

QUANTENTHEORIE

„Ein Hemmnis für das Verständnis dieser Deutung [gemeint ist die Kopenhagener Deutung des Doppelspaltexperiments] ergibt sich allerdings stets, wenn man die bekannte Frage stellt: Aber was geschieht den »wirklich« in einem Atomvorgang? Zunächst ist schon vorher gesagt worden, dass man die Messung und die Ergebnisse der Beobachtung stets in den Begriffen der klassischen Physik beschreiben muss. Was man aus der Beobachtung entnimmt, ist aber eine Wahrscheinlichkeitsfunktion, also ein mathematischer Ausdruck, der Aussagen vereinigt über »Möglichkeiten« oder »Tendenzen« mit Aussagen über unsere Kenntnis von Tatsachen. Daher können wir das Ergebnis einer Beobachtung nicht vollständig objektivieren. Wir können nicht beschreiben, was zwischen dieser Beobachtung und der nächsten »passiert«. Es sieht zunächst so aus, als hätten wir damit ein subjektives Element in die Theorie eingeführt, so als wollten wir sagen: das, was geschieht, hängt davon ab, **wie wir** das Geschehen beobachten, oder wenigstens von der Tatsache, **dass wir** es beobachten. Bevor wir diesen Einwand erörtern, ist es notwendig, ganz genau zu erklären, warum man in die allergrößten Schwierigkeiten geriete, wenn man versuchen wollte, zu beschreiben, was zwischen zwei aufeinanderfolgenden Beobachtungen geschieht.

Es ist hier zweckmäßig, das folgende Gedankenexperiment zu diskutieren. Nehmen wir an, dass eine kleine monochromatische [einfarbig, Licht einer bestimmten Wellenlänge] Lichtquelle Licht ausstrahlt auf einen schwarzen Schirm, der zwei kleine Löcher hat. Die Durchmesser der Löcher brauchen nicht viel größer zu sein als die Wellenlänge des Lichtes, aber ihr Abstand soll erheblich größer sein. In einigem Abstand hinter dem Schirm soll eine photographische Platte das ankommende Licht auffangen. Wenn man dieses Experiment in den Begriffen des **Wellenbildes** beschreibt, so sagt man, dass die Primärwelle durch die beiden Löcher dringt. Es wird also zwei Sekundäre Kugelwellen geben, die von den Löchern ihren Ausgang nehmen und die miteinander interferieren [wechselwirken]. Die Interferenz wird ein Muster stärkerer und schwächerer Intensitäten, die sogenannten Interferenzstreifen, auf der photographischen Platte hervorbringen.

Die Schwärzung der photographischen Platte ist im Quantenprozess ein chemischer Vorgang, der durch einzelne Lichtquanten hervorgerufen wird. Daher muss man das Experiment auch in der **Lichtquantenvorstellung** beschreiben können. Wenn es nun erlaubt wäre, darüber zu sprechen, was dem einzelnen Lichtquant zwischen seiner Emission von der Lichtquelle und seiner Absorption [Aufnehmen von Wellen oder Teilchen] in der photographischen Platte passiert, so könnte man in der folgenden Weise argumentieren. Das einzelne Lichtquant kann entweder durch das erste oder durch das zweite Loch gehen. Wenn es durch das erste Loch geht und dort gestreut wird, so ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass es später an einem bestimmten Punkt der photographischen Platte absorbiert wird, davon unabhängig, ob das zweite Loch geschlossen oder offen ist. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung auf der Platte muss die gleiche sein, als wenn nur das erste Loch offen wäre. Wenn man das Experiment viele Male wiederholt und alle die Fälle zusammenfasst, in denen das Lichtquant durch das erste Loch gegangen ist, so sollte die Schwärzung der photographischen Platte dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung entsprechen. Wenn man nur die Lichtquanten betrachtet, die durch das zweite Loch gegangen sind, so sollte die Schwärzungsverteilung jener Wahrscheinlichkeitsverteilung entsprechen, die man aus der Annahme erhält, dass nur das zweite Loch offen war. Die Gesamtschwärzung sollte also genau die Summe der Schwärzungen in beiden Fällen sein; in anderen Worten, es sollte **keine** Interferenzstreifen geben. Aber wir wissen, dass dies falsch ist, und das Experiment wird zweifellos die Interferenzstreifen zeigen. Daraus erkennt man, dass die Aussage, das Lichtquant müsse

entweder durch das eine oder durch das andere Loch gegangen sein, problematisch ist und zu Widersprüchen führt. Man erkennt aus diesem Beispiel deutlich, dass der Begriff der Wahrscheinlichkeitsfunktion nicht eine raum-zeitliche Beschreibung dessen erlaubt, was zwischen zwei Beobachtungen geschieht. Jeder Versuch, eine solche Beschreibung zu finden, würde zu Widersprüchen führen. Dies bedeutet, dass schon der Begriff »Geschehen« auf die Beobachtung beschränkt werden muss.

Das ist allerdings ein sehr merkwürdiges Resultat, das zu zeigen scheint, dass die Beobachtung eine entscheidende Rolle bei dem Vorgang spielt und dass die Wirklichkeit verschieden ist, je nachdem, ob wir sie beobachten oder nicht.

Die Naturwissenschaft [vom Menschen gebildet] beschreibt und erklärt die Natur nicht einfach so, wie sie »an sich« ist. Sie ist vielmehr ein Teil des Wechselspiels zwischen Natur und uns selbst. Sie beschreibt die Natur, die *unserer* Fragestellung und *unseren* Methoden ausgesetzt ist. [...] Dadurch wird eine scharfe Trennung zwischen der Welt und dem Ich unmöglich.

Niels Bohr (dänischer Physiker 1885 – 1962) hat den Gebrauch beider Bilder (Wellenbild / Teilchenvorstellung) empfohlen, die er als »komplementär« zueinander bezeichnete. Die beiden Bilder schließen sich natürlich gegenseitig aus, weil eine bestimmte Sache nicht gleichzeitig ein Teilchen (d.h. Substanz, beschränkt auf ein sehr kleines Volumen) und eine Welle (d.h. ein Feld, ausgebreitet über einen großen Raum) sein kann. Aber die beiden Bilder ergänzen sich; wenn man mit beiden Bildern spielt, indem man von einem Bild zum anderen übergeht und wieder zurück, so erhält man schließlich den richtigen Eindruck von der merkwürdigen Art von Realität, die hinter unseren Atomexperimenten steckt. Bohr gebraucht den Begriff »Komplementarität« in der Deutung der Quantentheorie an verschiedenen Stellen. Die Kenntnis des Ortes eines Teilchens ist komplementär zu der Kenntnis seiner Geschwindigkeit oder seiner Bewegungsgröße. Wenn wir die eine Größe mit großer Genauigkeit kennen, können wir die andere nicht mit hoher Genauigkeit bestimmen, ohne die erste Kenntnis wieder zu verlieren. Aber wir müssten doch beide kennen, um das Verhalten des Systems zu beschreiben. [...] Durch die Beobachtung wird eine raum-zeitliche Beschreibung erzwungen. Aber sie unterbricht den durch die Rechnung bestimmten Ablauf der Wahrscheinlichkeitsfunktion, indem sie unsere Kenntnis des Systems ändert.

Der Übergang vom Möglichen [Potenzialität] zum Faktischen [Realität] findet also *während* des Beobachtungsaktes statt. Wenn wir beschreiben wollen, was in einem Atomvorgang geschieht, so müssen wir davon ausgehen, dass das Wort »geschieht« sich nur auf die Beobachtung beziehen kann, nicht auf die Situation **zwischen zwei Beobachtungen**.

Als Beispiel soll das Kausalgesetz erörtert werden. Kant (deutscher Philosoph 1724 – 1804) sagt: »Wenn wir erfahren, dass etwas geschieht, so setzen wir dabei jederzeit voraus, dass irgendetwas vorausgehe, worauf es nach einer Regel folgt«. Dies ist, wie Kant behauptet, die Grundlage für alle wissenschaftliche Arbeit. Dabei ist es nicht wichtig, ob wir diesen vorausgehenden Vorgang, aus dem der andere nach einer Regel folgt, immer finden können. Tatsächlich kann man ihn in vielen Fällen angeben. Aber selbst, wenn dies nicht möglich ist, so kann uns nichts daran hindern, zu fragen, was dieser vorausgehende Vorgang etwa gewesen sein könnte, und nach ihm zu suchen. In dieser Weise wird das Kausalgesetz einfach zurückgeführt auf die Methode der wissenschaftlichen Untersuchung. Es ist die Bedingung,

die Wissenschaft überhaupt erst möglich macht. Da wir diese Methode tatsächlich anwenden, ist das Kausalgesetz a priori und nicht aus der Erfahrung abgeleitet.

Ist dies in der Atomphysik richtig? Zum Beispiel kann ein Radiumatom ein α -Teilchen aussenden. Die Zeit für die Aussendung des α -Teilchens kann nicht vorhergesagt werden. Die Physiker können aus ihrer Erfahrung nur angeben, dass im Mittel die Aussendung in etwa zweitausend Jahren stattfinden wird. Wenn die Aussendung des α -Teilchens beobachtet wird, so fragen die Physiker tatsächlich nicht mehr nach einem vorausgehenden Vorgang, aus dem die Emission zwangsläufig folgen musste. Logisch wäre es durchaus möglich, nach einem solchen vorausgehenden Vorgang zu suchen; wir brauchen uns ja nicht durch die Tatsache entmutigen zu lassen, dass er bisher nicht gefunden worden ist. Aber warum hat sich nun die wissenschaftliche Methode tatsächlich seit Kant in dieser sehr grundlegenden Frage geändert?

Man kann auf diese Frage zwei mögliche Antworten geben. Die eine lautet: Wir sind durch die Erfahrungen, durch die Experimente zu der Überzeugung gekommen, dass die Gesetze der Quantentheorie richtig sind; und wenn sie es sind, so wissen wir, dass es keinen vorausgehenden Vorgang gibt, aus dem die Emission zu einer bestimmten Zeit zwangsläufig folgen müsste. Die andere mögliche Antwort lautet: Wir kennen den vorausgehenden Vorgang, aber wir kennen ihn nicht genau. Wir kennen ja die Kräfte im Atomkern, die für die Aussendung des α -Teilchens verantwortlich sind, aber diese Kenntnis enthält die Unbestimmtheit, die von der Wechselwirkung des Atomkerns mit der übrigen Welt herrührt. Wenn wir den Grund dafür wissen wollen, warum das α -Teilchen eben in diesem Augenblick emittiert wurde, so müssten wir dazu den mikroskopischen Zustand der ganzen Welt, zu der auch wir selbst gehören, kennen, und das ist sicher unmöglich. Daher können Kants Argumente für den a priorischen Charakter des Kausalgesetzes nicht mehr angewendet werden.

Die klassische Physik beruhte auf der Annahme – oder sollten wir sagen auf der Illusion? –, dass wir die Welt beschreiben können oder wenigstens Teile der Welt beschreiben können, ohne von uns selbst zu sprechen. Das ist tatsächlich in weitem Umfang möglich [und es wurde von der Wissenschaft, um wissenschaftlich zu gelten, explizit gefordert]. Wir wissen z.B., dass es die Stadt London gibt, unabhängig davon, ob wir sie sehen oder nicht sehen. Man kann sagen, dass die klassische Physik eben die Idealisierung der Welt darstellt, in der wir über die Welt oder über ihre Teile sprechen, ohne dabei auf uns selbst Bezug zu nehmen. Ihr Erfolg hat zu dem allgemeinen Ideal einer **objektiven** Beschreibung der Welt geführt. Objektivität gilt seit langem als das oberste Kriterium für den Wert eines wissenschaftlichen Resultats. Entspricht die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie noch diesem Ideal?

Licht kann also entweder als eine elektromagnetische Wellenbewegung gedeutet werden, so wie es seit Maxwells Arbeiten und Hertz' Experimenten angenommen wurde, oder als bestehend aus einzelnen »Lichtquanten« oder »Energiepaketen«, die sich mit hoher Geschwindigkeit durch den Raum bewegen. Aber kann das Licht beides sein? Einstein (deutscher Physiker 1879 – 1955) wusste natürlich, dass die bekannten Erscheinungen der *Beugung* und *Interferenz* nur auf der Grundlage der Wellenfunktion erklärt werden können.

Er konnte auch nicht bestreiten, dass ein zunächst unauflösbarer Widerspruch bestand zwischen der Wellenvorstellung und seiner Lichtquantenhypothese [Teilchenvorstellung]. Einstein versuchte auch gar nicht, den inneren Widerspruch dieser Deutung zu beseitigen. Er nahm den Widerspruch hin als etwas, das vielleicht sehr viel später durch ganz neue **Gedankengänge** verstanden werden könnte.“

Werner Heisenberg „Physik und Philosophie“



Werner Heisenberg