

Die Quantenwelt wird sichtbar

Anton Zeilingers physikalische Experimente stoßen an die Grenzen des Vorstellbaren

06.12.2000

Wissenschaft - Seite W01

Frank Grotelüsch

Ein Montagmorgen in Wien. 9. Bezirk, Boltzmannngasse 5. Das Universitätsinstitut für Experimentalphysik wurde einst - so sagt das Bronzeschild im Flur - von der "Regierung seiner kaiserlichen und königlichen apostolischen Majestät des Kaisers Franz-Josef" in Auftrag gegeben. Doch der museale Mief des mächtigen Treppenhauses täuscht: Im zweiten Stock, in frisch renovierten Büros und hochmodernen Labors, residiert einer der prominentesten Physiker unserer Tage. Mit spektakulären Versuchen erforscht Anton Zeilinger, Jahrgang 45, die Merkwürdigkeiten der Quantenwelt.

Was Theoretiker wie Heisenberg und Einstein einst erdachten, setzt der Wiener Professor in Experimente um. 1997 hat Zeilinger Lichtquanten "gebeamt", indem er deren Eigenschaften ohne Zeitverzögerung von einem Ort zum anderen transportierte. 1999 schickte er Kohlenstoffmoleküle durch einen Gitterrost. Sie bewegten sich dabei wie Lichtwellen. Damit war klar: Selbst "große" Kohlenstoffmoleküle folgen den seltsamen Regeln der Quantenphysik.

"Die Quantenphysik ist eine höchst abstrakte Beschreibung der Natur mit sehr viel Mathematik", sagt Zeilinger. "Aber sie hat sich experimentell hervorragend bewährt und zu vielen technischen Anwendungen geführt. Die moderne Elektronik wäre ohne die Quantenphysik nicht denkbar. " Anton Zeilinger aber faszinieren weniger kommerzielle als philosophische Aspekte: "Wo hört die Alltagswelt auf, wo beginnt die Quantenwelt? Kann womöglich jedes noch so große Objekt Quanteneigenschaften zeigen?" Die prägnanteste dieser Eigenschaften: Winzlinge wie Elektronen oder Atome lassen sich nicht nur als Teilchen, als drastisch verkleinerte Billardkugeln ansehen. Sie haben auch den Charakter von Wellen. Quanten sind Zwitter - mal benehmen sie sich wie ein Teilchen, dann wieder agieren sie als Welle.

Bis zum vergangenen Jahr kannte man dieses merkwürdige Tun nur von Gebilden, die nicht größer als Atome sind. Dann gelang Zeilinger und seine Leuten ein Aufsehen erregendes Experiment: "Wir haben gezeigt, dass sich auch große Moleküle wie Quantenobjekte verhalten. " Diese Moleküle sind Fullerene, Kugeln aus 60

Kohlenstoffatomen. Sie haben die Form eines Fußballs, sind jedoch 200 Millionen Mal kleiner.

Mit den Kohlenstoffbällen veranstalten Zeilinger und sein Team eine Art mikroskopisches Torwandschießen. Sie lenken sie durch einen winzigen Gitterrost. "Bei einer Torwand wissen wir genau, dass der Fußball entweder durch die eine Öffnung oder durch die andere fliegt", erzählt Zeilingers Mitarbeiter Julian Voss-Andreae. "Wir sehen nie, dass er auf merkwürdige Weise durch beide Öffnungen gleichzeitig fliegt und sich hinter der Wand wie ein normaler Ball verhält." Genau das aber beobachten die Wiener bei ihren Minifußbällen. Die Fullerene scheinen mehrere Öffnungen gleichzeitig zu durchqueren. Die einzig mögliche Erklärung: Auch Fullerene besitzen Welleneigenschaften und sind damit zu den Quanten zu zählen. Mit diesem Versuch hat Zeilingers Team die Quantenwelt dem Alltag ein Stück näher gebracht.

Montagnachmittag. Julian Voss-Andreae sucht im Internet nach Informationen über ein Eiweiß. Überall in seinem Büro hängen Computerbilder von in sich gewundenen Molekülen. "Wir wollen untersuchen, ob noch größere Moleküle als Fullerene Quanteneigenschaften zeigen." Ein ehrgeiziges Ziel, immerhin sind die Eiweiße, mit denen die Forscher experimentieren wollen, rund hundertmal schwerer als die Minifußbälle. Voss-Andreae zuckt mit den Achseln. "Keiner weiß, ob das klappen wird." Doch falls es klappt, eröffnen sich neue Fragen. Gehören unter bestimmten Bedingungen auch Viren, Bakterien oder Mäuse zur Quantenwelt? Sind gar Bedingungen vorstellbar, unter denen selbst der Mensch zum Quantenwesen wird und zwei Türen gleichzeitig durchschreitet? "Ich bin davon überzeugt, dass keine prinzipielle Grenze existiert", meint Zeilinger. "Es gibt nur Grenzen der experimentellen Realisierbarkeit." Dienstagvormittag. Anton Zeilinger ist auf dem Weg ins Labor. Es liegt in einer Seitenstraße gegenüber vom Hauptgebäude. Immer wieder muss der Forscher Anträge und Berichte bearbeiten. "Das ist viel Mühe", klagt Zeilinger, "und es ist uneffizient. Es wäre besser, wenn man diese Zeit unmittelbar mit der Physik verbringen könnte." Viel lieber arbeitet der Physiker mit seinem Team an neuen Fragen. "Wenn man diskutiert und ausprobiert, was gehen könnte und was nicht. Das ist das Spannendste!"

Etwas später im Labor entflammt eine lebhafte Diskussion mit dem Team, einer Italienerin, einem Chinesen und einem Australier. Es gibt ein Problem. Ein Spezialkristall, der rotes in ultraviolettes Laserlicht verwandelt, geht immer wieder kaputt. Von Kollegen hat Zeilinger gehört, das Problem sei zu lösen, wenn man den Kristall in Sauerstoffgas bade. Der Chef ist sichtlich genervt. Mehrmals - so empört er sich - habe er darauf hingewiesen, doch seine Mitarbeiter haben ihm offenbar nicht zugehört. Keine fünf Minuten später aber ist der Ärger verflogen. "Man kann ja nicht ständig darauf bestehen, dass es genauso gemacht wird, wie man will", meint

Zeilinger. "Schließlich gehört es zur Ausbildung, dass die Leute ihre Fehler machen, nicht wahr?"

Der Versuchsaufbau mit dem mangelhaften Kristall ist ein riesiger Tisch. Der ist voll gestellt mit Lasern, Spiegeln, Lichtblenden und anderen optischen Geräten. Es ist eine Apparatur zur Teleportation, zum "Beamern" von Licht. "Die Idee zur Quantenteleportation hatten 1993 theoretische Physiker", erzählt Zeilinger "Damals dachten wir, es sei völlig unmöglich, das experimentell zu verwirklichen. " Aber ohne dass es ihnen bewusst war, hatten die Österreicher bereits an den Bausteinen für das Experiment gearbeitet - "aus reinem Zufall", betont Zeilinger.

1997 dann klappte der Versuch. Dabei spaltet ein Kristall ein einzelnes Lichtteilchen (Photon) aus einem Laserstrahl in zwei gleichartige Photonen auf. Die "Zwillinge" haben eine merkwürdige Eigenschaft: Sie sind "verschränkt", sind also selbst über große Entfernungen auf mysteriöse Weise miteinander verbunden - jeder der beiden Zwillinge "weiß" sofort, was mit dem anderen geschieht, selbst wenn beide Kilometer voneinander entfernt sind. "Wie zwei Würfel, die, wenn ich sie gleichzeitig würfle, immer die gleiche Zahl ergeben", erläutert Zeilinger. "Sie bilden ein Paar, nicht zwei getrennte Würfel. " Zeilinger lässt den einen Photonenzwilling mit einem anderen Lichtteilchen (dem "Passagier") zusammenstoßen. Das Ergebnis: Der andere Zwilling - obwohl einen Meter entfernt - nimmt unverzüglich die Eigenschaften des Passagiers an, in diesem Fall dessen Schwingungsrichtung. Das bedeutet, dass die Forscher eine physikalische Eigenschaft mit Überlichtgeschwindigkeit von A nach B befördern können. "Einstein hat das als spukhafte Fernwirkung abgetan und Zeit seines Lebens daran gezweifelt, dass es solche Effekte gibt", schmunzelt Zeilinger. "Mit dem Experiment konnten wir Einstein widerlegen. Wir müssen also mit dieser spukhaften Fernwirkung leben. " Dennoch bleibt Einsteins Relativitätstheorie, gemäß der kein Signal schneller sein kann als das Licht, gültig. Denn per Quantenteleportation lassen sich zwar Eigenschaften schneller als das Licht übertragen. Aber der Sender muss - etwa per Funk - stets eine Art Schlüssel nachschicken, damit der Empfänger das Beobachtete "decodieren" kann.

"Es ist absehbar, dass man auch die Eigenschaften von Atomen teleportiert", glaubt Zeilinger. "Dann könnte man es mit Molekülen versuchen. Es könnte sogar mit Viren funktionieren. " Langfristig seien gar praktische Anwendungen möglich - etwa für neuartige Computer.

Mittwochmorgen. Das wöchentliche Arbeitsfrühstück. Wie in jeder Woche hat der Chef einen Apfelstrudel mitgebracht. Es wird lebhaft diskutiert und gescherzt. Zeilinger, der mit seiner alten Kordjacke, der Wuschelmähne und dem Bart, der sich offenbar nur widerwillig stutzen lässt, mehr an einen Soziologieprofessor erinnert als an eine Physikkoryphäe, schätzt den lockeren Umgangston. Eigen ist ihm aber auch

ein strenger, fast missbilligender Blick, mit dem er zuweilen den wissenschaftlichen Ausführungen seiner Kollegen lauscht - wie ein Patriarch aus kaiserlichen Zeiten, der die Seinen fest im Griff hat.

Er hat aber auch - und das ist nicht selbstverständlich - eine Antenne für die Welt außerhalb des Labors. "Ich glaube, wir Physiker sollten uns nicht darauf beschränken, Ideen nur aus der naturwissenschaftlichen Tradition zu beziehen. Es gehören auch Philosophie und theologische Ansätze dazu." Ein Beleg für diese Aussage ist ein Foto im Chefzimmer. Es zeigt Zeilinger an seinem Laserexperiment, daneben - in rotes Tuch gehüllt - den Dalai-Lama, das geistige Oberhaupt des tibetanischen Buddhismus. Es ist eine Erinnerung an einen ungewöhnlichen Besuch. 1998 hatte der Dalai-Lama drei Tage im Labor von Zeilinger verbracht, die Experimente beobachtet und mit den Physikern diskutiert.

"Der Dalai-Lama hat ein naturwissenschaftliches Denken, das sehr klar und logisch ist", schwärmt Zeilinger. "Besonders spannend war es, als er uns Grundzüge des buddhistischen Denkens vermittelte - Grundzüge, die man im Westen als Naturphilosophie bezeichnen würde." Interessant sind die Unterschiede: "Für die Buddhisten gibt es keinen Beginn, wie es ihn für uns gibt", sagt Zeilinger. "Für uns Physiker ist der Urknall eine Möglichkeit, nach der die Welt irgendwann begonnen haben könnte. Die Frage nach dem Davor ist sinnlos. Das widerspricht dem Buddhismus. Da gibt es weder Schöpfung noch Gott." Noch spannender als die Vergangenheit ist für Zeilinger jedoch das, was kommen wird: "Es würde mich sehr überraschen, wenn mich die Zukunft nicht sehr überraschen würde."

Der Herr des Beamens // Anton Zeilinger gilt als einer der derzeit bedeutendsten Quantenphysiker. Der 55-Jährige ist Professor am Institut für Experimentalphysik der Universität Wien. Zu den Forschungsschwerpunkten Zeilingers zählen Untersuchungen zur Quantenoptik und zur Teleportation.

In Anerkennung seiner wissenschaftlichen Leistungen wurde Zeilinger 1996 zum österreichischen "Wissenschaftler des Jahres" gewählt. Zudem erhielt er eine Vielzahl weiterer Auszeichnungen. In diesem Jahr wurde der Forscher Mitglied des Ordens "Pour le Mérite für Wissenschaften und Künste".

Der gebürtige Oberösterreicher ist seit 1972 verheiratet und hat drei Kinder - Anna, Anton und Matthias. (wis.)

Das Bild zeigt den Versuchsaufbau, mit dem es Anton Zeilinger und seinen Mitarbeitern gelang, Photonen zu "beamen". Rote Strahlen markieren die Spuren der Photonen.

1. Der Strahl eines UV-Lasers (weiß) zielt auf einen Spezialkristall.
2. Der "Down-Conversion-Kristall" und ein dahinter liegender UV-Reflektor erzeugen vier Photonen (rote Strahlen): Sender, Empfänger, Passagier und Trigger. Sender und Empfänger sind "verschränkt": ihr Licht ist in entgegengesetzter Richtung polarisiert.
3. In der "State-Preparation-Einheit" wird dem Passagier-Photon eine Polarisation aufgezwungen, bevor es zum Strahlteiler fliegt.
4. Am Strahlteiler überlagern sich Sender- und Passagier-Photon.
5. Die Detektoren dahinter fangen die Photonen auf. Daraus geht aber nicht mehr hervor, welche Eigenschaften Passagier und Sender hatten. Man weiß allerdings, dass Sender und Passagier ebenfalls verschränkt sind, also die entgegengesetzte Polarisation aufweisen.
6. Empfänger: Wenn Sender und Empfänger gegensätzlich polarisiert sind und zugleich Sender und Passagier entgegengesetzt polarisiert sind, müssen Passagier und Empfänger gleich polarisiert sein - die Eigenschaft des Passagiers ist also auf den Empfänger übergegangen.

Die Quantentheorie // Die Quantentheorie beschreibt die physikalischen Abläufe im Reich der Atome, Elementarteilchen und Lichtquanten. Ihr zufolge verläuft das mikrophysikalische Geschehen nicht kontinuierlich, sondern sprunghaft (quantenhaft). So strahlt eine Lampe ihr Licht nicht gleichmäßig aus, sondern genau genommen in einzelnen Energiepaketen. Als Begründer der Quantentheorie gilt Max Planck (siehe Beitrag rechts).

In den 20er-Jahren erlebte die Physik einen weiteren "Quantensprung". Genies wie Heisenberg und Schrödinger entdeckten, dass die Prozesse in der Mikrowelt dem Zufall unterworfen sind, dass sich nicht alle physikalischen Größen präzise messen lassen ("Unschärferelation") und dass sich Teilchen wie Lichtwellen verhalten können ("Welle-Teilchen-Dualismus").

Neuere Experimente können, dank ausgefeilter Messtechnik, selbst ungewöhnliche Quanteneffekte sichtbar machen. Schillernde Hauptfigur dabei ist der Österreicher Anton Zeilinger. Er wird seine Experimente am Dienstag, 12. Dezember, in einem allgemein verständlichen Vortrag in der Urania vorstellen (siehe Kasten rechts). (frg.)