



Und Gott würfelt doch: von der Relativitätstheorie zur Quantenmechanik

von Kurt Bangert

Mit seiner Relativitätstheorie hatte der junge Albert Einstein Anfang des 20. Jahrhunderts unser physikalisches Weltbild revolutioniert. Was über Jahrhunderte, nein, über viele Jahrtausende als selbstverständlich galt, war quasi über Nacht *ad absurdum* geführt worden. Raum und Zeit waren keine unveränderlichen Parameter mehr, sondern verhielten sich relativ zueinander, verbanden sich zu einem Raum-Zeit-Kontinuum, das sich in extremen Situationen äußerst merkwürdig verhielt. Raum und Zeit waren keine absoluten Konstanten mehr, sondern veränderliche Größen, die sich dehnen, krümmen, entstehen und wieder vergehen können. Einstein hatte der Welt, so wie wir sie bisher kannten, die Zunge herausgestreckt.

Doch eines hatte er dabei unangetastet gelassen: das Verhältnis von Ursache und Wirkung. Gerade weil er sich diesem, von Newton eingeführten Ursache-Wirkungs-Prinzips verpflichtet wusste, hatte sich Einstein genötigt gesehen, nach neuen Lösungen für die unerklärlichen Phänomene zu suchen, die um die Jahrhundertwende die Physiker beinahe zur Verzweiflung getrieben hatten. Mit der Relativitätstheorie hatte Einstein zwar unseren gesunden Menschenverstand herausgefordert, aber die Welt wieder in Ordnung gebracht. Dinge, die zuvor keinen Sinn ergaben, passten sich nunmehr ein in ein neues Weltbild, in dem Ursache und Wirkung aufeinander bezogen blieben und damit in ihrem Bezogensein erneut bestätigt wurden.

Doch das Ende der Fahnenstange war noch nicht erreicht. Revolutionen haben es an sich, nicht isoliert aufzutreten, sondern weitere Umbrüche und Meutereien nach sich zu ziehen. Schon bevor sich die Aufregung um Einsteins Relativitätstheorie gelegt hatte, gab es erneut Schwierigkeiten bei der Deutung von physikalischen Phänomenen, die sich nicht so recht ins gerade schwer erschütterte Weltverständnis der Wissenschaftler einordnen ließen und nach einer unkonventionellen Lösung schrieten.

Mit Hilfe der klassischen Mechanik Newtons hatten die Forscher die Bewegungen makroskopischer Körper wie Billiardkugeln oder Planeten gut erklären können, doch schien die klassische Mechanik zu versagen, wenn es darum ging, das Verhalten mikroskopisch kleiner Körper wie Elektronen oder Protonen vorherzusagen. Irgendetwas stimmte nicht auf der atomaren Ebene! Das Verhalten der Elementarteilchen gab den Forschern Rätsel auf, weil sie sich mal wie Teilchen, mal wie Wellen verhielten.

So schien beispielsweise das Licht mal Welleneigenschaften, mal Teilcheneigenschaften zu haben. Es ist Einstein zu verdanken, dass er als erster den Teilchen-Charakter des Lichts erkannte. Wir sprechen deshalb von Photonen oder auch Quanten. Hatte man in der klassischen Physik noch gut zwischen Wellen und Teilchen unterscheiden können, so ließ sich diese Differenzierung auf die mikroskopischen Bestandteile des Atoms bald nicht mehr anwenden. Sie schienen sowohl den Zustand eines Teilchens als auch den Zustand einer



Welle zu besitzen. Man sprach von einem „Welle-Teilchen-Dualismus“ oder von „quantenmechanischen Zuständen“.

Bei der vermeintlichen Veränderung von einem Zustand in den anderen sprach man ursprünglich einmal vom „Quantensprung“, bei dem es sich aber gerade nicht – wie die populäre metaphorische Verwendung dieses Ausdrucks anzudeuten scheint – um einen riesig großen Sprung handelte, sondern vielmehr um einen mikroskopisch kleinen. In Wahrheit gibt es diese Sprünge überhaupt nicht, da es sich bei den Elementarteilchen um Objekte handelt, denen man einen ambivalenten oder besser: dualen Zustand zuschreiben muss, nämlich den so genannten quantenmechanischen.

Das erstaunliche Phänomen des Welle-Teilchen-Dualismus zeigt sich recht anschaulich beim Doppelspaltexperiment, bei dem Lichtphotonen oder Elektronen durch zwei Spalten auf eine Detektor-Platte geschossen werden, so dass auf der Platte ein „Interferenzmuster“ erscheint, das sich durch abwechselnde helle und dunkle Streifen auszeichnet. Die auftreffenden Photonen/Elektronen werden als lokalisierte Punkte angezeigt, womit sich diese Beobachtung mit dem Teilchencharakter der abgebildeten Objekte deckt. Bei Fortsetzung des Experimentes jedoch bildet sich mit zunehmender Dauer ein Streifenmuster heraus, wie es bei der Interferenz (=Überschneidung) zweier Wellen zu erwarten wäre, die sich ausgehend von den beiden Spalten ausbreiten, womit diese Beobachtung sich mit dem Wellencharakter der abgebildeten Objekte deckt.

Würden die Photonen/Elektronen sich wie reine Teilchen verhalten, so müssten sie hinter jedem der beiden Spalten je einen aus vielen Punkten bestehenden hellen Streifen hinterlassen. Stattdessen rufen sie das Interferenzmuster hervor, das nahe zu legen scheint, dass die einzelnen Teilchen *gleichzeitig* durch *beide* Spalten fliegen und anschließend mit *sich selbst* interferieren. Dieses Phänomen kann aber nur durch den synchronen Wellencharakter der Photonen/Elektronen erklärt werden. Das Doppelspaltexperiment wurde 2002 von der britischen Zeitschrift *Physics World* zum schönsten physikalischen Experiment aller Zeiten gewählt.

Neben dem Welle-Teilchen-Dualismus gibt es noch einige andere ungewöhnliche Phänomene rund um die Quantenmechanik, von denen die Unschärferelation vermutlich die erstaunlichste ist.

Wenn, wie wir durch das Doppelspaltexperiment gelernt haben, Lichtwellen oder Elektronenströme keine rein punktförmigen Objekte im Sinne von Teilchen sind, sondern eine räumliche Ausdehnung im Sinne von Wellen haben, so folgt daraus, dass man diesen Objekten keinen scharfen Ort zuweisen kann. Der Ort eines Quantenobjektes unterliegt somit einer Unschärfe. Diese Unschärfe ist umso größer, je genauer man die Geschwindigkeit (Impuls) des Objektes kennt. Der erste Wissenschaftler, der dieses Phänomen erkannt hat, war der Deutsche Werner Heisenberg (1901-1976), weshalb man diesen Effekt als Heisenbergsche Unschärferelation bezeichnet. 1926/27 dozierte Heisenberg am Institut seines dänischen Kollegen Niels Bohr (1885-1962), und durch die Diskussion dieser beiden Wissenschaftler entwickelte sich das Prinzip der Unschärferelation oder Unbestimmtheitsrelation.

Dieses Prinzip besagt also, dass der Ort und der Impuls eines Teilchens nicht gleichzeitig genau gemessen werden kann. Das Phänomen wird oft dahingehend erklärt, dass der Messvorgang die Beobachtung beeinflusst, so als würde die Beobachtung das Beobachtete stören. Es hat sich aber gezeigt, dass die quantenmechanische Unbestimmtheit eine prinzipielle Eigenschaft von subatomaren Teilchen ist, die sich nicht nur einer präzisen



Beobachtung von Ort und Impuls entziehen, sondern von einer grundsätzlichen Verhaltensunschärfe charakterisiert sind.

Albert Einstein fand die Idee von der Heisenbergschen Unschärferelation wenn nicht absurd, so doch sehr fragwürdig, weil diese Unbestimmtheit den Ursache-Wirkungs-Mechanismus in Frage stellte, an den Einstein fest glaubte. „Gott würfeln nicht“, meinte er zu den quantenmechanischen Theorien seiner Kollegen.¹ Die Einführung der Wahrscheinlichkeit oder gar des Zufalls in der Quantentheorie war ihm zuwider, weil sie seinem Bild von einem geordneten, gesetzmäßigen Universum, von einem Gott der Ordnung widersprach. „Die Quantenmechanik ist sehr achtung-gebietend“, so Einstein, „aber eine innere Stimme sagt mir, dass das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass *der* nicht würfeln.“ Jahrelang versuchte Einstein, eine andere Erklärung für die quantenmechanischen Effekte zu finden – vergeblich. Seine Kollegen zogen weiter und begannen, sich mit einer neuen Weltsicht anzufreunden.

Ein anderer weltbekannter Forscher, der sich um die Quantenmechanik verdient gemacht hat, war der Österreicher Erwin Schrödinger (1887-1961), der 1926 die nach ihm benannte Schrödinger-Gleichung aufstellte, die als „Bewegungsgleichung der Quantenmechanik“ noch heute im Gebrauch ist. Mit Hilfe dieser Gleichung kann man für jede beliebige Stelle im Raum und für jeden beliebigen Zeitpunkt die Wahrscheinlichkeit der Anwesenheit eines Teilchens bestimmen – nicht mit absoluter Bestimmtheit, sondern mit einer durch die Gleichung berechenbaren Unbestimmtheit. Diese Gleichung brachte Schrödinger Weltruhm und 1933 auch den Nobelpreis für Physik ein.

Schrödinger ist auch für sein als „Schrödingers Katze“ bekanntes Gedankenexperiment berühmt, von dem der britische Physiker Stephen Hawking allerdings geringschätzig gesagt haben soll: „Wenn ich von Schrödingers Katze höre, will ich nur noch zur Pistole greifen.“ Damit ich nicht von Hawking erschossen werde, will ich mir gleich seine Kritik an dem Experiment zu eigen machen:

Die Katze wird laut Schrödingers Vorschlag zusammen mit einem Geigerschen Zählrohr in einen geschlossenen Kasten gesteckt, in dem sich eine geringe Menge radioaktiver Substanz befindet, wobei die Wahrscheinlichkeit, dass eines der Atome nach einer Stunde zerfallen ist, 50 Prozent beträgt. Zerfällt ein Atom, registriert dies das Zählrohr und lässt mit einem Hammer einen Behälter mit Giftgas zerschlagen. Die Katze stirbt.

Nach traditioneller Deutung befinden sich die radioaktiven Atome in einem Zustand der „Überlagerung“ (Superposition), der besagt, dass sie sowohl als *zerfallen* wie auch als *nicht zerfallen* gelten. Und weil das Leben der Katze am seidenen Faden zerfallender oder nicht zerfallender Atome hängt, sei auch der Zustand der Katze durch Überlagerung gekennzeichnet; sie sei also gleichzeitig tot und lebendig oder halb lebendig und halb tot.

Erst das Öffnen des Kastens und das Hineinschauen (= der experimentelle Messvorgang) ließe erkennen, ob ein Atom zerfallen sei oder nicht und ob die Katze noch am leben sei oder nicht. Nach alter Deutung (genannt Kopenhagener Deutung) ist ein bewusster Beobachter nötig, um den wahren Zustand zu ergründen.

Eine neuere Deutung jedoch (der Dekohärenztheorie) räumt endgültig auf mit dem ambivalenten Zustand einer halb lebendigen und halb toten Katze auf. Brian Green sagt dazu:

¹ Das englische Originalzitat lautet: *I cannot believe that God plays dice with the cosmos.*



*„Wenn eine Quantenberechnung zeigt, dass eine Katze, die in einem geschlossenen Kasten sitzt, eine 50-prozentige Chance hat, tot zu sein, und eine 50-prozentige Chance, am Leben zu sein – weil es eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit gibt, dass ein Elektron einen Mechanismus auslöst, der die Katze dem Einfluss von Giftgas aussetzt, und eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit, dass das Elektron den Auslösemechanismus verfehlt –, lässt die Dekohärenz darauf schließen, dass sich die Katze **nicht** in irgendeinem absurden Mischzustand zwischen Tod und Leben befinden wird.“²*

Die Schlussfolgerung, die aufgrund des Prinzips der Dekohärenztheorie gezogen werden muss, ist, dass das Prinzip der Unschärfe das grundsätzliche Verhalten von subatomaren Teilchen widerspiegelt, und zwar auch ungeachtet jeglicher Beobachtung. Die Unschärfe macht die Voraussagbarkeit eines subatomaren Ereignisses grundsätzlich unmöglich – man kann allenfalls von Wahrscheinlichkeiten sprechen, die völlig losgelöst vom Ursache-Wirkungs-Mechanismus sind. Somit ist es nach Heisenberg zweifelsfrei wissenschaftlich erwiesen: Es gibt ihn – den Zufall.

Wir haben es auf der subatomaren Ebene also mit einer Auflösung des Ursache-Wirkungs-Mechanismus und damit einer Wiedereinführung der Kontingenz, d.h. der Unvoraussagbarkeit von Ereignissen, zu tun. Indem die Quantenmechanik die Unterscheidung von Ursache und Wirkung verschwimmen lässt, zerstört sie unsere Alltagsvorstellungen und damit unser Bild von der Natur als Ganzes. Die mikroskopische Welt funktioniert anders als unsere Alltagswelt. Mag sich unser gesunder Menschenverstand gegen das unvorhersehbare Verhalten von Elektronen auflehnen, die Wirklichkeit jedenfalls ist kontingent. Gott würfelt doch!

Aber, so könnte man einwenden: Was haben Verhaltenseigenschaften subatomarer Teilchen mit unserer Alltagswirklichkeit zu tun? Haben wir es hier nicht mit Phänomenen zu tun, die im atomaren Bereich greifen, aber die übrige Wirklichkeit unbehelligt lassen?

Dazu ist an dieser Stelle zunächst der Hinweis nötig, dass wir es bei der Quantenmechanik keineswegs mit einem theoretischen Konstrukt zu tun haben, über das sich Physiker und Mathematiker ausschließlich in ihren akademischen Vorlesungshallen Gedanken machen, sondern mit einem in der Praxis vielfach bewährten Zweig der Physik, dessen Anwendung mittlerweile auf zahlreiche technische Errungenschaften zurückblicken kann – etwa den Laser, das Elektronenmikroskop, den Transistor, den Supraleiter oder das Kernkraftwerk. Moderne Fernseher und Computer sind ohne die Anwendung der Quantentheorie nicht mehr denkbar. Die Quantenmechanik ist also kein theoretisches Gedankenmodell, sondern – wie die Relativitätstheorie – ein in der Wirklichkeit vielfach erprobtes Phänomen.

Bedeutsamer als dieses ist jedoch die Tatsache, dass es im Makrokosmos nichts gibt, was nicht vom atomaren Mikrokosmos beeinflusst wird. Das Verhalten der Elementarteilchen beeinflusst die Atome, das Verhalten der Atome hat Auswirkungen auf die Funktion der Moleküle, und das Verhalten der Moleküle bestimmt die Funktionen der Zellen, und Zellen wiederum legen die Eigenschaften und Funktionsweisen von Lebewesen fest. Das kontingente Verhalten der subatomaren Welt hat ungeahnte Auswirkungen auf die übrige Welt. Makrokosmos und Mikrokosmos bedingen einander. Und die Einbeziehung der Quantenmechanik bedeutet, dass in dieser Welt grundsätzlich auch Dinge passieren können, für die es keinerlei Erklärungen und Gründe geben muss außer der Tatsache, dass sie passieren.

² Brian Greene, *Der Stoff, aus dem der Kosmos ist*, S. 247.



Nachdem uns Einsteins Relativitätstheorie unser Weltbild gehörig durcheinanderschüttelte, hat uns nun auch die Quantenmechanik noch einmal genötigt, unsere Weltsicht neu zu definieren. Ursache und Wirkung rinnen uns durch die Hände, der Zufall feiert fröhliche Einstand. Gott, den wir durch einen strengen Determinismus zur Vordertür unseres Gedankengebäudes hinauskomplimentiert hatten, stattet uns nun dank der neu gewonnenen Kontingenz durch die Hintertür einen weiteren Besuch ab. Aber Vorsicht: Die Quantenmechanik ist noch lange kein moderner Gottesbeweis, und wer es sich als Atheist bequem gemacht haben sollte, dem kommt Meister Zufall ja gerade recht. Dennoch erlaubt uns die Quantenmechanik, das Handeln Gottes neu ins Visier zu nehmen. Kein Geringerer als Werner Heisenberg soll ja gesagt haben: "Der erste Schluck aus dem Becher der Naturwissenschaft macht atheistisch, doch auf dem Grund des Bechers wartet Gott."³ – Und würfelt.

³ Zitat nach Wikipedia, Stichwort „Werner Heisenberg“.