

Von Einstein zum Quantencomputer

Wirklichkeit und Information in der Quantenwelt

Anton Zeilinger

Von den Arbeiten Albert Einsteins aus 1905 sind wohl die beiden zur speziellen Relativitätstheorie die bekanntesten. In einer stellt er die Theorie selbst vor, in der anderen die wohl berühmteste Gleichung der Physik, $E = mc^2$. Die erste Arbeit aus diesem „annus mirabilis“ mit dem Titel „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ ist die einzige, die Einstein selbst in einem Brief an seinen Freund Habicht als „revolutionär“ bezeichnet. In dieser Arbeit schlägt Einstein vor, daß Licht aus Teilchen besteht. Dafür erhielt er 1922 den Nobelpreis. Heute werden diese Lichtquanten Photonen genannt. Trotz dieses wichtigen frühen Beitrags zur Quantenphysik begann Einstein, die neue Theorie bald zu kritisieren, und er blieb ein Kritiker sein Leben lang.

Bereits auf der Jahrestagung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte 1909 in Salzburg drückte Einstein sein „Unbehagen“ über die neue Rolle des Zufalls in der Quantenphysik aus. Es ist äußerst bemerkenswert, dass er bereits damals, lange vor der Formulierung der Quantentheorie Mitte der Zwanziger Jahre, erkannte, dass der Zufall in der Quantenphysik von einer vollkommen neuen Natur ist. Das einzelne Messereignis ist in einer Weise rein zufällig, die weit über die Rolle des Zufalls in der klassischen Physik hinausgeht. Dort nehmen wir ja immer an, es sei möglich, für jedes einzelne Ereignis eine Kausalkette zu konstruieren, auch wenn uns diese nicht immer bekannt oder überprüfbar sein mag. Für das einzelne Quantenereignis, wie etwa der Zerfall eines bestimmten radioaktiven Atoms, ist dies nicht möglich.

Nach Entwicklung der neuen Quantentheorie durch Heisenberg, Schrödinger und Dirac kritisierte Einstein insbesondere das Realitätskonzept, wie es in dem von Niels Bohr formulierten Begriff der Komplementarität zum Ausdruck kommt. Wenn wir etwa die Messung von Ort und Impuls eines Teilchens betrachten, so sagt uns die Heisenbergsche Unschärfebeziehung, dass nicht beide gleichzeitig beliebig genau sein können. Dies mag nun lediglich als Störung des Messobjekts durch unsere notwendigerweise sehr groben Meßinstrumente verstanden werden. Jedoch ist die Botschaft eine viel tiefere. Nach Niels Bohr macht es keinen Sinn, über Eigenschaften eines Systems zu sprechen, wenn wir nicht tatsächlich eine Messung durchführen, die es uns gestattet, diese Eigenschaften zu bestimmen. Wenn wir also den Ort eines Teilchens messen, ist sein Impuls nicht nur unbekannt, sondern das Teilchen *besitzt* keinen wohldefinierten Impuls. Ort und Impuls sind zueinander komplementär, wir können durch Auswahl des Meßinstruments entscheiden, welche der beiden Größen Wirklichkeit wird. Dass die andere, nicht existente, Wirklichkeitscharakter besitzt, ist dann nicht einmal in Gedanken zugelassen.

Einsteins Kritik kulminierte nach seinen Diskussionen mit Niels Bohr in der berühmten Einstein-Podolsky-Rosen-Arbeit 1935, wo er die Physik zweier verschränkter Teilchen diskutiert. Bei verschränkten Systemen besitzen die Größen, die verschränkt sind – in der EPR-Arbeit waren dies Ort und Impuls der beiden Teilchen – für keines der beiden vor einer Messung

einen wohldefinierten Wert. Wird am ersten z. B. der Impuls gemessen, so nimmt dieser zufällig einen Wert an. Das zweite, egal, wie weit es entfernt ist, erhält dann einen Zustand (wird in einen Zustand projiziert), der ebenfalls einem wohldefinierten Impuls entspricht. Die Kritik Einsteins ist am klarsten in seinen „Autobiographischen Notizen“ wiedergegeben, wo er kritisiert, dass der quantenphysikalische Zustand, den wir dem zweiten System zuordnen, offenbar davon abhängt, welche Messung wir am ersten System durchführen. Er fordert jedoch, dass der „wirkliche, faktische Zustand“ des zweiten Systems unabhängig davon sein muss, welche Messung am ersten durchgeführt wird. Es kann daher die Quantenphysik nicht eine vollständige Beschreibung der Natur sein.

Albert Einsteins Kritik führte insbesondere nach der Arbeit von John Bell im Jahr 1964, in der er zeigte, dass die von Einstein bezogene, philosophische Position in einem experimentell beobachteten Widerspruch zur Quantenphysik steht, zu zahlreichen Experimenten, die Einstein eindeutig widerlegen. Es wäre jedoch falsch, Einsteins Beitrag hier gering zu schätzen. Zur großen Überraschung aller an den frühen Experimenten Beteiligten haben gerade diese Experimente an einzelnen Quantensystemen zu neuen Ideen der Informationsverarbeitung und Informationsübertragung geführt, die das Tor zu einer neuen Technologie geöffnet haben. In diesen neuen Ideen spielen gerade die von Einstein kritisierten Punkte Zufall, Verschränkung und Komplementarität zentrale Rollen.

Am weitesten fortgeschritten ist die Anwendung in der Quantenkryptographie. In einem dieser Verfahren erzeugen die beiden Mitspieler, Alice und Bob, die Information geheim austauschen wollen, eine Serie an verschränkten Paaren an Photonen. Durch Messungen an beiden Photonen

können sie sich einen – im Prinzip beliebig langen – Schlüssel erzeugen, der aus Zufallszahlen besteht und wegen der Verschränkung auf beiden Seiten identisch ist. Alice kann nun ihre Nachricht mit Hilfe dieser Zufallszahlenfolge verschlüsseln, und Bob, der die gleiche Folge besitzt, kann sie leicht entschlüsseln. Ein Abhörer wird dadurch ausgeschlossen, dass Alice und Bob unabhängig voneinander zwischen zwei einander komplementären Messungen hin- und herschalten. Dadurch kann ein Abhörer leicht identifiziert werden. Der Stand der Quantenkryptographie ist der, dass heute Systeme existieren, mit denen ein Schlüsselaustausch über bis zu 100 Kilometer möglich ist. Systeme, die eine unmittelbare technische Anwendung gestatten, befinden sich in Entwicklung und werden in wenigen Jahren einsatzbereit sein. Kürzlich gelang es, zwischen den beiden Kanarischen Inseln Teneriffa und La Palma einen quantenkryptographischen Schlüssel durch Übertragung der Photonen im freien Raum über eine Entfernung von 144 Kilometer herzustellen. Solche Experimente zeigen, dass es im Prinzip möglich ist, auch die Entfernungen bis zu Erdsatelliten zu überwinden. In diesem Experiment wurde ein Teleskop der ESA verwendet, das der optischen Kommunikation dient. In wenigen Jahren sind daher die ersten Experimente zu erwarten, in denen die Quantenkommunikation mit Satelliten getestet wird.

Eine besonders interessante Anwendung der Quantenkommunikation ist die Teleportation. Hier wird der Zustand eines Photons mit Hilfe von Verschränkung auf ein anderes, beliebig weit entferntes übertragen. Die Teleportation, so sehr sie auch Anhängern von Science Fiction am Herzen liegen möge, wird wohl nie zur Übertragung von Objekten geeignet sein. Ihre Anwendung wird vielleicht in der Kommunikation zwischen Computern liegen. Einen

Quantencomputer stellt ein Physiker als ein System dar, bei dem die Information in Quantenzuständen kodiert ist. Hier spielt wieder Verschränkung eine zentrale Rolle.

Die Entwicklung des neuen Gebiets der Quanteninformatik ist ein schönes Schulbeispiel dafür, wie ursprünglich philosophische Fragestellungen zu einer neuen Technologie führen können. Albert Einstein kritisierte die Quantenphysik nicht, weil sie falsch gewesen wäre, sondern wegen ihrer philosophischen Implikationen. Als Folge wurden Experimente durchgeführt, in denen die Quantenphysik glänzend bestätigt wurde. Das Interessante ist, dass gerade diese Experimente das Tor zu einer neuen Technologie eröffnet haben, von der weder Einstein noch irgendeiner der frühen Experimentatoren auch nur geträumt hätten. Dies zeigt auch die Grenzen einer kurz-sichtigen, nur auf Anwendung und Umsetzung bedachten Forschungspolitik, wie sie leider immer wieder gefordert wird.

Weitere Informationen

www.quantum.at

Professor Dr. Anton Zeilinger, geboren am 20. 5. 1945 in Ried/Innkreis in Österreich, studierte Physik und Mathematik an der Universität Wien, wo er 1971 promoviert wurde. Nach Aufenthalt



in den USA, Frankreich, Australien und Deutschland wurde er 1990 ordentlicher Universitätsprofessor an der Universität Innsbruck. Seit 1999 ist er an der Universität Wien. Seit 2004 ist er Wissenschaftlicher Direktor am neu gegründeten Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Sein Forschungsinteresse gilt den Grundlagen und Anwendungen der Quantenphysik (Quantenteleportation, Quanteninformation und Quantenkryptographie).

Er ist Mitglied des Ordens Pour le Mérite und namhafter Akademien. Die Humboldt Universität Berlin und die Universität Danzig verliehen ihm ein Ehrendoktorat. Mit zahlreichen weiteren Auszeichnungen wurden seine Arbeiten gewürdigt, u.a. auch der Lorenz Oken Medaille der GDNÄ (2006).

Professor Dr. Anton Zeilinger
IQOQI – Institut für Quantenoptik und
Quanteninformation der Österreichischen
Akademie der Wissenschaften
Boltzmannngasse 3
1090 Wien
ÖSTERREICH
Tel. 0043 1/4277 51201
Fax:0043 1/4277 9512
E-Mail: anton.zeilinger@univie.ac.at