kann, wenn man das also nicht beeinflussen kann, dann gibt es dagegen kein Verbot.

Schreglmann: Das heißt, Sie haben in diesem Fall auch keine Nachricht übersandt, sondern quasi eine Kopie von diesem ersten Lichtteilchen hergestellt?

Zeilinger: So ist es auch wieder nicht, eine Kopie ist das nicht. Das Originalteilchen verliert seine Eigenschaften, wird also ein Teilchen ohne Eigenschaften, also verschränkt, wie wir sagen, und das neue Teilchen hat diese Eigenschaften – nur, es kann diese Eigenschaften in einer verschlüsselten Weise haben. Und daher ist die Nachricht zwar übertragen, aber der Empfänger kann damit nichts anfangen, er muss erst den Schlüssel bekommen, um das zu entschlüsseln – und das dauert.

Schreglmann: Das dauert?

Zeilinger: Das dauert, d. h. das geht nur mit normaler Lichtgeschwindigkeit.

- Schreglmann:** Lichtgeschwindigkeit ist für uns Normalmenschen ja auch rasend schnell.
- Zeilinger:** Für uns auf der Erde ist das schnell, aber bereits bis zum Mond ist es eine halbe Sekunde, also eine spürbare Dauer.
- Schreglmann:** Es klingt natürlich zunächst einmal mysteriös, wenn Sie sagen, dieses Teilchen habe all seine Eigenschaften verloren. Wie darf man sich das denn vorstellen? Existiert es dann noch? Oder löst es sich auf?
- Zeilinger:** Es wird eben verschränkt mit einem anderen Teilchen. Und ich hatte ja vorhin gesagt, dass "verschränkt" bedeutet, dass das Systeme sind, die keine wohldefinierten Eigenschaften für sich selbst haben. Seine Eigenschaften gehen sozusagen in der gemeinsamen Gesamtheit auf, um es mal etwas verkürzt auszudrücken.
- Schreglmann:** Damals hat man gesagt: "Vielleicht ist das ja der Anfang, der eine neue Technologie bringen, der eine Revolution in der Wissenschaft auslösen kann. Und vielleicht wird es uns eines Tages gelingen, auch Menschen zu beamen wie in der Sciencefiction."
- Zeilinger:** Das ist nach wie vor Sciencefiction meiner Meinung nach. Als Reisemittel würde ich das nicht erwarten: Wer eine Fernreise plant, sollte sie nicht deswegen absagen, weil er glaubt, in Zukunft könnte das per Beamen gemacht werden. Das ist reine Sciencefiction. Was es jedoch bedeutet – und nicht nur dieses Experiment sondern eine Menge anderer Experimente, die von vielen Leuten auf der Welt gemacht werden –, ist, dass wir damit die Grundlagen einer neuen Informationstechnologie legen, nämlich die Quanteninformationstechnologie, wie wir sie nennen. Sie erlaubt in der Tat ganz neue Arten der Informationsübertragung: Da gehört die Teleportation mit dazu.
- Schreglmann:** Sie haben dieses Experiment nicht nur auf geringe Distanzen beschränkt, sondern Sie sind stattdessen immer höher hinaus oder weiter in den Raum hinein gegangen und haben die Teilchen über immer größere Abstände teleportiert. Einmal ging das über ein Glasfaserkabel: Da kann man sich als Nicht-Physiker vielleicht noch vorstellen, wie das funktionieren könnte. Aber Sie haben das auch über die Atmosphäre des Raums hinweg geschafft, und zwar auf den Kanarischen Inseln. Wie war das?
- Zeilinger:** Die Teleportation selbst haben wir von einer Seite der Donau zur anderen Seite der Donau über Glasfaserkabel gemacht. Die Experimente auf den Kanarischen Inseln waren aber noch keine Teleportation: Das kommt erst noch. Dort haben wir über die Entfernung von 144 Kilometern "lediglich" verschränkte Teilchen gemessen.
- Schreglmann:** Dass diese "Zwillingsteilchen" – warum auch immer – innerlich so miteinander verbunden sind, funktioniert also selbst über diese Entfernung hinweg. Wenn ich Sie vorhin richtig verstanden habe, sind dabei ja der Entfernung keine Grenzen gesetzt. Heißt das, dass man damit auch in den Weltraum hinausgehen könnte? Denken Sie bereits über solche Dinge nach?
- Zeilinger:** Die Physik sagt, es gibt hier keine Grenzen. Das muss man natürlich testen, wir arbeiten daher auch an Experimenten mit Satelliten. Wenn es einmal eine bemannte Mars-Mission geben sollte, dann ist es ja so, dass so eine Reise ja fast 300 Tage dauern wird. Diesen Astronauten wird es während

des Flugs bestimmt werden, da könnten sie währenddessen doch auch ein Teleportationsexperiment machen.

Schreglmann: Muss diese Mission bemannt sein? Könnte man das Experiment nicht so einrichten, dass es auch funktionieren würde, wenn da kein Mensch auf der anderen Seite sitzt?

Zeilinger: Das ist eine Debatte, die nach wie vor läuft. Seit dem Beginn der Quantenphysik gibt es die Diskussion, ob für den Messprozess letztlich ein Beobachter oder eine Beobachterin notwendig ist oder nicht. Das ist eine offene Frage, die noch nicht entschieden ist.

Schreglmann: Ich schaue Sie jetzt deswegen so nachdenklich an, weil Sie gerade gesagt haben, dass das bis heute nicht entschieden ist. Ich hatte die Sache nämlich so verstanden, dass doch gerade durch die Rolle des Beobachters diese Effekte überhaupt erst möglich sind, diese Effekte, die im Hinblick auf unser Ursache-Wirkungs-Verständnis zuerst einmal doch ganz unglaublich klingen.

Zeilinger: Hier muss man sehr präzise sein. Der Beobachter entscheidet durch die Wahl des Messinstrumentes, welche Messgrößen auftreten können, welche Messgrößen Wirklichkeit werden können. Ich sage das bewusst so radikal, weil die Annahme, dass die Teilchen ihre Eigenschaften haben, ehe wir hinsehen, in gewissen Fällen zu Widersprüchen führt. Das heißt, der Beobachter hat einen, wie ich immer sage, qualitativen Einfluss: Er kann sagen, welche Eigenschaften jetzt auftreten können. Er hat jedoch keinen quantitativen Einfluss, er kann nicht beeinflussen, was jetzt wirklich die Wirklichkeit sein wird.

Schreglmann: Nun hat ja ein großer dänischer Physiker mal gesagt: "Na ja, wir wissen eigentlich gar nicht, dass es einen Stuhl überhaupt gibt, denn das ist quasi nur ein Abbild in unserer Wahrnehmung." Woher wissen wir also, dass es den Stuhl bereits gab, bevor wir überhaupt hingeschaut haben?

Zeilinger: Als Physiker sehen wir das operationell. Das heißt, wir definieren zuerst, was wir unter "Existenz" bzw. "Wirklichkeit" verstehen. Das heißt, wenn man ein Messgerät verwendet und dieses Messgerät zeigt dieses und jenes an, und das Messgerät zeigt das immer an, dann existiert dieses Objekt. Das ist sozusagen die operative Definition – über die darunterliegenden Fragen wollen wir uns hier im Moment aber nicht den Kopf zerbrechen. Man kommt dann aber als Physiker in Situationen, dass es selbst in dieser Definition zu Widersprüchen kommt, wenn man annimmt, dass die Dinge existieren, ohne und unabhängig von unserer Beobachtung.

Schreglmann: Sie haben vorhin gesagt, dass Einstein es als eine "spukhafte Fernwirkung" bezeichnet hat, dass dieser Effekt aufgetreten ist. Nichtsdestotrotz hat er sich aber mit der Quantenphysik auseinandergesetzt und hat u. a. auch für einen Teil seiner Entdeckungen in der Quantenphysik den Nobelpreis erhalten. Wie passt das zusammen, warum hat er sich so gegen die Akzeptanz dieses Effekts gewehrt?

Zeilinger: Einstein wird da oft unrecht getan, es wird nämlich oft so getan, als ob er nicht verstanden hätte, worum es geht. Das Gegenteil ist der Fall. Einstein hat sehr genau die weltanschaulichen und konzeptiven Probleme, die die Quantenphysik aufwirft, gesehen und aufgezeigt und gesagt: "Deshalb akzeptiere ich sie nicht!" Er war der Überzeugung, dass es z. B. keinen

Zufall geben darf: Letztlich muss es irgendwo eine Ursache für alles geben. Er hat auch verlangt, dass die Naturwissenschaften die Wirklichkeit beschreiben müssen, die unabhängig von unserer Beobachtung existiert. Eigentlich ist das ja doch eine vernünftige Position.

Schreglmann: Ja, ich glaube, da würden ihm wohl alle beipflichten, denn wir alle möchten doch gerne in einer Welt leben, in der man sich die Dinge erklären kann und es ein Ursache-Wirkungs-Prinzip gibt. Denn so etwas verleiht den Menschen ja auch Sicherheit. Ich glaube, da steckt ein existenzielles Befinden dahinter bei den Menschen.

Zeilinger: Das geht so weit, dass man, wenn man etwas nicht erklären kann, eine Ursache dafür schlicht erfindet. Fast alle frühen Kulturen haben einen Blitz-Gott erfunden, um eine Erklärung dafür zu haben, dass es blitzt usw. usf. Unser Bedürfnis nach kausaler Erklärung ist also sehr, sehr tief verwurzelt. Und dann kommen plötzlich die Quantenphysiker daher und sagen: "Für das Einzelereignis gibt es keine kausale Erklärung. Damit müsst ihr leben, da können wir euch nicht helfen!"

Schreglmann: Wie gehen denn Sie selbst damit um? Wie stehen Sie denn dem Zufall gegenüber?

Zeilinger: Ich persönlich finde eine Welt, in der es den Zufall gibt, viel angenehmer, viel schöner und auch viel romantischer als eine Welt, in der alles determiniert wäre. Denn es wäre doch grausam, wenn wir in einer Welt leben würden, in der alles determiniert ist, in der alles vorgegeben ist. In so einer Welt will man doch nicht leben! Das ist doch eng, einengend usw.

Schreglmann: Sie meinen eine Welt, in der es keinen freien Willen gibt?

Zeilinger: Der freie Wille: Ja, damit sind wir schon bei der nächsten großen Diskussion. Es gibt derzeit eine große Debatte darüber, vor allem unter den Hirnforschern, denn bei denen ist die Mehrheit der Meinung, dass es keinen freien Willen gibt, dass das alles determinierte Abfolgen sind. Aber der Beweis muss meiner Meinung nach erst noch geführt werden!

Schreglmann: Sie stehen also auf der Seite des Zufalls, auf der Seite der Freiheit. Sie haben auch nachgewiesen, dass es nicht nur bei den kleinen Lichtteilchen diese quantenmechanischen Effekte gibt, sondern z. B. auch bei größeren Molekülen ähnliche Effekte auftreten. Ich habe auch gelesen, dass Sie mal in einer Diskussion gesagt haben, dass auch hier der Sache nach oben nicht unbedingt Grenzen gesetzt seien und dass man sich vorstellen könne, dass sich sogar Viren quantenmechanisch verhalten.

Zeilinger: Bei Viren kann man sich das sogar sehr gut vorstellen: Das ist innerhalb dessen, was man heute bereits experimentell planen kann. Man kann also heute bereits eine Strategie angeben, wie man das machen könnte. Ich würde sogar so weit gehen zu sagen, man kann sich Strategien vorstellen für sehr kleine Bakterien, die ja wirklich leben. Denn Viren sind ja sozusagen in einem Zwitterstadium: Sie haben kein selbständiges Leben und leben sozusagen nur in einer Wirtsumgebung.

Schreglmann: Sie brauchen jemanden, den sie befallen können.

Zeilinger: Richtig, erst dann entfalten sie ihre Tätigkeit. – Das ist übrigens ein ganz lustiges Weltbild. – Aber ich glaube, dass das eben auch mit sehr kleinen

Nanobakterien möglich ist. Man muss nur erfinderisch sein: Es braucht halt junge Leute, die gute Ideen haben und das umsetzen.

Schreglmann: Die Vorstellung in der heutigen Zeit, dass Viren oder Bakterien irgendwo hingebannt werden könnten, freut uns nicht unbedingt, oder?

Zeilinger: Nun ja, man kann ja nicht irgendetwas irgendwohin teleportieren, ohne dass man dort mal ein verschränktes Teilchen hinschickt. Deswegen kann man also auch sagen: "Nein, ich mag dein verschränktes Teilchen nicht!" Es ist also nicht so, dass das einfach so möglich wäre.

Schreglmann: Das heißt, die andere Seite könnte das quasi ablehnen.

Zeilinger: Selbstverständlich.

Schreglmann: Das sind ja Effekte, die Sie festgestellt haben, die im Experiment aufgetreten sind. Normalerweise ist es in der Wissenschaft aber doch so: Wir beobachten die Natur und achten darauf, welche Effekte dort auftreten. Diese beobachteten Effekte haben für die Natur immer einen eigenen Sinn, d. h. sie kommen nicht aus dem Nichts, sondern machen in der Natur immer Sinn. Was macht aber dieser Effekt für einen Sinn?

Zeilinger: Die Quantenphysik ist ja genauso entstanden: Man hat die Natur, und unter "Natur" verstehen wir Physiker auch die unbelebte Natur, beobachtet und dann gesagt, dass man die bisher geltenden Gesetze umdrehen müsse. Ob die Teleportation und andere solche Dinge in der Natur einen Sinn haben, wissen wir noch nicht, wir wissen nicht, ob sie verwendet werden von lebenden Systemen.

Schreglmann: Aber Sie haben darüber sicherlich schon sehr viel nachgedacht, wie ich mir vorstellen kann.

Zeilinger: Wir denken in der Tat darüber nach und wir diskutieren auch sehr viel darüber. Ich würde sagen, dass es bis heute eine offene Frage ist, ob es das in diesem Zusammenhang irgendwo gibt. Für eine Antwort müssen einfach zuerst noch bestimmte Experimente gemacht werden.

Schreglmann: Es heißt aber auch, dass das alles nur funktioniert mit diesem "Beamen", wenn das System vor äußeren Einflüssen absolut geschützt ist, wenn das also sozusagen in absoluter Ruhe, wenn das isoliert stattfinden kann. In unserer normalen Welt gibt es aber diese Randbedingungen normalerweise nicht. Irgendwann einen Menschen beamen zu können, würde also daran scheitern, dass da nichts geschützt, isoliert, in Ruhe wäre.

Zeilinger: Ich würde da noch nicht einmal vom Menschen ausgehen wollen. Wir sollten uns stattdessen fragen, ob diese Dinge vielleicht im Gehirn eine Rolle spielen können. Da würde man doch zunächst einmal annehmen: "Nein, auf keinen Fall, denn dort in unserem Oberstübchen herrscht ja alles andere als Ruhe." Da herrscht auch eine relativ hohe Temperatur, nämlich Körpertemperatur, d. h. das Ganze ist mehr oder weniger eine warme Suppe. Die Vorgabe der Ruhe kann es also für das Gehirn nicht geben. Wir in der Quantenphysik haben allerdings Ideen entwickelt – ich meine damit nicht meine Gruppe, sondern die gesamte Community der Quantenphysiker –, dass es auch in einer störenden Umgebung Situationen geben kann, wo ein bestimmter Quantenzustand eben nicht gestört wird. Und wer weiß, vielleicht hat die Natur davon irgendwo Gebrauch gemacht.

Schreglmann: Sie haben sehr viel publiziert, rund 400 wissenschaftliche Artikel, diverse Bücher, darunter auch populärwissenschaftliche Bücher. Dieses hier, "Einsteins Spuk" ist eines davon. Wir haben ja soeben schon das Wort von dieser spukhaften Fernwirkung erwähnt. In diesem Buch geht es aber nicht nur um die Erklärung der Experimente und Effekte, die Sie beobachtet haben, sondern dieses Buch ist schon auch ein bisschen ein Roman. Das ist die fiktive Geschichte von zwei Studenten, die noch am Anfang ihres Physikstudiums stehen und die, wenn ich das mal so sagen darf, ein wenig leiden müssen – zumindest hatte ich diesen Eindruck. Denn Alice und Bob müssen sozusagen alles selbst herausfinden. Ihr Betreuer, der sich um sie kümmert, ein Doktorand namens John, und auch ihr Professor, der Professor Quantinger, lassen die beiden immer so ein bisschen auf ihren Problemen sitzen und sagen: "Findet ihr mal lieber selbst die nächsten Schritte heraus." Ist das ein klassisches Abbild dessen, wie es den Forschern in ihrer Arbeit geht? Dass man einfach Geduld haben muss, dass man sich immer wieder darum bemühen muss, etwas Neues zu finden?

Zeilinger: Hier lassen der Professor Quantinger und der John die junge Studentin Alice und den jungen Studenten Bob schon ein bisschen hängen. Sie geben ihnen aber immer auch Hinweise, um ihnen die Möglichkeit zu geben, selbst das Gefühl der Entdeckung zu haben. Das Gefühl der Entdeckung ist nämlich etwas Fantastisches. Ich selbst arbeite in meiner Forschungsgruppe mit circa 15 jungen Leuten zusammen: Da ist es natürlich im Prinzip auch so, aber ich weiß da eben auch die Antwort nicht. Das heißt, da wissen wir alle nicht, wo es lang geht. Es geht dann darum, durch Diskussion, durch Ausprobieren usw. herauszufinden, was funktionieren und was nicht funktionieren kann. Und wenn dann plötzlich etwas funktioniert und man nun im Laboratorium etwas gesehen hat, was davor noch nie jemand anderer auf der Welt gesehen hat, dann erzeugt das in der Gruppe eine Stimmung, die wirklich unbeschreiblich ist.

Schreglmann: Was ist das für ein Gefühl? Wann ging Ihnen das zum ersten Mal so?

Zeilinger: Das ist einfach spannend, das ist einfach super, das kann man gar nicht beschreiben. Das hat allerdings weniger mit Stolz zu tun, als eher damit, dass man irgendwie das Gefühl hat, nun ein Verständnis gewonnen zu haben: Man hat jetzt etwas erfasst, etwas kapiert.

Schreglmann: Und so unterrichten Sie Ihre Studenten auch an der Universität in Wien: Sie sollen selbst etwas herausfinden und erfahren und selbst darüber nachdenken.

Zeilinger: Das ist das generelle Vorgehen bei Doktoranden und Diplomanden an allen Universitäten der Welt.

Schreglmann: Ja schon, aber es macht doch einen gewissen Unterschied aus, ob man in die Situation getrieben wird oder sich selbst durch die eigene Neugier und Offenheit und Intuition in die Situation treibt, etwas herausfinden zu wollen, selbst forschen zu wollen, oder ob man "nur" nachmacht, was die großen Quantenphysiker eh schon alles gemacht haben.

Zeilinger: Nein, man muss schon selbst Dinge wissen wollen und braucht dafür eben auch diese gewisse Spürnase. Man muss in Neues hinein, in Neuland hinein einen Forschungsweg finden und muss aber gleichzeitig auch

wissen, was eben gerade noch erreichbar ist, was man gerade noch machen könnte, was interessant wäre und wo bestimmte Dinge noch funktionieren könnten. Darum geht es, es geht darum, sozusagen diese Pflöcke einzusetzen, die bereits ein bisschen weiter draußen sind, die aber gerade nicht so weit draußen sind, dass man sie gar nicht erreichen könnte.

Schreglmann: In Ihrem Buch erheben Sie auch ein Plädoyer für Neugier, Intuition, Offenheit, Spürsinn usw. Gab es da bei Ihnen persönlich Vorbilder bereits in Ihrer eigenen Kindheit? Hatten Sie bereits in der Kindheit diese Neugier, bestimmte Dinge unbedingt herausfinden zu wollen?

Zeilinger: Ich war immer schon neugierig. Es gibt diesbezüglich auch eine berühmte Geschichte: Ich bin in Niederösterreich auf dem Land aufgewachsen, und zwar – aus Kriegsgründen, weil es nämlich keine anderen Wohnungen gab – in einem Schloss. Das klingt fantastisch, aber es waren einfach alle anderen Wohnungen kaputt. Ich kann mich noch daran erinnern, wie ich da eines Tages in einem Fenster im zweiten Stock dieses Schlosses gesessen bin. Man hatte mich dabei selbstverständlich angehängt, damit mir nichts passieren kann, damit ich nicht hinunterfallen kann. Dort in diesem Fenster bin ich stundenlang gesessen und habe hinausgesehen. Das ist so weit gegangen, dass die Leute im Dorf gemeint haben, mit dem stimmt etwas nicht, der spinnt ein bisschen.

Schreglmann: Wie alt waren Sie da?

Zeilinger: Ich kann mich selbst noch daran erinnern, also muss ich so ungefähr drei, vier Jahre alt gewesen sein.

Schreglmann: Sie haben hinausgeschaut, weil Sie wahrgenommen haben, was da draußen alles passiert?

Zeilinger: Da draußen gab es Kühe und Menschen, die vor den Kühen liefen. Visavis war eine Molkerei und es gab Wagen, die vorbei fuhren usw. usf.

Schreglmann: Gab es denn später auch Vorbilder in Ihrer Familie? Ihr Vater war ja Chemiker.

Zeilinger: Das war ganz wichtig, dass mein Vater Chemiker war. Er war also selbst Wissenschaftler. Wir haben zwar zu Hause nie darüber gesprochen, aber er hat mich doch gelegentlich in seine Labors mitgenommen und hat mir auch mal ein Mikroskop mitgebracht, mit dem ich herumspielen durfte. Dieses Mikroskop war ganz, ganz wichtig für mich. Im Gymnasium hatte ich einen wirklich begeisternden Physiklehrer. Das ist für mich überhaupt das Wichtigste in den Schulen: dass die Lehrer selbst begeistert sind. Denn genau das merken die Schüler. Wenn ein Lehrer begeistert ist von seinem Fach, dann merken das die Schüler. Da ist es dann sogar sekundär, ob dieser Lehrer autoritär ist oder nicht, denn das gehört erst sozusagen zur zweiten Ebene. Aber seine eigene Begeisterung spüren die Schüler und werden davon angesteckt, das ist überhaupt keine Frage. Ich hatte danach auch ganz großes Glück mit meinem Doktorvater, Professor Helmut Rauch in Wien. Er ist ein exzellenter Experimentalphysiker und er konnte diese Begeisterung ebenfalls weitergeben. Er konnte auch den Mut weitergeben, Dinge anzugehen, die man nicht versteht, die man noch nicht versteht. Das ist nämlich ebenfalls ganz wichtig.

Schreglmann: Ich glaube, das ist bei der Quantenphysik sogar die Grundlage, oder?

- Zeilinger:** Ja, so kann man das auch sagen. (lacht)
- Schreglmann:** Der amerikanische Wissenschaftler Richard Feynman hat einmal gesagt: "Ich darf wohl behaupten, dass es niemanden gibt auf der Welt, der die Quantenphysik wirklich versteht."
- Zeilinger:** Und das war ein Nobelpreisträger! Er hat den Nobelpreis bekommen für eine sehr, sehr effiziente Formulierung der Quantenphysik.
- Schreglmann:** Er meinte damit sicherlich auch, dass man zwar sieht, dass diese Dinge auftreten, dass man aber bis heute nicht weiß, warum das so ist.
- Zeilinger:** Um das zu präzisieren, muss man hinzufügen: Die Quantenphysik ist sicherlich die genaueste Beschreibung der Natur, die die Menschen bisher gefunden haben. Das ist wirklich eine unglaublich präzise Sache. Und es ist keine Frage, dass die Welt sich so verhält, wie die Quantenphysik sagt, denn das ist ganz sicher richtig. Aber was uns fehlt, ist genau dieses "Warum": Warum ist die Welt so seltsam? Woher kommt das? Das ist etwas, das noch auf die Antwort wartet. Es kann durchaus sein, dass die nächste Generation von Quantenforschern, die sich damit beschäftigen, sagen werden: "Wie konnten die das übersehen? Die Erklärung ist so einfach!" Aber vielleicht wird es auch nicht so kommen, ich weiß es nicht.
- Schreglmann:** Wenn das nun eine Erklärung wäre – ich weiß, ich komme damit ins Philosophieren mit Ihnen –, die wir gar nicht messen könnten?
- Zeilinger:** Wenn es eine gute Erklärung ist, dann muss aus dieser Erklärung auch etwas Neues folgen. Das heißt, es muss daraus etwas folgen: vielleicht ein Schritt hinter die heutige Quantenphysik, also einen Schritt weiter, darüber hinaus. Irgend so etwas muss damit möglich sein. Wenn das nicht der Fall wäre, dann würde es schwer fallen, die Menschen davon zu überzeugen, dass das eine gute Erklärung ist.
- Schreglmann:** Aber könnte es nicht theoretisch einfach so sein, dass unsere fünf Sinne nicht ausreichen, um wahrnehmen zu können, was da passiert, dass wir Menschen sozusagen beschränkt sind diesbezüglich?
- Zeilinger:** Die fünf Sinne reichen ohnehin nicht aus: Wir haben Teleskope, wir haben Mikroskope, wir haben alles Mögliche, nicht wahr? Die Frage ist, ob unser Denken vielleicht nicht ausreichen könnte. Das glaube ich aber nicht, weil die Grundgesetze des Denkens – wenn wir an die einfache Logik denken – meiner Meinung nach etwas Universelles sind.
- Schreglmann:** Gut, das heißt, es liegt hier noch sehr, sehr viel vor uns und es wird bestimmt noch etliche überraschende Entdeckungen geben. Sie selbst haben nicht nur sehr viel publiziert, sondern Sie haben auch sehr viele Auszeichnungen für Ihre Arbeit bekommen. Sie haben das Große Bundesverdienstkreuz mit Stern verliehen bekommen, Sie wurden 1996 österreichischer Wissenschaftler des Jahres, Sie bekamen 2007 die Isaac-Newton-Medaille des britischen Institute of Physics usw. – das sind jetzt nur drei der vielen Auszeichnungen, die Sie bekommen haben. Das heißt, Sie haben doch recht viel Anerkennung für Ihre Pionierarbeit bekommen. Ich weiß aber, dass das nicht immer so gewesen ist, denn man hat sich nicht zu allen Zeiten beliebt gemacht mit Experimenten in der Quantenphysik.
- Zeilinger:** Das ist richtig, am Beginn meiner Arbeit, also in den 70er Jahren, galt es als unchic oder unfein oder fast als anrühlich, sich damit zu befassen.

Schreglmann: Warum?

Zeilinger: Ich glaube, dafür gibt es eine fast schon soziologisch-dynamische Erklärung. In den 30er Jahren, als die Quantenphysik entstand, gab es diese berühmten großen Debatten mit Albert Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger usw., also mit lauter ganz berühmten Namen. Diese Debatten haben aber nicht wirklich Antworten geliefert. Wenn ich es richtig verstehe, dann wurde damals diese Diskussion ad acta gelegt. Erst die nächste oder übernächste Generation der Physiker hat das Ganze wieder aufgreifen können. Da war sozusagen der Druck durch die großen "Urväter" nicht mehr da. Das ist der erste Punkt. Der zweite Punkt ist, dass es in den 70er Jahren vor allem durch die Erfindung des Lasers möglich war, Experimente zu machen, die vorher nur Gedankenexperimente gewesen waren. Wenn man diese Dinge dann aber im Labor sieht, ist das natürlich viel überzeugender.

Schreglmann: Man sieht in der Zwischenzeit tatsächlich einiges mehr von den Dingen, die man herausfinden konnte, was einfach daran liegt, dass die Quantenphysik zu ganz konkreten Anwendungen führt. Den Laser haben Sie bereits angesprochen, aber ich meine damit auch die Experimente, die Sie gemacht haben und immer noch machen. Ich komme jetzt auf ein Stichwort, das ich vorhin schon einmal angedeutet habe, nämlich auf die Quantenkryptographie. Sie haben einmal gesagt: "Wir haben beim Forschen eigentlich spielerisch und zufällig entdeckt, wie wir das, was wir herausgefunden haben, auch umsetzen in Technologie".

Zeilinger: Ja, das war eine der ganz großen Überraschungen für mich. Wenn mich jemand in den 90er Jahren gefragt hat, wozu das, was wir machen, eigentlich gut sein soll, konnte ich ganz ehrlich sagen: "Das ist für nichts gut! Wir machen das nur, weil wir das spannend finden, weil wir einfach wissen wollen, wie die Welt funktioniert." Und dann plötzlich gab es Ideen wie die Quantenkryptographie: die Verschlüsselung geheimer Nachrichten auf eine absolut sichere Weise. Es hat uns alle vollkommen überrascht, dass das Zeug, das wir nur aus Neugier machen, plötzlich eine Anwendung findet. So einen Vorgang gab es aber in den Wissenschaften sehr, sehr oft.

Schreglmann: Das ist eigentlich ein sehr gelungenes Beispiel dafür, wie aus purer Grundlagenforschung dann angewandte Forschung werden kann. Denn normalerweise wird das ja oft strikt getrennt, d. h. da gibt es so eine Art Kluft dazwischen.

Zeilinger: Ich sage unseren Politikern immer: Wenn Ihr von uns wirklich interessante Dinge im Hinblick auf eine Anwendung haben wollt, dann dürft Ihr von uns nicht verlangen, dass wir Anwendung machen!

Schreglmann: Das heißt, man soll Sie spielen lassen, wenn ich das mal so salopp sagen darf.

Zeilinger: Ja, aber es geht dabei nicht irgendwie um freies Spielen, sondern man soll dabei schon auch Leistungsanforderungen setzen. Man soll also den Forschern sagen: Du darfst spielen, aber das, was du machst, muss zumindest in der wissenschaftlichen Community anerkannt werden. Das muss sozusagen etwas sein, das uns in irgendeiner Form weiterbringt.

Schreglmann: Und das tut ja ganz sicherlich die Quantenkryptographie. Aber wie funktioniert das genau?

- Zeilinger:** Die Quantenkryptographie funktioniert dadurch, dass wir diese Quantenteilchen verwenden, um einen Schlüssel, einen Geheimcode zu generieren. Wir schicken nämlich diese beiden verschränkten Teile los, einen zur Alice, den anderen zum Bob, sie machen beide ihre Messungen und bekommen dabei eine zufällige Zahl, aber beide die gleiche Zahl. Und wenn man viele Teilchen schickt, bekommt man große Abfolgen von zufälligen Zahlen, die identisch sind.
- Schreglmann:** Das sind Zahlenreihen mit 1 und 0.
- Zeilinger:** Genau solche Zahlen wie z. B. "10011". Wie gesagt, man bekommt dabei eine identische Abfolge von Zufallszahlen. Diese Zufallszahlen kann dann Alice verwenden, um ihre Nachricht zu verschlüsseln. Und Bob kann sie deshalb entschlüsseln, weil er diese Zufallszahlen kennt. Und nur Bob kann das! Denn niemand anderer kennt diese Zahlen.
- Schreglmann:** Welchen Nutzen könnte uns das konkret bringen? Ich weiß, dass Sie vom Rathaus in Wien aus mittels dieser Geheimcodierung durch Quantenphysik eine Banküberweisung getätigt haben.
- Zeilinger:** Das war ein netter Gag. Das war einfach nur eine Demonstration unserer Arbeit mit diesem "Schlüssel". Das ist schon ein paar Jahre her und lief damals in Wien über Glasfaserkabel. Das heißt, diese Technologie existiert jetzt und man könnte sie durchaus bereits einsetzen, aber es ist einfach nur die Frage, wann der wirtschaftliche Druck groß genug ist, um sie einsetzen zu müssen. Die derzeitigen Verschlüsselungssysteme, die man z. B. auch im Internet verwendet, gelten als sicher, aber man kann nicht mathematisch beweisen, dass sie sicher sind. Es könnte also sein, dass eines Tages jemand diese Verschlüsselungssysteme knackt.
- Schreglmann:** Bei Ihrem Verfahren hingegen wäre das nicht möglich.
- Zeilinger:** Bei der Quantenkryptographie ist das nicht möglich, das kann grundsätzlich ausgeschlossen werden.
- Schreglmann:** Warum können Sie ausschließen, dass das geknackt werden kann?
- Zeilinger:** Das können wir deshalb ausschließen, weil es ja erstens um die Erzeugung dieses Codes, dieses Schlüssels geht: In dem Moment, wo da ein Abhörer, ein Spion sozusagen in der Leitung ist, merkt man das diesem Code tatsächlich an. Denn man kann nun einmal ein Quantensystem nicht beobachten, ohne es zu verändern. Alice und Bob müssen also bei der Herstellung dieses Schlüssels jeweils immer ein paar ihrer Bits vergleichen: Wenn man sieht, dass es da Störungen gegeben hat, dann verwendet man den Code eben nicht. Das heißt, man kann dann zwar nicht kommunizieren, aber die Nachricht mitlesen kann dann ein Gegner eben auch nicht.
- Schreglmann:** Für Geheimdienste und fürs Militär ist das bestimmt äußerst interessant.
- Zeilinger:** Das sagt man immer so.
- Schreglmann:** Stehen die denn bei Ihnen schon Schlange?
- Zeilinger:** Es ist witzig, auf diese Idee kommen immer alle Leute sofort: "Das interessiert bestimmt das Militär und die Geheimdienste!" Aber in Wirklichkeit ist es so, dass das meiste heutzutage im Internet verschlüsselt wird, also auf kommerziellem Gebiet. Das macht viel, viel mehr aus! 97, 98

Prozent aller verschlüsselten Nachrichten heutzutage sind solche privaten oder kommerziellen Nachrichten. Mit dem militärischen Komplex hat das überhaupt nichts zu tun.

Schreglmann: Vielleicht denkt man deswegen zuerst an den Geheimdienst und ans Militär, weil man sich gar nicht vorstellen kann, dass das alles für uns normale User zu Hause so schnell Wirklichkeit werden könnte.

Zeilinger: Wenn Sie heute im Internet eine Bezahlung vornehmen, dann verwenden Sie dabei selbstverständlich eine Verschlüsselung.

Schreglmann: Das ist richtig, aber ich mache das nicht mit Quantenphysik.

Zeilinger: Sie machen das mit einem Verfahren, das, wie ich vorhin bereits meinte, als sicher gilt, von dem man jedoch nicht absolut sicher sein kann, dass es nicht doch jemand knacken kann. Und wenn jemand eine clevere Idee hat, wie man das knacken kann, dann braucht man plötzlich diese Quantenkryptographie: Die würde dann von einem Tag auf den anderen notwendig werden.

Schreglmann: Der nächste große Schritt auf diesem Gebiet ist ja der Quantencomputer, die Quanteninformatik generell und vielleicht auch das Quanteninternet. Wie darf man sich das vorstellen?

Zeilinger: Der Quantencomputer ist ein Gerät, bei dem die Information in Speichern getragen wird, die z. B. aus einzelnen Atomen oder einzelnen Teilchen bestehen. Dadurch gelten für diese Speicher Quantengesetze und die Information kann in diesem System z. B. verschränkt sein, sie kann in Überlagerung von vielen Möglichkeiten existieren usw. Das wäre dann zum ersten Mal in der Geschichte der Menschheit ein Computer, der nach ganz anderen Gesetzen funktioniert als dieses normale "Schieberding", das man da immer verwendet.

Schreglmann: Das heißt, er hätte viel mehr Potential.

Zeilinger: Er hätte viel mehr Potential, wäre sehr viel schneller und könnte Probleme lösen, die für die heutigen Computer als unlösbar gelten.

Schreglmann: Das ist in der Tat spannend. Nun haben ja all diese Dinge nicht nur Auswirkungen auf unseren zukünftigen Alltag, sondern auch Auswirkungen auf interdisziplinärem Gebiet. Das heißt, sie haben auch Auswirkungen auf andere Fächer, auf das Weltbild schlechthin und möglicherweise auch auf die Denkweise in den Religionen. Bei Ihnen war ja Ende der 90er Jahre auch einmal der Dalai Lama zu Besuch. Wie war das?

Zeilinger: Ich habe ein paar Mal mit dem Dalai Lama diskutiert, ich habe ihn auch zwei Mal besucht in Dharmshala, also in seiner Residenz in Nordindien an den Abhängen des Himalaja. Das ist ein sehr, sehr interessantes Thema, und als ich eines Montagmorgens zum ersten Mal mit ihm diskutiert habe, sind wir genauso dagesessen wie wir beide hier und ich musste ihm die Grundlagen der Quantenphysik erklären. Dabei hatte ich wiederum vom Buddhismus keine Ahnung. Diese Diskussion war wirklich hochinteressant, denn man muss sich den Dalai Lama – wie man ja z. B. auch merkt, wenn man ihn im Fernsehen sieht – nicht nur als sehr, sehr warmherzige Persönlichkeit vorstellen, sondern auch als hochintelligent. Er hat mir immer gleich die übernächste Frage gestellt, wenn ich etwas erklärt habe. Das war wirklich phantastisch.

- Schreglmann:** Wie hat er denn reagiert auf all diese mysteriösen Dinge?
- Zeilinger:** Das ist für ihn im Prinzip alles interessant, es gibt dabei nur einen ganz bestimmten Knackpunkt. Im Gegensatz zu unserer allgemeinen Meinung über den Buddhismus ist zumindest die Richtung des Buddhismus, die der Dalai Lama vertritt, eine sehr logische und auf Kausalitäten aufgebaute Weltanschauung.
- Schreglmann:** Das heißt, da gibt es immer Ursache und Wirkung.
- Zeilinger:** Es gibt immer Ursache und Wirkung und die Wirkung ist dann immer eine neue Ursache usw. Man spricht hier von ungebrochenen Ursache-Wirkungs-Ketten.
- Schreglmann:** Das heißt, sein Buddhismus passte zu dem, was Sie gesagt haben, dazu.
- Zeilinger:** Wenn wir Physiker nun sagen, dass es den quantenmechanischen Einzelprozess gibt, bei dem es keine Ursache gibt, wenn wir sogar sagen, dass es möglicherweise einen Urknall gegeben hat, für den die Frage, was vorher war, keinen Sinn macht, denn da gab es keine Zeit, dann passt das zumindest mit seiner buddhistischen Weltanschauung nicht so gut zusammen. Aber der Dalai Lama sagt dann eben: "Ihr müsst uns wirklich davon überzeugen, dass es nicht anders geht! Das ist natürlich eine große Herausforderung für euch. Aber wenn Ihr das schafft, dann müssen wir unsere Lehre ändern." Das ist eine Offenheit eines Religionsführers, die man nicht überall hört – um es mal so zu formulieren.
- Schreglmann:** Wie ist das denn im Christentum? Ich weiß von Ihnen, dass Sie katholisch sind, denn in der Bibel spielt ja der Zufall, so weit ich weiß, ebenfalls keine Rolle. Das Bild, das man im Christentum hat, ist also ebenfalls ein ganz anderes als das, das die Quantenphysik vermittelt.
- Zeilinger:** Ich muss gestehen, dass ich es bisher noch nicht unternommen habe, die Bibel nach der Frage des Zufalls zu durchforsten. Aber Sie haben recht, das ist eine gute Idee. Da muss ich wirklich mal mit Theologen reden, das sollte man machen. Ich sage jedenfalls den Theologen immer: Diese Eigenschaften, die wir Gott zuordnen wie z. B. allwissend, allmächtig zu sein usw., sind ja eigentlich Konstruktionen von uns Menschen, das sind menschliche Konstruktionen.
- Schreglmann:** Das entspringt also unserem Bedürfnis: Wir sind diejenigen, die alles wissen wollen.
- Zeilinger:** Das ist unser Bedürfnis, unsere Konstruktion. Ich sage daher einem religiösen Menschen immer: "Warum gestehst du Gott nicht zu, dass er die Welt so geschaffen hat, dass es den reinen Zufall gibt, dass es etwas gibt, bei dem vielleicht sogar er selbst nicht vorher wusste, was herauskommt?" Ich weiß, diese Aussage ist für viele eine Katastrophe, aber ich möchte das einfach gerne etwas mystischer sehen: Wir sollten versuchen, ein bisschen unserem Drang zu entgehen, Gott ständig irgendwelche Eigenschaften zuzuordnen.
- Schreglmann:** Wenn Sie sagen, dass Ihre Aussage eine Katastrophe sei, dann meinen Sie damit sicherlich, dass es einen regelrecht durchrüttelt, wenn sozusagen das ganze Weltbild durchgerüttelt wird. Sie sagen das aber voller Gelassenheit. Ruhen Sie so in sich, dass es für Sie eigentlich eine ganz wunderbare Vorstellung ist, dass nicht alles so festgelegt ist?

Zeilinger: Ich finde das tatsächlich wunderbar, ich finde es sehr schön, wenn nicht alles festgelegt ist und wenn nicht alles schon vorher bekannt ist. Ich persönlich bin zwar der Meinung, dass es einen Gott gibt, aber ich finde es wunderbar, wenn auch Gott nicht alles weiß, was in der Zukunft geschehen wird. Ich sehe das nämlich gar nicht als notwendig an, ich finde es viel interessanter, wenn das nicht der Fall ist.

Schreglmann: Das ist ein wunderbares Schlusswort, dem ich gar nichts mehr hinzufügen möchte. Ganz herzlichen Dank, Herr Professor Zeilinger, dass Sie bei uns waren. Das war das alpha-Forum, heute mit Anton Zeilinger, einem der bedeutendsten Quantenphysiker unserer Zeit. Ihnen, liebe Zuschauerinnen und Zuschauer, wünsche ich noch eine gute Zeit und einen schönen Abend.