

Weltbild der Physik

Die Wirklichkeit, die es nicht gibt

Von Ulf von Rauchhaupt



Ein Amperemeter: Wieso zeigt es etwas an, obwohl weit und breit nichts ist?

22. April 2007

„Was, wenn alles nur eine Illusion wäre und nichts existierte? Dann hätte ich für meinen Teppich eindeutig zu viel bezahlt“, befand einmal Woody Allen. Tatsächlich hätte er ruhig versuchen sollen, mit seinem Einrichtungshaus einen Rabatt auszuhandeln. Denn selbst wenn es seinen Teppich gibt, so hat er doch möglicherweise weder Form noch Farbe. Jedenfalls nicht, wenn man gerade nicht hinsieht.

Denn schon seit Jahrzehnten gibt es gewisse Zweifel, ob die Dinge, die wir gerade nicht beobachten, wirklich jene Eigenschaften haben, welche wir im Falle einer Beobachtung an ihnen wahrnehmen. Freilich gilt das weniger für Teppiche als für Elementarteilchen, deren Verhalten durch die Quantentheorie beschrieben wird. Und mit solchen Teilchen, genauer gesagt mit polarisierten Lichtteilchen, hat nun eine Gruppe Physiker um Anton Zeilinger von der Universität Wien ein Experiment gemacht, dessen vergangene Woche in der Zeitschrift „Nature“ veröffentlichtes Resultat dazu angetan ist, diese Zweifel zu verstärken. Denn der experimentelle Befund passt zu jener philosophischen Interpretation der Quantentheorie, die nach dem Wirkungsort eines ihrer Väter, Niels Bohr, auch die „Kopenhagener“ heißt.

Hat die Kopenhagener Schule doch recht?

Nun hat uns die Physik den naiven Realismus ja schon lange ausgetrieben. An seine Stelle ist ein physikalischer Realismus getreten, für den die Tulpe natürlich nicht rot ist, wenn keiner guckt, die aber gleichwohl objektive Eigenschaften hat - etwa die, den roten Anteil am Sonnenlicht stärker zu reflektieren als den blauen, grünen oder gelben. Genau diese Art von Realismus hinterfragt die Kopenhagener Deutung, jedenfalls auf der Teilchenebene.

Dabei sollte man doch eigentlich meinen, die Annahme einer äußeren Realität sei die Voraussetzung für jede Art von Experimentalphysik. Das aktuelle Wiener Experiment ist allerdings nicht das erste, das darauf hindeutet, dass die Kopenhagener Schule vielleicht recht hat. Es ist die Weiterentwicklung eines Typs von Versuchen, deren Fragestellung der französische Physiker Bernard D'Espagnat einmal mit folgender Analogie erläutert hat: Nehmen wir an, ein Psychologe untersucht eine Anzahl von Ehepaaren, indem er die Partner trennt und dann jeden der beiden einem Test auf eine bestimmte Eigenschaft unterzieht, die man entweder hat oder nicht hat (beispielsweise: „kennt den Nachnamen von Madonna“). Nun vergleicht er die Ergebnisse und stellt fest, dass es eine Korrelation gibt: Immer wenn der Mann den Nachnamen von Madonna kennt, kennt seine Frau ihn auch - und umgekehrt. Hat der Psychologe für den Test eine repräsentative, gewissen statistischen Ansprüchen genügende Gruppe von Paaren aus einer Bevölkerungsschicht ausgewählt, dann kann er schließen: In Ehen dieser Schicht wissen entweder beide Partner Madonnas Nachnamen oder keiner von beiden.

Lokale realistische Theorie

Diesem Schluss des Psychologen liegt nun etwas zugrunde, das man in der Physik eine lokale realistische Theorie nennen würde. Sie beruht auf drei Annahmen: Erstens, dass man von einigen untersuchten Fällen auf die Gesamtheit aller, also auch der nicht untersuchten, schließen darf. Das ist das sogenannte Induktionsprinzip, eine Grundvoraussetzung für naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinn. Zweitens gilt der Schluss nur, wenn die Eheleute wirklich so getrennt werden, dass sie sich nicht auf ein gemeinsames Verhalten verständigen können. Jeder Proband muss während des Tests von räumlich entfernten Einflüssen isoliert bleiben, weswegen man diese Bedingung auch Lokalität nennt. Und als dritte Voraussetzung dafür, dass der Schluss des Psychologen

gültig ist, müssen die Leute die getesteten Eigenschaften überhaupt haben. Das versteht man gemeinhin unter Realismus: Auch unbeobachtete Objekte besitzen Eigenschaften, von denen die dann beobachteten Eigenschaften abhängen.

Wir wissen heute, dass die Physik, die die Natur auf der Quantenebene beschreibt, keine lokale realistische Theorie sein kann. Das war einst umstritten. Kein Geringerer als Albert Einstein ersann 1935 zusammen mit seinen Kollegen Boris Podolsky und Nathan Rosen ein Gedankenexperiment, das dem von D'Espagnats Psychologen ähnelt. Statt Ehepaaren werden darin Paare von Teilchen getestet, die gemeinsam erzeugt wurden, so dass ihre Spins (Eigenschaften, die man sich als die Orientierung ihrer Rotationsachsen vorstellen kann) miteinander korreliert sind und es auch bleiben, wenn die Teilchen in verschiedene Richtungen davonfliegen. Heute nennt man solche Teilchenpaare „verschränkt“.

Widerspruch zur Relativitätstheorie

Nun kann man in der herkömmlichen Quantentheorie grundsätzlich keine einzelnen Messergebnisse vorhersagen, sondern nur die Wahrscheinlichkeit, mit der ein bestimmter Wert auftritt. Nach der Kopenhagener Deutung realisiert sich die gemessene Eigenschaft, hier der Spin, offenbar erst im Moment der Messung, denn vorher waren auch andere Messergebnisse möglich, die mit einer - im Allgemeinen anderen - Wahrscheinlichkeit hätten auftreten können, aber nun mal nicht auftraten. Das aber führt in der von Einstein ersonnenen Situation zu einem Paradoxon: Da die beiden Teilchen korreliert sind, realisiert sich mit der Messung des einen zugleich der Messwert des anderen - und zwar sofort, egal wie weit die Teilchen sich schon voneinander entfernt haben. Das aber widerspricht der Relativitätstheorie, nach der sich ein Ereignis an einem Ort erst mit Zeitverzögerung an einem anderen bemerkbar machen kann. Damit glaubte Einstein, die Kopenhagener Deutung als widersinnig entlarvt zu haben. Die ihr zugrundeliegende Quantentheorie könne demnach nicht der Weisheit letzter Schluss sein, eben weil sie keine lokale realistische Theorie ist.

Aber was kommt heraus, wenn man ein solches, zu Einsteins Zeiten noch unmögliches Experiment tatsächlich durchführt? Das überlegte sich 1964 der nordirische Physiker John Bell, und er fand auch einen mathematischen Ausdruck, die Bellsche Ungleichung, die solche Korrelationsmessungen an verschränkten Teilchen immer erfüllen müssten, wenn die Physik so lokal und realistisch wäre, wie Einstein es gerne gehabt hätte.

Physik des Allerkleinsten folgt keiner lokalen Theorie

Es dauerte noch eine Weile, bis die experimentelle Quantenphysik technisch in der Lage war, zu untersuchen, ob verschränkte Teilchenpaare nun der Bellschen Ungleichung gehorchen oder nicht. Zwischen 1972 und 1999 wurden solche Experimente schließlich mit immer größerer Präzision unternommen. Das Ergebnis ist eindeutig: Die Bellsche Ungleichung ist verletzt. Wie immer die Physik des Allerkleinsten aussieht, sie folgt keiner lokalen Theorie.

Das heißt aber: Mindestens eine der drei Annahmen muss aufgegeben werden. Aber welche? Bell war der Meinung, und manche Forscher sind es heute noch, es sei die Lokalität, von der man sich verabschieden müsse. Wie Einstein glaubte auch Bell, dass die Quantentheorie der Kopenhagener doch nicht das letzte Wort sein könne. Aber angesichts der Experimente war Bell nun bereit, die von Einstein einst als „spukhafte Fernwirkungen“ verspotteten nichtlokalen Effekte zuzulassen.

Auch die Leggett-Ungleichung ist verletzt

Andere Physiker gingen da weiter, darunter der Nobelpreisträger Sir Anthony Leggett. 2003 publizierte er eine Arbeit, in der er eine weitere Ungleichung für die Ergebnisse von Korrelationsmessungen ableitete, die dann erfüllt sein muss, wenn die Physik zwar nichtlokal, aber im gewissen Sinn immer noch realistisch ist. Es ist diese Ungleichung, die Zeilinger und seine Mitarbeiter nun anhand von Paaren von Lichtteilchen nachgemessen haben. Und siehe da: Auch die Leggett-Ungleichung ist verletzt. Die Lockerung der Lokalitätsbedingung reicht also möglicherweise nicht. Geht es damit nun auch noch dem physikalischen Realismus an den Kragen? Muss man jetzt endgültig den Traum einer realistischen Sicht der Natur begraben, in der Objekte auch außerhalb der Messgeräte der Physiker Eigenschaften besitzen?

„Das ist eine Sache der persönlichen Vorliebe“, findet Alain Aspect vom Pariser Laboratoire

Charles Fabry, einer der Pioniere der experimentellen Quantenphysik. Markus Aspelmeyer aus der Zeilinger-Gruppe sieht das nicht ganz so. „Wir haben gezeigt, dass auch eine nichtlokale Erweiterung der Quantentheorie gewisse Einschränkungen des Realismusbegriffs in Kauf nehmen muss.“ Welche das sind, darüber dürfte jetzt eine rege Debatte ausbrechen. Nach Einschätzung des Wissenschaftsphilosophen Holger Lyre, der an den Universitäten Bonn und Bielefeld lehrt, ist mit den Wiener Ergebnissen philosophisch noch nicht viel entschieden. „Ich kenne keine einzige Interpretation der Quantentheorie, auf welche die von den Wienerern gegebene Zuschreibung der Vokabel „realistisch“ zutrifft“. Tatsächlich sind es nur die Eigenschaften von Objekten in Korrelationszuständen, nämlich paarweise verschränkter Teilchen, deren messungsunabhängige Realität ausgeschlossen ist. „Die Arbeit ist aber hilfreich, um den Spielraum erlaubter Interpretationen einzugrenzen“, sagt Lyre. „Trotzdem werden hier letztlich nur Strohmänner zu Fall gebracht.“

Die Diskussion ist eröffnet

Anton Zeilinger vermutet freilich, dass sein experimenteller Zugang es ermöglichen könnte, eine noch breitere Klasse von realistischen Theorien auszuschließen. „Aber dazu gibt es keine systematischen Untersuchungen“, sagt Zeilinger. „Wie signifikant unsere Arbeit wirklich ist, muss die Zukunft zeigen.“ Anthony Leggett ist sich da schon sicherer: „Alle nichtlokalen realistischen Theorien sind etwas an den Haaren herbeigezogen. Aber ich denke, dass die, die nun ausgeschlossen sind, deutlich ‚natürlicher‘ sind als alle anderen. Das Wiener Ergebnis deutet in meinen Augen darauf hin, dass das Versagen lokaler realistischer Theorien relativ wenig mit ihrer Lokalität, aber viel mit ihrem Realismus zu tun hat.“

Dagegen nun protestiert der Philosoph Tim Maudlin von der Rutgers University in New Jersey. „Dieses Experiment testet nur Leggetts ziemlich obskure Theorie und keine plausiblen, nichtlokalen realistischen Theorien. Seine Implikationen für den Realismus sind damit gleich null.“ Das, was für Maudlin das Paradebeispiel einer plausiblen nichtlokalen realistischen Theorie ist, wird von den Wienerern nämlich ausdrücklich nicht widerlegt: jene alternative Quantentheorie, die der Amerikaner David Bohm 1952 entwickelte. Ihre Voraussagen gelten als ununterscheidbar von denen der herkömmlichen Quantentheorie, sie ist aber zumindest komplizierter und wird von den meisten Physikern abgelehnt.

„Verblüffend, wie konservativ Philosophen sind“

Die Bohmsche Theorie ist nun in der Tat dezidiert realistisch. So sind in ihr Teilchen wirklich Teilchen und nicht zugleich Wellen. Daher ist sie bei Forschern und Philosophen beliebt, die auf einem ausschließlich naturwissenschaftlichen Weltbild beharren, für das ein handfester physikalischer Realismus eine unverzichtbare Bedingung ist. Die herkömmliche Quantentheorie grenzt für die Anhänger Bohms an Obskurantismus, gerade weil sie eine Kopenhagener Interpretation nahelegt.

Dass der physikalische Realismus gerade Philosophen so teuer ist, findet nun wiederum Anton Zeilinger erstaunlich. „Mich verblüfft, wie konservativ die Philosophen sind“, sagt er und hofft auf einen Denker, der die Quantenphysik endlich einmal so klar auf den philosophischen Punkt bringt, wie Kant es seinerzeit mit der Newtonschen Physik tat. „Davon könnte dann auch die Physik etwas lernen.“

Welche Eigenschaften hat ein Teilchen wirklich?

Bisher jedenfalls wurden einige der in mancher Hinsicht radikalsten Versuche dazu von Physikern unternommen. So fragte sich etwa Carl Friedrich von Weizsäcker, ob die Physik nicht letztlich die Möglichkeitsbedingungen für naturwissenschaftliche Erfahrung widerspiegelt. Und Niels Bohr brachte in einer Entgegnung auf den Einwand von Einstein, Podolsky und Rosen sogar die Möglichkeit ins Spiel, dass vielleicht weder die Lokalität noch der Realismus das Problem sind, sondern die unumschränkte Anwendung des Induktionsprinzips. Denn was berechtigt uns eigentlich, aus den Eigenschaften eines Teilchens im Messgerät auf die des Teilchens an sich zu schließen? Das wäre nicht unvereinbar mit einem Realismus, der die Existenz einer beobachterunabhängigen Welt für möglich hält. Aber es bedeutete eine fundamentale Beschränkung dessen, was sich naturwissenschaftlich über diese Welt sagen lässt.

Text: Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 22.04.2007, Nr. 16 / Seite 65
Bildmaterial: F.A.Z./Dieter Rüchel

Zum Thema

- **Schellere Quantencomputer: Mit Photonen rechnen**
- **Wie man schwingende Spiegel mit Licht einfriert**
- **Fragen an den Physiker Anton Zeilinger: Quanten, Zeit und Philosophen**

Lesermeinungen zum Beitrag

- **Danke**
- **Die Wirklichkeit ist immer!**
- **Das Problem ist eines der Erkenntnistheorie**

© F.A.Z. Electronic Media GmbH 2001 - 2007
Dies ist ein Ausdruck aus www.faz.net