

Die neue Art des Zufalls in der Quantenwelt

Albert Einstein und die Quantenphysik

Das Jahr 2005 war das „World Year of Physics“. Ausgerufen wurde es von der Generalversammlung der Vereinten Nationen zur Erinnerung an Albert Einsteins *annus mirabilis* von 1905. In diesem Jahr hatte der junge Sachbearbeiter am Eidgenössischen Institut für Geistiges Eigentum, dem Schweizerischen Patentamt, fünf Arbeiten veröffentlicht, welche die Welt der Physik veränderten. Darunter gehören die Vorstellung der Speziellen Relativitätstheorie sowie die Arbeit, die die wohl berühmteste Gleichung der Physik, $E = mc^2$, enthält. Seine erste in diesem Jahr veröffentlichte Arbeit befaßt sich jedoch mit der Quantenphysik. Einstein schlägt vor, daß Licht aus Teilchen besteht, den Lichtteilchen, später Photonen genannt. Es sei bemerkt, daß Albert Einstein dafür, und nicht für die Relativitätstheorie, 1922 den Nobelpreis verliehen wurde. Daß diese Entscheidung nicht ganz unbegründet ist, kann man vielleicht auch daran erkennen, daß diese Arbeit die einzige war, die Albert Einstein selbst als „sehr revolutionär“ bezeichnete¹.

Kurz darauf begann jedoch Einsteins Kritik an der Quantenphysik, bei der er zeit seines Lebens, jedoch in verschiedensten Variationen, blieb. Diese Kritik begann zumindest bereits 1909 bei der Jahresversammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in Salzburg. Ein wesentlicher Punkt seiner Kritik war sein, wie er es nannte, „Unbehagen“ über die neue Rolle des Zufalls in der Quantenphysik. Es ist äußerst bemerkenswert, daß Einstein bereits vor der Formulierung der Quantenmechanik in den Jahren 1925 und 1926 durch Heisenberg und Schrödinger erkannte, daß der Zufall in der Quantenphysik von einer neuen Natur ist, einer Natur, die qualitativ über den Zufall in der klassischen Physik und auch etwa den Zufall im täglichen Leben hinausgeht.

In der klassischen Physik ist der Zufall immer eine Konsequenz unseres Nichtwissens. Wenn wir etwa konkret daran denken, welche Zahl ein Würfel zeigt, so ist dies wohl zufällig.

¹ Einstein, A.: Brief an C. Habicht, 18. oder 25. Mai 1905.

Würden wir jedoch exakt die Bewegung des Würfels beim Wurf, die Reibung bei der Berührung der Oberfläche, sein Rollen auf dem Tisch und so weiter beschreiben, so könnte man wohl genau erklären, warum bei einem bestimmten Wurf gerade zum Beispiel die „6“ kam. Und selbst wenn es aus praktischen Gründen nie möglich wäre, eine solche Beschreibung exakt durchzuführen, ist die Existenz einer solchen kausalen Beschreibung zumindest denkbar.

Anders in der Quantenphysik. Denken wir etwa an eine bestimmte Menge radioaktiver Atome. Diese werden irgendwann zerfallen, dies wird durch die Halbwertszeit beschrieben. Nach einer Halbwertszeit ist genau die Hälfte der Atome zerfallen, nach einer weiteren Halbwertszeit die Hälfte der Übriggebliebenen und so weiter. Wann zerfällt ein einzelnes Atom? Dies ist rein zufällig, und es gibt dafür keine naturgesetzliche Beschreibung. Man nimmt an, daß eine solche Beschreibung nicht nur uns unbekannt ist, sondern daß sie grundsätzlich nicht existiert. Das Verhalten des einzelnen Atoms ist in einer Weise zufällig, die über die Zufälligkeit der klassischen Physik hinausgeht. Etwas vereinfacht ausgedrückt: Nicht nur wir wissen nicht, wann ein bestimmtes Atom zerfällt, auch das Atom selbst weiß es nicht.

Daß diese neue qualitative Natur des Zufalls Albert Einstein nicht behagte, hat er mehrfach ausgedrückt, so zum Beispiel in einem Brief an Max Born vom 4. Dezember 1925: „Die Quantentheorie ist sehr achtungsgebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns nicht näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der nicht würfelt.“² Niels Bohr soll ihn daraufhin ermahnt haben, aufzuhören, dem Herrgott Vorschriften zu machen³.

An anderer Stelle sagte Einstein: „Der Gedanke, daß ein [...] Elektron aus freiem Entschluß den Augenblick [...] wählt, in dem es fortspringen will, ist mir unerträglich. Wenn schon, dann möchte ich lieber Schuster oder gar Angestellter in einer Spielbank sein als Physiker.“⁴ Das Ironische daran ist, daß man sehr wohl heute, wie wir weiter unten ausführen, daran denkt, Zufallszahlengeneratoren auch für Spielbanken zu bauen, die auf diesem quantenmechanischen Zufall beruhen. Erwin Schrödinger schlug in dieselbe Kerbe, als er sagte, „Wenn es doch bei dieser verdammten Quantenspringerei bleiben soll, so bedaure ich, mich überhaupt jemals mit der Quantentheorie abgegeben zu haben.“⁵ Interessanter-

² Einstein, A.: Brief an Max Born, 4. Dezember 1925.

³ Das soll Niels Bohr Albert Einstein erwidert haben, als dieser immer wieder versuchte, mit neuen Gedankenexperimenten die Aussagen der Quantenmechanik zu widerlegen.

⁴ Einstein, A. zitiert in: Hedwig und Max Born: Briefwechsel 1916–1955, kommentiert von Max Born. München: Nymphenburger, 1969, S. 118.

⁵ Zitat überliefert in: Heisenberg, W., Der Teil und das Ganze, München: Piper, 1969.

weise hat Wolfgang Pauli sehr klar formuliert und in seiner sehr bekannten, manchmal etwas überspitzten Art, festgestellt: „Entgegen allen rückschrittlichen Bemühungen [...] bin ich gewiß, daß der statistische Charakter der Psi-Funktion und damit der Naturgesetze [...] den Stil der Gesetze wenigstens für einige Jahrhunderte bestimmen wird [...]. Von einem Weg zurück zu träumen, zurück zum klassischen Stil von Newton-Maxwell [...] scheint mir hoffnungslos, abwegig [...]“⁶

In der klassischen Physik haben wir also Determinismus auf der Ebene der Zeitentwicklung individueller Systeme. Beispiele dafür wären die Beschreibung der Planetenbewegungen oder der Bewegung von Billardkugeln. In der Quantenphysik haben wir einen Determinismus lediglich auf der Ebene großer Ensembles. Die quantenphysikalische Psi-Funktion beschreibt, was wir im Mittel von vielen Einzelsystemen erwarten. Das Verhalten individueller Systeme ist im allgemeinen rein zufällig.

Der Quantenzufall im Experiment und in der Anwendung

Interessanterweise findet gerade der Zufall der Quantenphysik in neuen Ideen der Informationsübertragung, Informationsverarbeitung und auch Informationserzeugung Anwendungen, die in Richtung auf eine neue Informationstechnologie deuten.

Die einfachste Anwendung ist der Quanten-Zufallszahlengenerator⁷ (Abb. 1).

Die Grundidee des Quanten-Zufallszahlengenerators ist es, eine Lichtquelle zu nehmen, die Photonen, also Lichtteilchen, einzeln aussendet, eines nach dem anderen. Ein solches Photon trifft nun auf einen halbreflektierenden Spiegel. Was wird dort geschehen? Für klassisches Licht ist ein halbreflektierender Spiegel leicht zu verstehen. Die Hälfte der Lichtintensität, die auf den Spiegel auftrifft, wird reflektiert. Die andere Hälfte geht durch. Was bedeutet so ein halbreflektierender Spiegel für ein einzelnes Photon, das auf ihn auftrifft? Ein Quantenteilchen selbst ist ja unteilbar, also kann es nur entweder reflektiert werden oder durch den Spiegel durchtreten. Was wird das einzelne Teilchen machen?

⁶ Pauli, W. aus einem nur indirekt und als Fragment überlieferten Brief an Max Born, Anfang Dezember 1954, zitiert in: „Wolfgang Pauli – Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u. a.“, Band 4, Teil 2, Heidelberg: Springer, 2005, S. 887.

⁷ Jennewein, T., Achleitner, U., Weihs, G., Weinfurter, H. & A. Zeilinger: A Fast and Compact Quantum Random Number Generator. In: Rev. Sci. Inst. 71 (2000), S. 1675.

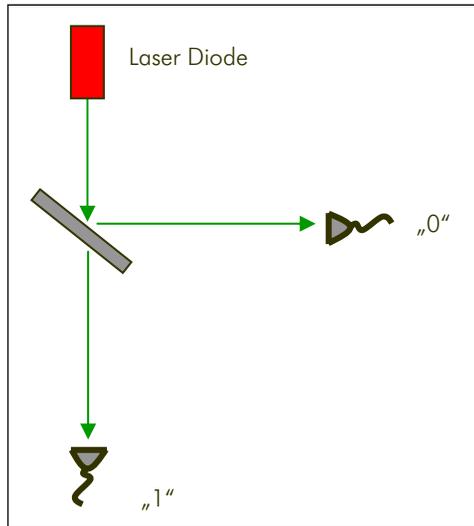


Abbildung 1
Quanten-Zufallszahlengenerator

Eine Lichtquelle erzeugt so schwaches Licht, daß die Photonen praktisch nur einzeln auftreten. Diese treffen auf einen halbreflektierenden Spiegel. Der reflektierte Strahl wird in einem Zähler registriert, der durchgehende im anderen. Je nachdem, wo das Photon registriert wird, erzeugt es die Zufallszahl „0“ oder „1“.

Die Antwort ist, daß dieses Verhalten rein zufällig ist. Genau genommen befindet sich das Teilchen nach der Wechselwirkung mit dem Spiegel in einer Überlagerung, einer sogenannten quantenmechanischen Superposition von den beiden Möglichkeiten, reflektiert zu sein oder durchgetreten zu sein. Stellen wir dann Detektoren in die beiden Strahlen, so wie es in Abbildung 1 dargestellt ist, so wird einer der beiden das Teilchen registrieren. Welcher, ist zufällig. Senden wir also eine große Folge von Photonen auf den Strahlteiler, bekommen wir zufällig einmal die „0“ und einmal die „1“, und insgesamt eine große Folge von Zufallszahlen. Diese könnte etwa lauten:

```
0110011010010100101001000101010110100101010010011110100101010
010101011001011
```

In der Praxis verwendet man nicht Quellen einzelner Photonen, da diese nur sehr schwer realisierbar sind, sondern schwaches Laserlicht, wo in guter Näherung immer nur ein Photon auftritt.



Abbildung 2
Verschränkung

In einem Meßapparat können zwei verschiedene Größen gemessen werden, die durch die Zeigerstellung symbolisiert werden. Für jede der beiden Zeigerstellungen leuchtet eines der beiden Lämpchen auf, wenn ein Photon in den Apparat tritt.

Solche Zufallszahlengeneratoren haben beachtliche technische Anwendungen. Sie werden etwa für Optimierungsalgorithmen eingesetzt. Um ein praktisches Beispiel zu nennen: Wenn wir ein Navigationssystem verwenden, das uns den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten suchen muß, so wäre eine Möglichkeit, daß ein Computer alle denkbaren Wege absucht. Eine andere Möglichkeit ist jedoch, daß man den Computer durch Zufall entscheiden läßt, welcher Weg als nächster untersucht wird. Dadurch kann in gewissen Fällen schneller eine geeignete Lösung gefunden werden. Zufallszahlengeneratoren finden weiters Anwendung etwa in der Verschlüsselung von Paßwörtern, wo man einen kleinen Schlüssel auf einem parallelen Kanal schnell übersendet.

Eine besonders interessante Bedeutung hat der Zufall im Falle verschränkter Teilchen⁸. Die Verschränkung, von Einstein als „spukhafte Fernwirkung“ abgetan, kann dann auftreten, wenn zwei Teilchen miteinander in Wechselwirkung traten und zu einem späteren Zeitpunkt an einem der beiden Teilchen eine Messung durchgeführt wird. Diese Messung ändert instantan, das heißt, ohne an die Beschränkung durch die Lichtgeschwindigkeit gebunden zu sein, den Zustand des anderen Teilchens, unabhängig davon, wie weit es entfernt ist.

Der experimentell einfachste Fall der Verschränkung kann wieder mit Photonenpaaren beobachtet werden (Abb. 2).

Eine Quelle erzeugt ein verschränktes Paar an Photonen. Das eine fliegt zum Meßapparat von Alice, das andere zum Meßapparat von Bob. Beide haben die Wahl, durch Änderung der Zeigerstellung an ihrem Apparat zu entscheiden, welche von zwei Meßgrößen – im Fall

⁸ Einstein, A., Podolsky, B. & N. Rosen: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? In: Phys. Rev. 47 (1935), S. 777.

von Photonen ist dies meist deren Polarisation – gemessen wird. Das Meßresultat ist dichotom, kann also nur zwei mögliche Werte annehmen, die durch Aufleuchten zweier Lämpchen charakterisiert werden. Das eine Resultat wird mit „-1“ gekennzeichnet, das andere mit „1“.

Der experimentelle Befund bei der Verschränkung ist nun der folgende: Wählen Alice und Bob die gleiche Schalterstellung, so erhalten sie – für einen bestimmten verschränkten Zustand – bei jedem Photonenpaar das gleiche Resultat für die beiden Photonen. Das heißt, man hat für die Einzelereignisse perfekte Korrelationen. Entweder zeigen beide Photonen „+1“ oder „-1“. Es stellt sich jedoch heraus, daß das einzelne Meßergebnis für jedes einzelne Photon rein zufällig ist. Dies zeigt bereits die grundsätzliche konzeptive Schwierigkeit mit der Verschränkung, die Erwin Schrödinger⁹ dazu brachte, die Verschränkung als „das wesentliche Charakteristikum“ der Quantenphysik zu bezeichnen. Wie ist es grundsätzlich möglich, daß zwei Ereignisse, von denen jedes rein zufällig ist, also keinerlei Ursache, auch keine verborgene, hat, genau das gleiche Resultat liefern, unabhängig davon, wie weit die beiden Systeme voneinander entfernt sind?

Man könnte nun versuchen, verschiedene Erklärungen zu finden. Eine wäre, anzunehmen, daß die individuellen Teilchen bereits mit Eigenschaften „geboren“ werden, die festlegen, welches Resultat bei welcher Messung auftritt. Der irische Physiker John Bell¹⁰ hat dieses Modell verborgener Variablen voll durchgezogen und gezeigt, daß die Vorhersagen eines solchen Modells im Widerspruch zur Quantenphysik und damit, wie Experimente gezeigt haben, auch im Widerspruch zur Natur sind. Die Teilchen werden also nicht mit Eigenschaften „geboren“, die das Meßresultat bereits festlegen. Bleibt also nur eine zweite Erklärungsmöglichkeit, nämlich die eines Signals zwischen beiden Meßstationen. Verschiedene Experimente haben ausgeschlossen, daß dies ein Signal sein könnte, das sich um die Beschränkung durch die Lichtgeschwindigkeit dreht. Natürlich ist ein instantanes Signal mit Überlichtgeschwindigkeit nie im Prinzip ausschließbar. Es gibt jedoch grundsätzliche Argumente, davon auszugehen, daß es keine Signalübertragung gibt, sondern daß es sich bei Verschränkung um ein genuines Phänomen handelt.

Man könnte nun meinen, daß diese perfekten Korrelationen, die ja instantan, also ohne Zeitverzögerung, auftreten, Einsteins Relativitätstheorie verletzen. Hier stellt sich jedoch heraus, daß es weder Alice noch Bob möglich ist, damit Information zu übertragen. Der Grund

⁹ Schrödinger, E.: Die gegenwärtige Situation der Quantenmechanik. In: Die Naturwissenschaften 23 (1935), S. 807, 823, 844.

¹⁰ Bell, J. S.: On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics. In: Rev. Mod. Phys. 38 (1966), S. 447.

ist der, daß sie durch die Wahl ihrer Schalterstellung nicht beeinflussen können, welches spezifische Meßresultat auftritt. Dieses ist rein zufällig. Es schützt also der von Einstein nicht geliebte Zufall seine Relativitätstheorie davor, von der Quantenphysik verletzt zu werden.

Es sei zum Abschluß auf einen interessanten Aspekt der Ideengeschichte verwiesen. Im Jahr 1905 führte Einstein, wie schon erwähnt, das Konzept von Lichtteilchen ein. Ab etwa 1909 begann seine Kritik an der Quantenphysik. Diese seine Kritik war wesentlich dafür verantwortlich, daß seit ca. 1970 Experimente an einzelnen und mit verschränkten Quantenteilchen durchgeführt wurden, die letztlich zeigten, daß diese Kritik nicht haltbar ist. Es ist zu betonen, daß diese Experimente primär philosophisch motiviert waren, also motiviert durch sehr tiefe Fragestellungen an die Natur. Ein weiteres interessantes Phänomen ist jedoch, daß aus diesen Experimenten seit etwa 1990 neue Ideen für eine neue Quanteninformationstechnologie entstanden. Diese Entwicklung wurde von keinem der frühen Experimentatoren in irgendeiner Weise erwartet, geschweige denn vorhergesehen. Heute, hundert Jahre nach Einstein, können wir von Quantenkryptographie sprechen, von Quantencomputern und Quantenteleportation. Bei allen diesen neuen Technologien spielen Anwendungen des Zufalls eine zentrale Rolle.

Ohne Einsteins Kritik wäre die Entwicklung wohl heute noch nicht so weit.