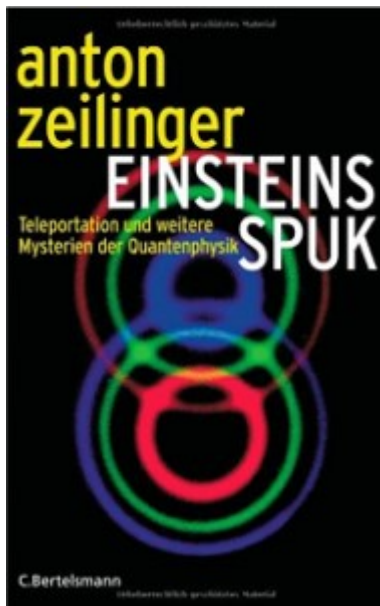


Einsteins Spuk



Rezension zu Anton Zeilingers Buch Einsteins Spuk – Teleportation und weitere Mysterien der Quantenphysik – ein Buch, das philosophische Grundlagen berührt, die ständig aktuell sind.

Anton Zeilinger ist ein Experimentalphysiker (Spitzname „Mr. Beam“), der über die Verschränkung von zwei und mehr Photonen geforscht hat und die „Teleportation“ von Quantenzuständen zuwegegebracht hat.

In der Experimentalphysik bedeutet das Arbeiten an solchen Projekten Pionierleistungen. Die Bestandteile des Experiments müssen neu erfunden werden, weil es nichts mit den verlangten extremen Spezifikationen gibt. Dankenswerterweise hat der Leser an diesen Komplikationen wenig Anteil, sondern er bekommt eine einfache Schilderung der Vorgänge geboten. Es kommen auch keine Formeln außer den unten referierten vor.

Trotzdem ist die Materie verstandeswidrig, oder zumindest sträubt sich die normale Vernunft gegen die geschilderten Phänomene. Das geht in den Bereich der *Science Fiction* hinein, und dieses Thema kommt auch zum Zuge. Es geht um *Beamen* (nicht möglich), *Zeitreisen* (nicht möglich) und *Zeitreisen von Informationen*. Da sieht der Autor immerhin prinzipielle Möglichkeiten. Betroffen sind Photonen, die keine Masse haben und deshalb auch nicht der Dilatation unterliegen, die jede Masse bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit unendlich groß werden lässt. Masselose Information aber könnte mit Überlichtgeschwindigkeit reisen, wo die Zeit theoretisch rückwärts läuft, und so könnte sie vor ihrem Aussenden ankommen. Wenn es um die 6 Richtigen beim Lotto geht, würde der glückliche Empfänger der Information aber durch seinen Gewinn den Lauf der Welt rückwirkend ändern, und das schließt der Autor pragmatischerweise aus.

Der Hauptteil des Buchs beschäftigt sich nicht mit solchen Spekulationen, sondern mit Zeilingers Wiener Experiment mit zwei verschränkten Quanten. Diese offenbar grundlegende Arbeit wird in pädagogischer Absicht in eine Story von einem Studentenpaar gekleidet, das sich das Experiment erarbeiten soll. Damit sind auch schon zwei Probleme angesprochen, die dem Buch anhaften. Einmal kriegt man nicht gleich gesagt, was das Wesentliche ist, und

worin die innovative Arbeit des Physikers besteht. Dafür muss man sich des längeren und breiteren mit den Studenten abgeben.

Das ist sicherlich gut gemeint, man soll peu à peu an die Grundlagen herangeführt werden und so auf die Aha-Effekte hingeleitet werden. Der Leser kann es aber als übertrieben lang und abschweifig empfinden, und ihm können dabei einige Fragen in die Quere kommen, die er lieber erläutert bekommen hätte, als den mühsamen Fortschritt des Studentenpärchens. Ausgeschmückt ist das dann noch mit ein bisschen Wien-Folklore; nur bleibt es blass und nichtssagend, weil der Autor nicht wirklich etwas von sich selber preisgibt. Stattdessen folgt man den Studenten in die Cafeteria, wo sie an den Problemen herumkniefeln, nach dem Prinzip *wir sagen euch nix, ihr müsst es selber herausfinden*.

Das kann man durchaus als stressig empfinden; ein anderer Leser mag dies pädagogische Verfahren wiederum prima finden. Um die kritischen Aspekte abzurunden, sei noch von der Bebilderung die Rede, die vielfach aus Fotos von einer Kreidetafel besteht. Das passt nicht zu modernen Studenten (und auch nicht zu einem Wissenschaftler, der an geradezu außerirdischen Experimenten arbeitet).

Das zentrale Experiment befasst sich mit polarisierten Photonen, die durch einen von 3 Polarisationsfiltern gehen und dann gemessen werden. Man kann Photonen nur einmal messen, dann sind sie verbraucht (bzw. ihr Quanten-Zustand). Und man kann zwar Serien von Photonen mit den gleichen Eigenschaften aussenden, aber im Quantenbereich reagiert jedes individuell. Daher kann man nur statistische Aussagen darüber machen, ob die Photonen durch den Filter gehen oder nicht. Verwendete Beispiele:

- Filter 60 Grad gegen Polarisationsrichtung geneigt, dann gehen 25% durch
- Filter 30 Grad gegen Polarisationsrichtung geneigt, dann gehen 75% durch
- Filter 0 Grad gegen Polarisationsrichtung geneigt, dann gehen 100% durch

(In diesen Zahlen spiegelt sich das Malus'sche Gesetz.) Die Hauptüberlegung geht nun so: Sind das drei unabhängige Eigenschaften des Photons, dass es durch die Filter geht? (Im Quantenbereich muss man sich über solche Eigenschaften nicht wundern.) Und der Aufwand liegt darin, die 3 Eigenschaften zu messen, obwohl man doch an einem Photon nur eine messen kann (und mehrere hintereinander nur statistisch zusammenhängen). Die Lösung ist die Verschränkung von Photonenpaaren.

Verschränkte Photonen haben die gleiche Eigenschaft bezüglich der Verschränkung (hier die Polarisation). Also werden zwei verschränkte Photonen in räumlich weit getrennten Orten gemessen; das ist das Wesentliche des Wiener Experiments. Im Buch bekommt man einen gewissen Eindruck von den Problemen, die aus der notwendigen Gleichzeitigkeit entstehen, aus der räumlichen Trennung und aus der Vielzahl der Paare. Ansonsten nimmt man die Photonenquelle, die Photonenleitung (600 m Lichtkabel) und den Versuchsaufbau als gegeben hin. Außer den Lichtleitungen gibt es noch konventionellen Datenaustausch über Mikrowellensender. Es kommt ja nicht bloß ein einziges Photonenpaar, sondern eine Vielzahl in allen möglichen Polarisationsrichtungen. Viele davon müssen aussortiert werden, und nur wenn dasselbe Paar auf beiden Seiten gemessen wird, gilt es. Das wird mit dem konventionellen Datenaustausch sichergestellt.

Die beiden Meßstationen haben einen Schalter, der den 3-fach-Filter einstellt, *a: 30 Grad, b: 0 Grad und c: -30 Grad*. Gemessen wird jetzt die Matrix der Übereinstimmungen zwischen beiden Photonen:

	a: +30°	b: 0°	c: -30°
a: +30°	100%	75%	25%
b: 0°	75%	100%	75%
c: -30°	25%	75%	100%

Die Zahlen entsprechen den Malus'schen oben. Anders als oben sind es aber nicht die Prozente, die durchgehen; sondern 100% bedeutet, beide Photonen haben gleich reagiert, sie sind entweder in beiden Stationen durch den Filter durchgegangen oder beide nicht. Wenn beide Filter gleich eingestellt sind, kommt der Fall nicht vor, dass ein Photon durchgeht und das andere nicht. Wenn die Filter um 30 Grad voneinander abweichen, sind 25% der Messungen unterschiedlich, und 75% gleich. Bei 60 Grad sind 75% ungleich und 25% gleich.

Das Experiment hat es also geschafft, zwei Eigenschaften der Photonen zugleich zu messen. Die eine Eigenschaft, nämlich die Fähigkeit, durch den einen Filter zu gehen, wird am einen Photon gemessen. Die andere, durch den anderen Filter zu gehen, am anderen Photon. Jetzt folgt ein wenig Rechnung, mit der die drei Eigenschaften zur Bellschen Ungleichung komprimiert werden, in der nur Terme mit 2 Eigenschaften vorkommen. Zur Herleitung wird ein Beispiel aus der Realwelt verwendet, und zwar Zwillinge mit drei unabhängigen Eigenschaften, *a*: groß, *b*: blauäugig, *c*: schwarzhäutig. Das Gegenteil wird mit einem Tüdelchen gekennzeichnet: *a'*: nicht groß. Dann gilt mit $ab = \text{Anzahl Große mit blauen Augen}$ und $abc = \text{Anzahl Große mit blauen Augen und schwarzen Haaren}$ und $abc' = \text{Anzahl Große mit blauen Augen und nicht schwarzen Haaren}$ usw.:

$$ab = abc + abc'$$

$$ac = abc + ab'c$$

$$bc' = abc' + a'bc'$$

und daraus folgt eine Ungleichung, wie man erkennt, wenn man einsetzt und kürzt (alle Terme sind ≥ 0):

$$ab \leq ac + bc'$$

Dies ist die Bell'sche Ungleichung, und die gilt für alle unabhängigen Kombinationen von 3 Eigenschaften. Sobald man die Zahlen aus der Matrix für das Photonenexperiment in die Ungleichung einsetzt, sieht man, dass die Ungleichung verletzt ist (für bc' nimmt man $b(100\%-c)$):

$$75\% \leq 25\% + b(100-75)\% \text{ mit } b=75\% \text{ oder } 100\%$$

Diese Verletzung der Ungleichung wurde vielfach experimentell nachgewiesen. Das hat weitreichende Konsequenzen, denn es beweist, dass die Eigenschaften abc , abc' usw den Photonen nicht mitgegeben worden sind. Vielmehr ist es undefiniert, welche Eigenschaften das verschränkte Photonenpaar hat, und erst im Moment der Messung entscheidet es sich für einen Zustand, also eine Kombination der Eigenschaften. Immer gilt das für beide Photonen gleichzeitig. Das ist die „spukhafte Fernwirkung“, die Einstein abgelehnt hat. Sie ist überlichtschnell, ohne jede Verzögerung, und verletzt damit die Forderung aus Einsteins Relativitätstheorie, dass nichts schneller ist als das Licht.

Wissenschaftlich formuliert, wird damit das [Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon](#) angesprochen. Das ist die Arbeit „*Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*“, welche die drei Physiker 1935 abgeliefert haben, und die u.a. den

„hochinteressanten Sachverhalt charakterisierte“, der als „spukhafte Fernwirkung“ abgelehnt wurde, während ihn der Physiker Schrödinger kurz darauf als „Verschränkung“ akzeptierte. Die EPR-Arbeit wurde zunächst weitgehend ignoriert. Erst 1964 wurde die EPR-Arbeit durch den Physiker Bell aufgegriffen (und seit 2000 wird sie überall zitiert). In seiner Arbeit zeigte Bell, dass es nicht möglich ist, das Verhalten verschränkter Systeme zu verstehen, wenn man von gewissen „vernünftigen“ Annahmen ausgeht, wie die Welt beschaffen sein sollte. In anderer Formulierung: die Welt ist „wirklich so verrückt“, dass die Vorhersagen der Quantenphysik für verschränkte Teilchen voll und ganz zutreffen. Zugleich bildet das die Grundlage für Quantencomputer und Quantenkryptographie (die der Autor auch näher anspricht).

Das „verrückte“ Dilemma besteht darin, dass aufgrund der Verletzung der Bell'schen Ungleichung der „lokale Realismus“ zusammenbricht, denn mindestens eine der EPR-Grundannahmen muss verletzt sein:

- a) der Realismus, d.h. das experimentelle Resultat soll durch Eigenschaften der Teilchen bestimmt sein
- b) die Lokalitätsannahme, nach der die physikalische Situation der einen Meßstation nicht von der anderen abhängen kann

Daraus kann man philosophische Weiterungen ableiten:

- a) wenn die Realitätsannahme nicht stimmt, könnte eine experimentell beobachtete Eigenschaft womöglich nicht die Eigenschaft der physikalischen Wirklichkeit sein, sondern sie hängt von der Entscheidung des Beobachters ab, welche Messung er durchführt.
- b) wenn die Lokalitätsannahme nicht gilt, dann sind getrennte Orte womöglich nicht getrennt, oder aber der Informationsaustausch mit unendlicher Geschwindigkeit muss stattfinden.

Während die Experimente wie das oben beschriebene klar machen, dass der lokale Realismus eine unhaltbare Position ist, besteht nach den Worten des Autors keine Übereinkunft, welche philosophische Position man stattdessen einnehmen sollte:

- a) man könnte das Bild einer Wirklichkeit aufgeben, die unabhängig vom Betrachter ist. Dann würde jede Messung durch die Entscheidung, gerade diese Messung durchzuführen, einen wesentlichen Einfluss auf die Realität entfalten. Das ist ein Konzept, nach dem man Information und Wirklichkeit nicht mehr trennen darf.
- b) allerdings gibt es unter den Physikern eine Präferenz für die Aussage, die Quantenphysik sei nichtlokal – was genau der spukhaften Fernwirkung entspricht.

Die Physiker scheinen ohnehin pragmatisch zu sein, die meisten geben sich anscheinend damit zufrieden, dass die Quantenphysik es ihnen erlaubt, die Dinge exakt zu berechnen. Bei Anton Zeilinger ist das nicht der Fall, für den sind die Fragen der Philosophie auch wichtig.

(Rezensioniert von Wilfried Müller)

(Dieser Artikel wurde am 6.12.13 zuerst und am 23.4.18 zuletzt veröffentlicht. Er wurde am 22.4.18 korrigiert und am 2.9.19 durchgesehen.)